Universidad Politécnica de Madrid

Escuela Técnica Superior de Topografía, Geodesia, y Cartografía.
Proyecto Fin de Carrera de I.T. Topográfica

Proyecto de implantación de una red básica mediante técnicas G.P.S para dar cobertura al yacimiento arqueológico "Clvnia Svlpicia" (Peñalba de Castro, Burgos). Obtención de cartografía a escala 1/500 y realización de un levantamiento gravimétrico de la misma zona, para intentar localizar posibles galerías subterráneas.

Autor del proyecto:

Óscar González Díaz

Tutores:

Mercedes Farjas Abadía
Rosa Leal Gil
Antonio Vázquez Hoehne
Francisco Prieto Morín

Agradecimientos:

En primer lugar me gustaría agradecer el apoyo incondicional de las personas sin las que hubiese sido imposible llegar a este momento, a mis padres Manuel y Gloria, a mi hermano Jorge y mi novia Virginia. Gracias por vuestra ayuda, dedicación y apoyo.

También quisiera agradecer la ayuda de mis tutores, Mercedes, Rosa, Antonio y Juan así como a los demás compañeros y profesores que me han ayudado a lo largo de este camino.

ÍNDICE

1. Introducción

1.1 Localización……Pág. 6
1.2 Introducción histórica……. Pág. 11

2. Antecedentes y objetivos

3. Fundamentos teóricos

3.1 Sistema G.P.S.

3.1.1 Introducción……Pág. 16
3.1.2 Constitución del sistema G.P.S……Pág. 17
3.1.3 Medida de distancias……Pág. 21
3.1.4 Métodos de posicionamiento G.P.S……Pág. 22
3.1.5 Fuentes de error……Pág. 24

3.2 Gravimetría

3.2.1 Teoría del potencial gravitatorio terrestre……Pág. 26
3.2.2 Campo gravitatorio terrestre……... Pág. 26

3.2.2.1 Campo de fuerza gravitacional. Intensidad de campo y potencial gravitacional. …….Pág. 26
3.2.2.2 Campo de fuerza centrífugo. Intensidad de campo y potencial centrífugo. ……..Pág. 27
3.2.2.3 Gravedad y potencial gravitatorio terrestre. .Pág. 28

3.2.3 El potencial y la gravedad normal……..….Pág. 29

3.2.3.1 Superficie equipotencial ……..….Pág. 29
3.2.3.2 La gravedad normal ……..……Pág. 29

3.2.4 Fórmula fundamental de la Geodesia Física …. Pág. 30
3.2.5 El campo de la gravedad anómalo …….…… Pág. 31

3.2.5.1 Anomalía de la gravedad. Ondulación del Geoide. Desviación de la vertical ……Pág. 32

3.2.6 Variaciones en el valor de la gravedad …….. Pág. 33
3.2.7 Reducción de los valores observados de la gravedad ……. Pág. 34

3.2.7.1 Finalidad de las reducciones …….……Pág. 34
3.2.7.2 Reducciones no isostáticas …….….. Pág. 35
3.2.7.3 Reducciones isostáticas …….……Pág. 39

3.2.8 Medidas de la gravedad …….….Pág. 42

3.2.8.1 Medidas absolutas…….Pág. 43
3.2.8.2 Medidas relativas……..Pág. 47
3.8.2.3 Factores que influyen en las medidas……Pág. 53

3.2.9 Tipos de levantamientos gravimétricos……...Pág. 55

3.2.10 Interpretación de las anomalías ……..Pág. 57
3.2.10.1 Cálculo del mapa residual……Pág. 58
3.2.10.2 Cálculo de las segundas derivadas……...Pág. 60

4. Instrumentación

4.1 Instrumentación G.P.S. …….…..Pág. 64
4.2 Instrumentación Topografía clásica …….…...Pág. 65

4.2.1 Estación total ……...….……..Pág. 65
4.2.2 Nivel digital ……Pág. 65

4.3 Instrumentación gravimétrica …….Pág. 67

5. Software

5.1 SkyPro …….Pág. 75
5.2 MDT ……Pág. 76

6. Metodología operativa

6.1 Observación y cálculo de la red mediante
técnicas G.P.S…….. Pág. 78

6.1.1 Diseño de la red ……..Pág. 78
6.1.2 Observación de la red …….Pág. 79
6.1.3 Cálculo de la red …….Pág. 80

6.2 Levantamiento topográfico …….Pág. 87

6.2.1 Planificación del levantamiento ……..Pág. 87

6.2.1.1 Planificación del levantamiento
con estación total …….. Pág. 88
6.2.1.2 Planificación del levantamiento mediante
técnicas G.P.S. ……. Pág. 90

6.2.2 Observación y cálculo……. Pág. 91

6.2.2.1 Observación y cálculo con estación total …..Pág. 91
6.2.2.2 Observación y cálculo mediante

técnicas G.P.S. ……. Pág. 92

6.2.3 Realización de la cartografía ……..……Pág. 96

6.3 Levantamiento gravimétrico ……..…… Pág. 99

6.3.1 Diseño del levantamiento …….…… Pág. 99
6.3.2 Observación …….…….. Pág. 106
6.3.3 Cálculo …….……...Pág. 108

6.3.3.1 Ajuste de la red por mínimos cuadrados…....Pág. 108
6.3.3.2 Cálculo de correcciones…….……Pág. 110
6.3.3.3 Cálculo de anomalías…….……Pág. 112

7. Presupuesto del proyecto

7.1 Actividades a realizar ……Pág. 115
7.2 Recursos e instrumental …….……Pág. 116
7.3 Tablas de costes de las actividad.……....Pág. 117

7.3.1 Actividades previas …….....Pág. 117
7.3.2 Implantación de la red de coordenadas ….……..Pág. 118
7.3.3 Realización del levantamiento topográfico …....Pág. 119
7.3.4 Realización del levantamiento gravimétrico ...…Pág. 120
7.3.5 Realización de la cartografía …….…..……Pág. 121
7.3.6 Realización de la memoria del proyecto ...……..Pág. 122

8. Resultados y conclusiones …….…..……Pág. 124

9. Cartografía …….……..……....Pág. 128

10. Bibliografía…….……..……Pág. 132

11. Anexos

11.1 Radiolocalización en las ruinas de Clunia.
Grupo de Tecnologías en entornos hostiles.
Universidad de Zaragoza. ……Pág. 135

11.2 Informe del ajuste de la red de coordenadas……Pág. 144
11.3 Reseñas de las bases de la red ……..Pág. 152
11.4 Ajuste y cálculos gravimétricos ……...…Pág. 165

12. Propuesta e información del proyecto……....Pág. 179

1.Introducción

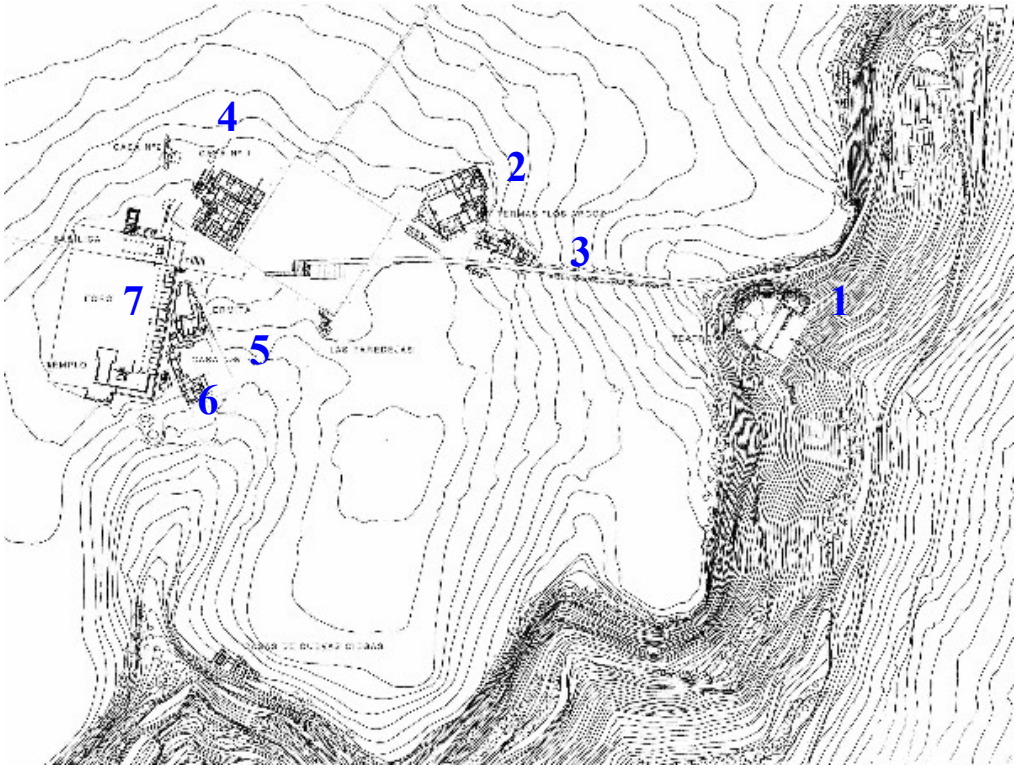
1. Introducción

1.1 Localización

El presente proyecto ha sido desarrollado en el yacimiento arqueológico de Clunia Sulpicia. La ciudad romana de Colonia Clunia Sulpicia se encuentra situada en una altiplanicie, denominada Alto de Castro a 1023 m de altitud, que domina gran parte de los territorios circundantes, en el sudeste de la provincia de Burgos, junto a la localidad de Peñalba de Castro, a 30 Km de Aranda de Duero y a 15 de Peñaranda de Duero.

En está región se observan dos zonas, ambas en cerros de superficies planas, la primera ocupada por el Alto de Castro de 1023 m de altitud sede de la ciudad romana. Separada de ella por el río Arandilla queda al SE el Alto del Cuerno asiento de la ciudad celtibérica. Al Oeste junto al término municipal de Coruña del Conde, la llamada Muela de 1009 m que en su vértice NE nos lleva hasta Arauzo de Torre, donde se encuentra otro asentamiento romano en el cerrete llamado el Castro.
La ciudad de Clunia formaba parte de la gran vía del Duero, que va desde Caesar Augusta (Zaragoza) hasta Asturica Augusta (Astorga), uno de los canales vitales de la Hispania romana. También existiría una red de pequeños viales que enlazarían la capital del Convento Jurídico Cluniense con otra serie de asentamientos como Uxama, Rauda....

En la actualidad este importante yacimiento arqueológico, esta formado por conjuntos tan destacados como:

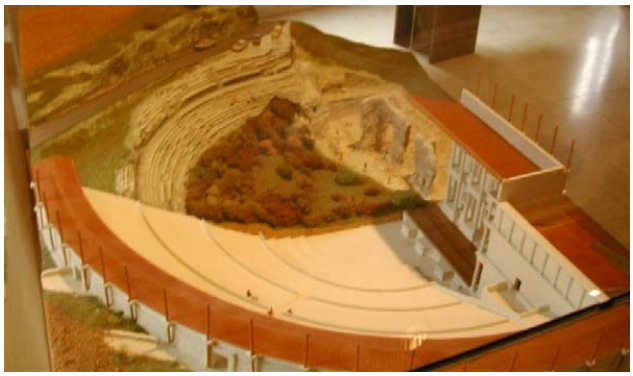


1. El teatro (siglos I-II dC)

Construido aprovechando la pendiente, una gran parte de la gradería, la cavea media y superior, está tallado en la roca viva a la manera de los teatros griegos, la cavea inferior estaría construida en obra de mampostería y se ha perdido totalmente. En la escena, los saqueos y voladuras para conseguir piedra han dejado únicamente en pie el armazón del edificio, una estructura de guijarros y argamasa. Era el de mayor capacidad de cuantos existían en Hispania.

Vista del teatro en proceso de restauración

Modelo del teatro original sobre maqueta del terreno.



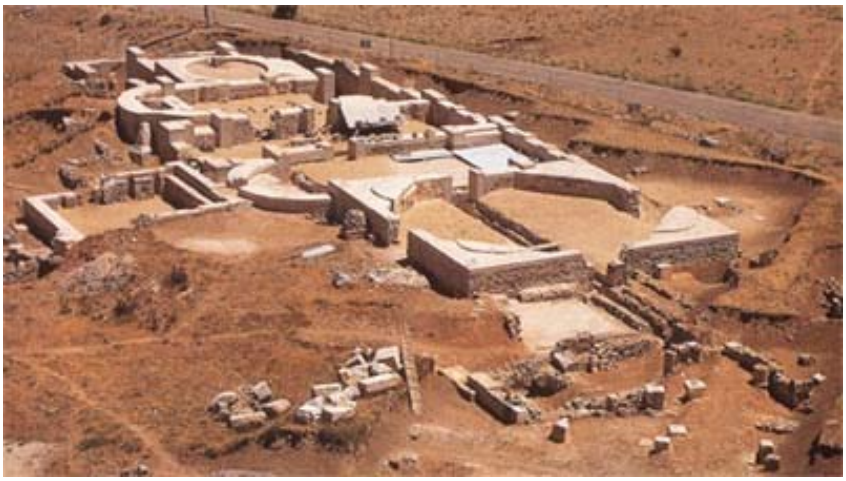
2. Conjunto Termal Los Arcos I (siglos I-III d.C.)

Conjunto formado por un edificio termal de esquema simétrico, con los ámbitos principales, “palestra”, “apoditerio", “frigidario” y “tepidario” desdoblados a partir de un eje longitudinal formado por el “caldario” y el espacio central comprendido entre las palestras donde se encontraría la “natatio”. El ingreso monumental consta de un pórtico semicircular columnado que comunica con el exterior. Completa el edificio un conjunto de habitaciones a ambos lados del Caldario de funciones difíciles de explicar y unas “letrinae” con amplio desagüe. El conjunto muestra diversas fases y reutilizaciones con una función distinta a la de baños de su origen, quizás como centro de fabricación de cerámicas hasta muy entrado el siglo V, fecha de destrucción del conjunto.

Perspectiva del conjunto termal

3. Conjunto Termal Los Arcos II (siglo I d.C)

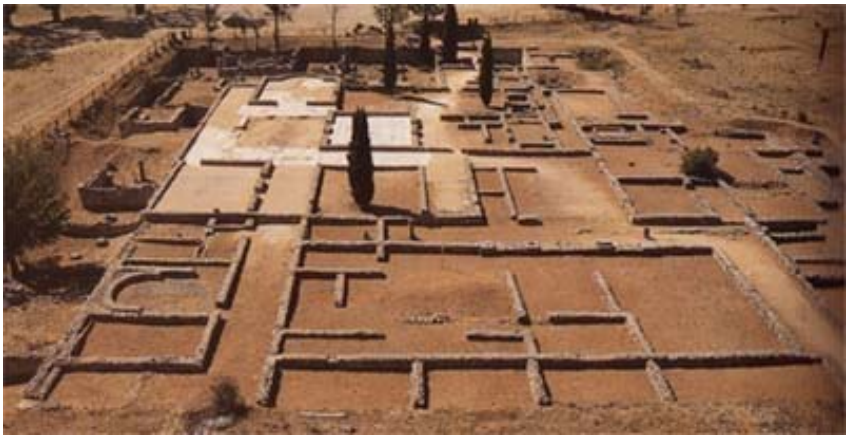
Edificio termal no excavado en toda su extensión, por lo que no se conoce completamente su planta. Estaría constituido por una palestra que daría acceso a un apoditerio octogonal y desde el que se pasaría al frigidario, tepidario y caldario cada uno con sus respectivas piscinas, en último lugar tendríamos una habitación circular con una fuente en el centro la "sudatio", una especie de sauna.



Perspectiva del conjunto termal

4. Casa Taracena. Nº1 (siglos I-V d.C)

Esta casa excavada por Blas *Taracena* en los años 30 y reexcavada por *Palol* nunca ha podido ser correctamente interpretada. Presenta varias fases con múltiples y profundas transformaciones, la última de ellas fechada en el s.IV. Llama la atención el grupo de habitaciones subterráneas, así como el conjunto de mosaicos de las habitaciones centrales.



Perspectiva de la casa Taracena

5. Casa Nº3 (siglos I-V d.C.)

No se conoce en toda su extensión, faltando de excavar su mitad NE. En la parte NO, en un primer momento tuvo que ser modificada al construir el "foro" y posteriormente al construir el "macellum" y ya en época medieval la ermita. Algunas de sus habitaciones disponían en sus paredes de pinturas y mosaicos de los que se conserva algún ejemplo.

6. Casa Triangular (siglo III d.C.)

Ocupa el espacio libre entre el decumanus, (calle de N a S de la ciudad) de la casa nº 3 y el del Foro, por lo que debería de considerarse posterior a este ultimo. En una de las habitaciones dispone de un mosaico en blanco y negro que enmarca la base de una estructura a modo de pedestal.

7. El Foro

Donde podemos diferenciar:

- ✓ Basílica:

  Excavada en su mitad E, se supone que ocuparía toda la anchura del Foro, comunica con la plaza, a través de tantas puertas como intercolumnios, es un edificio de tres naves, en la central se situaría el tribunal. En el lado N se adosan a la Basílica el "aedes augusti" y una serie de habitaciones de imprecisa función.

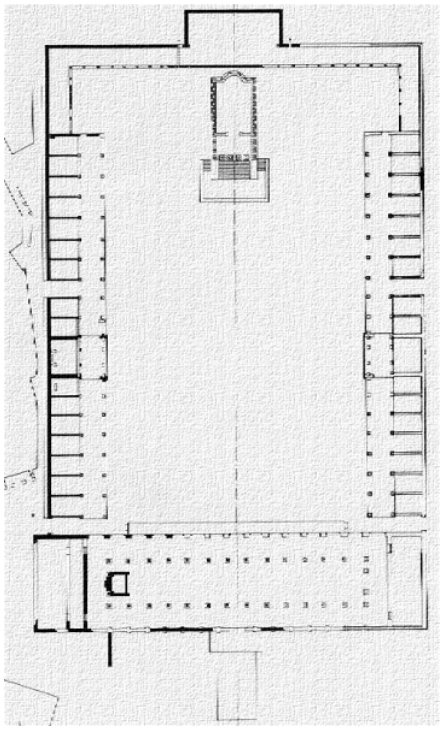
- ✓ Templo:

  Situado en el extremo S del eje del Foro, se conservan las hiladas inferiores, basamentos y molduras de su fachada, tiene planta rectangular absidiada en su parte posterior. El acceso a la parte superior del podio se realizaba por ambos lados de la fachada desde atrás.
- ✓ Tabernae
  Por el momento únicamente se conocen las de la parte oriental del Foro, por delante de ellas discurría un gran pórtico columnado.

✓ Templo Tripartito.

Ocupa el espacio de tres tabernae. Las paredes estaban recubiertas de placas de mármol y estucos pintados. En su interior se han encontrado numerosos fragmentos de esculturas.

Maqueta del Foro



1

Plano del Foro

Vista aérea de las ruinas del Foro

8. El Macellun (siglo I d.C.)

Su peculiar planta en forma de botella, deja identificar un gran acceso por el N a través de un pórtico de cuatro columnas, en su interior una serie de basas repiten la forma del edificio como si constituyeran un gran peristilo. No se conoce con precisión la función de este edificio, podría tratarse de un mercado

1.2 Introducción Histórica

La evolución histórica de la ciudad se puede resumir en los siguientes apartados:

1.- La ciudad en las guerras celtibéricas.

Poco es lo que nos dice la arqueología de la Clunia celtibérica y las noticias históricas que tenemos son tardías y escasas.
Sabemos por Livio que la ciudad fue asediada por Pompeyo en su lucha contra Sertorio en el año 75 a.C. Pero tuvo que abandonar el sitio a causa de las frecuentes salidas de Sertorio y a las inclemencias del invierno cluniense. Hasta el año 56 a.C. no volvemos a tener citas históricas, esta vez aliada a los vacceos en las revueltas por la independencia frente a Roma, el general romano Metelo sitió la ciudad pero de nuevo el duro invierno impuso una tregua. Pero la total romanización estaba cercana, en el año siguiente, el legado de Pompeyo, Afranio, redujo definitivamente a la obediencia a vacceos y arévacos, y a la ciudad de Clunia.

2.- La ciudad romana, fundación julio-claudia.

Es posible que el propio emplazamiento de la ciudad y el preponderante papel desempeñado en estas guerras pudiera hacer pensar a los romanos en mantener un puesto fijo en el lugar, creándose así la Clunia romana.
En este caso la arqueología puede auxiliarnos muy seriamente para determinar los primeros niveles de la ciudad romana. Hasta ahora en las excavaciones aparece un estrato profundo, en la casa número 1 de tiempos de Tiberio con acuñaciones hispano romanas que atestiguan la condición de "municipium" de la ciudad.
En los textos de Plinio en el año 77 d.C. tenemos datos de la ciudad y aparece como cabeza de un convento jurídico, si bien la creación de capitales jurídicas no se hizo hasta Claudio. El de Clunia ocupó una extensión que ocupaba por el norte, la costa cantábrica desde Villaviciosa en Asturias hasta cerca de Roncesvalles; por el este, La Rioja, Montes de Oca, la Demanda y hasta el Moncayo, Medinacelli y Sigüenza; por el sur, Somosierra, Guadarrama hasta Segovia, y norte de Ávila y por el oeste, Cauca (Coca) Valladolid y Pallantia. Este amplio territorio, según Plinio, incluye los grupos de los várdulos, turmódigos, velienses, los pelendones del grupo de los celtíberos como los numantinos, los vacceos, los autrigones y del grupo de los arévacos destacan: Uxama, Termes y la misma Clunia.

3.- Clunia y el emperador Galba.

En el año 68 el nombre de la ciudad, vuelve a aparecer en ocasión de la revuelta contra Nerón. Su sucesor y enemigo, Galba recibió la noticia de la muerte del emperador en Clunia de donde salió para ceñir la diadema imperial. Existen acuñaciones de Galba siendo ya emperador con la leyenda HISPANIA CLUNIA SUL(pifia). En los textos de Suetonio, tenemos descripciones interesantes, posiblemente la denominación de Sulpicia se deba a este emperador, si bien no sabemos si la condición de Colonia también se deba a él, quizá pueda pensarse que en el momento de convertirse en cabeza de un convento jurídico, bajo Claudio, fuera Colonia.
Galba en su necesidad de levantar tropas contra Nerón (68 d.C.) funda la famosa Legio VII Gemina nombre definitivo de una anterior y precedente Legio Galbiana, son tropas

en su mayoría hispanas que pasaron a Roma con el nuevo emperador pero desde allí regresaron a Hispania y desde el año 74 es la única legión romana en la Península Ibérica con sede en lo que posteriormente sería León.

4.- Clunia gran centro administrativo de la Hispania Citerior o Tarraconense.

La vida en la ciudad en tiempos romanos debió ser bastante próspera, como base política de una zona agrícolamente interesante para el Imperio y desde un punto de vista militar punto fuerte en la romanización de la Tarraconense y de Cantabria.
La ciudad de unas 100 hectáreas de extensión nos demuestra su potencia, pero es muy difícil calcular la población de la misma. De todas maneras el estudio del Teatro el mayor de la Península nos permite, siguiendo una formula de cálculo dada por el profesor Forni, pensar en una población de unos 40.000 habitantes.

5.- La crisis del siglo III, el final de Clunia.

El problema de la primera gran destrucción de la ciudad no queda nada claro, se pone en relación con las invasiones de francos y alamanos que asolaron el Imperio en el s.III, pero probablemente no sean estas invasiones las causantes de la decadencia de la ciudad. La inestabilidad económica inseguridad de caminos, bandas de saqueadores, van sembrando la intranquilidad en estas comarcas del Imperio sin que sea preciso atribuirlo a estas invasiones. Por las excavaciones realizadas, se aprecia la existencia de áreas urbanas destruidas y nunca reedificadas, desde finales del s.III.

Se produce una reacción económica desde finales de este siglo, época de Diocleciano y Constantino, aunque no sabemos todavía el alcance de este renacer urbano, ya que las áreas excavadas están limitadas a los ambientes del Foro, pero se puede pensar que en el ultimo cuarto del s.III la ciudad está en decadencia, pero que se rehace con cierto empuje durante todo el s.IV y parte del V.

Prueba de su declive es que en el área del Foro, extensas zonas de la urbe están deshabitadas y ocupándose amplios espacios para necrópolis, donde los últimos enterramientos corresponden a época visigoda segunda mitad s.VII como se deduce por el hallazgo de broches de cinturón pertenecientes a ese momento.

2.Antecedentes y objetivos

2. Antecedentes y Objetivos

Los trabajos arqueológicos realizados en el yacimiento a estudio, se han realizado hasta la fecha, con una cartografía con un sistema de coordenadas local, y arbitrario, establecido mediante la determinación de varios puntos en línea, mediante un sistema de ejes perpendiculares.

A su vez la cartografía existente del yacimiento, se localiza principalmente en las excavaciones realizadas, siendo principalmente el objeto de la misma la determinación de las construcciones halladas. No se dispone de una cartografía detallada de toda la extensión del yacimiento.

Otro punto de interés en el estudio del yacimiento, es el abastecimiento de agua a la antigua ciudad romana, y en particular a los conjuntos termales encontrados. Las características topográficas de la zona, al encontrarse la ciudad en una elevada altiplanicie y el no descubrir restos de posibles conducciones u obras hidráulicas en el entorno, han derivado en el estudio de cavidades subterráneas de la zona. De esta forma se ha descubierto una trama de cavidades o galerías de dimensiones considerables, mediante el recorrido físico de las mismas. Estos estudios son muy complicados, ya que el acceso a las galerías esta reservado a espeleólogos, debido a los riesgos propios de adentrarse en galerías subterráneas naturales que con el paso del tiempo se han deteriorado, derrumbándose parcialmente y encontrándose obstáculos de todo tipo en el acceso.

Hasta el momento para el estudio y localización de las galerías naturales, se ha realizado una cartografía aproximada de las zonas accesibles, mediante la utilización de una brújula y la medida directa de distancias. En julio de 2004, se realizó un estudio de radiolocalización de puntos en dicha galería, para así intentar determinar con más precisión la posición de la misma. Dicho estudio fue realizado por el Grupo de Tecnologías en Entornos hostiles (G.T.E.) de la Universidad de Zaragoza. El estudio completo y los resultados obtenidos se adjuntan en el *anexo 1* de este proyecto.

Con los antecedentes expuestos, se ha planificado la realización del presente proyecto, para la consecución de los siguientes objetivos:

- ✓ Implantación de una red básica enlazada con vértices de la Red Geodésica Nacional por Técnicas Espaciales (REGENTE), que de cobertura a todo el yacimiento, de una extensión aproximada de 100 Has.

- ✓ Realización de un levantamiento topográfico a escala 1/500, de unas 10 hectáreas, localizado en la zona donde posteriormente se realizará el estudio gravimétrico.

- ✓ Realización de un levantamiento gravimétrico, para determinar anomalías residuales de la intensidad de la gravedad, mediante las cuales se pueda poner de manifiesto la situación de las cavidades subterráneas, que constituyen en sí un defecto de masa.

3.Fundamentos teóricos

3. Fundamentos Teóricos

3.1 Sistema GPS

3.1.1 Introducción

El sistema de posicionamiento global GPS fue desarrollado con fines militares, por el Departamento de Defensa de los EEUU (DoD), organismo que se ocupa además de su desarrollo, del control del sistema, que ha ido aumentando su uso público a lo largo del tiempo, siendo las aplicaciones orientadas a la topografía y geodesia únicamente una pequeña parte de los distintos usos que actualmente pueden darse al sistema. El sistema GPS proporciona desde que se encuentra operativo información sobre la posición y el tiempo las 24 horas del día, independientemente de las condiciones atmosféricas.

Este sistema se basa en la recepción de señales formadas por radiaciones del especto electromagnético procedentes satélites artificiales, por ello es necesario conocer la situación del satélite respecto al origen, o vector satélite y obtener a partir de nuestras observaciones el vector de observación entre el satélite y nuestra posición.

El vector satélite puede ser conocido si disponemos de las efemérides, o parámetros que transmite el satélite que van a permitir determinar su posición en función del tiempo. Las efemérides son facilitadas por los operadores de la constelación tras hacer su seguimiento desde las estaciones monitoras.

Los satélites emiten señales que son registradas por los receptores con fines que no solamente se destinan a la navegación, siendo hoy en día otras muchas funciones desconocidas para el usuario civil. Con las señales emitidas se pueden realizar diferentes tipos de posicionamiento que permiten alcanzar precisiones muy elevadas.

Los posicionamientos realizables mediante técnicas GPS se pueden dividir según varios criterios:

- ✓ Según el sistema de referencia utilizado:
  - o Posicionamiento absoluto
  - o Posicionamiento relativo
- ✓ Según el estado del receptor:
  - o Posicionamiento cinemático
  - o Posicionamiento estático
- ✓ Según el observable utilizado:
  - o Código
  - o Fase

- ✓ Según el momento en el que se calculen las soluciones
  - Tiempo Real
  - Post-proceso

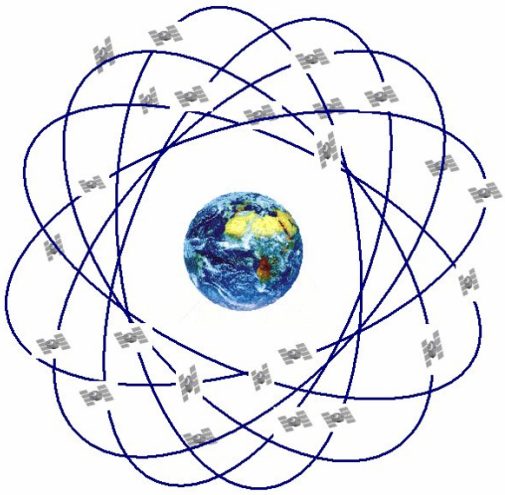
3.1.2 Constitución del Sistema GPS

La infraestructura necesaria para el funcionamiento del sistema GPS esta divida en tres sectores:

- ✓ Sector espacial:

  Esta compuesto por la constelación de satélites artificiales NAVSTAR (Navigation Satellite Timing And Ranging o Navegación por satélite con medición de tiempo y distancia) completada el 1 de Enero de 1994. La constelación esta formada por seis planos orbítales, y en cada uno de ellos existe una órbita elíptica, casi circular, donde se alojan los satélites regularmente distribuidos. Los planos orbítales tienen una inclinación de 55º respecto al plano del Ecuador. Cada uno de estos seis planos se identifican por las letras A, B, C, D, E y F. A su vez cada satélite dentro de la órbita se numera desde el 1, 2, 3, 4, 5, formando como mínimo una constelación de 24 satélites operativos, cuatro o cinco en cada órbita.

  La altitud de los satélites es de 20.180 Km y completan dos órbitas exactas cada 360º de giro de la Tierra, es decir tienen un periodo de rotación de 12 horas de tiempo sidéreo. De esta forma cada satélite se encuentra sobre el horizonte unas cinco horas, configuración que asegura en cualquier posición sobre la Tierra y en cualquier momento, existen entre seis y once satélites con geometría favorable, de los cuales se pueden recibir señales.



Esquema de la constelación

Los satélites que conforman la constelación NAVSATAR, pueden recibir y almacenar información que les es enviada por el sector de control, y a su vez son capaces de transmitir señales tanto al sector de control como al sector de usuario. Los satélites actuales están provistos de relojes atómicos de rubidio y cesio, y paneles solares que aseguran el suministro de energía del satélite.
La emisión de las señales se realiza a través de antenas direccionales que funcionan en la banda L y S del espectro. Las señales emitidas y recogidas por el sector de usuario son las correspondientes a la banda L, mientras que el intercambio de información entre el sector de control y el sector espacial se realiza a través de la banda S.

Satélite GPS Block IIA

Uno de los componentes de vital importancia de los satélites, son los instrumentos de medida de tiempo utilizados, ya que en ellos se basa el sistema GPS. Actualmente se utilizan osciladores de alta precisión que proporcionan una medida del tiempo del orden de 10^{-14} segundos.

Las señales emitidas por los satélites se transmiten utilizando dos ondas portadoras, que se obtienen como resultado de multiplicar por un factor la frecuencia fundamental del oscilador. El valor de esta frecuencia fundamental es de 10,23 MHz, y partiendo de esta frecuencia se estructura todo el conjunto de la señal emitida. El hecho de usar dos frecuencias permite determinar por comparación de sus retardos diferenciales, el retardo inonosférico.
El factor anteriormente citado denominado factor K, se corresponde con el valor 154, para la onda portadora L1, mientras que para la L2 es de 120, de forma que la frecuencia de las ondas es, para la L1 1575,42 MHz y para la L2 1227,6 MHz.

Utilizando estas ondas portadoras L1 y L2, se consigue enviar por modulación dos códigos y un mensaje, formados por una secuencia binaria de longitud determinada.

El primer código emitido se denomina C/A (Coarse Adquisition) y consiste en una modulación sobre la frecuencia fundamental, siendo el valor de K 0,1 y su frecuencia por tanto de 1,023 MHz, ofreciendo precisiones métricas y utilizado para posicionamientos de baja precisión.

El segundo código emitido, denominado P, se modula directamente sobre la frecuencia fundamental (10,23MHz), tiene precisiones por debajo del metro y se usa para posicionamientos precisos. Este código P puede ser modificado, de forma que se combina con un código secreto W, obteniéndose como resultado el código Y, cuya función es similar a la del código P, pero sólo es accesible a usuarios autorizados. Esta técnica de encriptado se denomina anti spoofing AS y se debe tener en cuenta en casos de conflicto o emergencias militares.

Además de estos dos códigos, se emite un mensaje que aporta la información necesaria para los usuarios del sistema. Tiene una duración de 12 min 30 s y consta de 25 grupos de 1500 bites cada uno. A su vez estos 25 grupos se subdividen en 5 bloques, siendo el 1, 2 y 3 invariables en los grupos, mientras que el 4 y 5 si son variables.

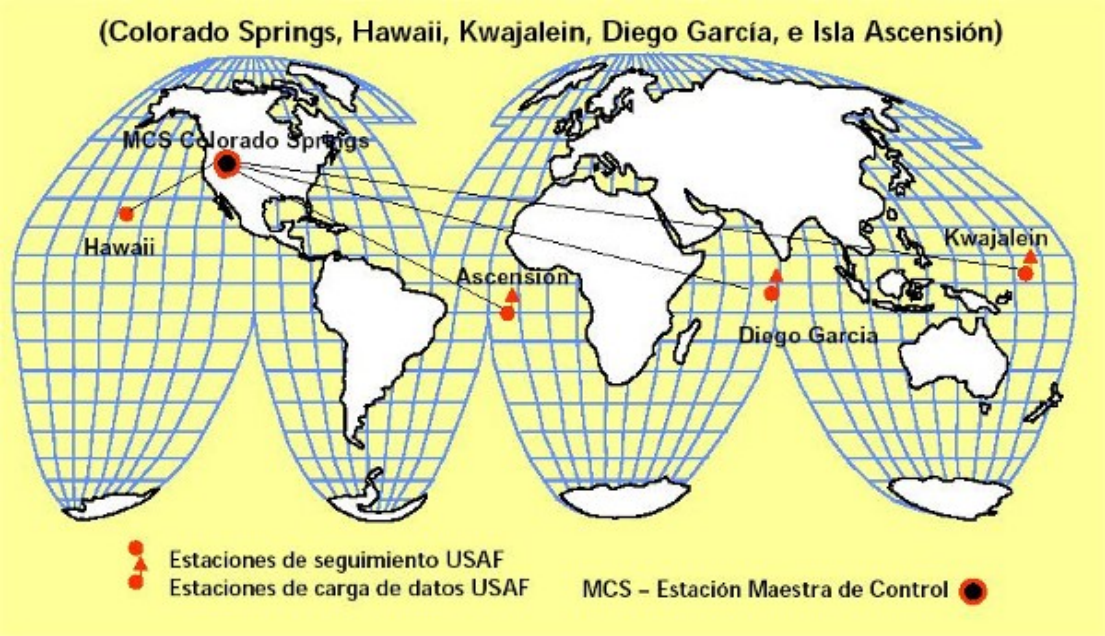
-Bloque 1: Contiene los parámetros de desfase del reloj, salud del satélite antigüedad de la información y otras indicaciones.
-Bloques 2 y 3: Contiene las efemérides, denominadas "transmitidas" para la obtención de resultados de posicionamiento.
-Bloque 4: Contiene información no accesible para el usuario civil.
-Bloque 5: Contiene el almanaque (información expedita de las órbitas de todos los satélites) y el estado de los relojes de los primeros 25 satélites.

✓ Sector de control:

El sector de control tiene como misión el seguimiento continuo de los satélites que forman la constelación, a través de las cinco estaciones oficiales de seguimiento. Dichas estaciones se ubican, espaciadas de manera bastante uniforme a lo largo del ecuador y son : la estación central o maestra (MCS) situada en la base Falcon Air Force, cerca de Colorado Spring (EEUU), y las secundarias se ubican en Ascensión (Atlántico Sur), Diego García (Océano Indico), Kwajalein (Océano Pacifico Occidental) y Hawai (Océano Pacifico Oriental).

En estas estaciones, se reciben continuamente las señales de los satélites que se encuentren en su horizonte local. Dicha información es necesaria para establecer con gran precisión las órbitas de los satélites.
Todos los datos que se obtienen en estas estaciones se envían a la central donde son procesados y se calculan las efemérides, los estados de los relojes y toda la información que ha de ser transmitida y almacenada en la memoria de cada satélite para su radiodifusión. Esta transmisión, así como las correcciones del reloj y otros

mensajes y comandos, pueden ser realizadas por las estaciones de Ascensión, Diego García y Kwajalein.



✓ Sector de Usuario:

El sector de usuario se constituye por todos aquellos instrumentos utilizados, para calcular las coordenadas de un punto, hacer navegación o adquirir tiempo con la precisión de oscilador atómico, usando las señales radiodifundidas desde los satélites de la constelación NAVSTAR, y el "software" necesario para procesar estos datos.

Este sector es notablemente distinto, según la aplicación a la que se destine, aunque se puede definir como equipo elemental el formado por, antena, unidad de control y receptor GPS.

La antena recibe y amplifica la señal que se emite desde el satélite, y convierte dicha radiación electromagnética en corriente eléctrica. En el caso de los satélites, la antena emisora realiza el proceso inverso; convertir corriente eléctrica en radiación electromagnética.

Esta señal electromagnética, convertida en corriente eléctrica se transmite al receptor GPS, unidad en la que se almacena y/o procesa adecuadamente, según los parámetros introducidos en la unidad de control manipulada por el usuario.

Finalmente las coordenadas a calcular mediante las señales recibidas, se corresponden físicamente con el centro radioeléctrico de la antena, que no suele coincidir con su centro físico o mecánico.

3.1.3 Medida de Distancias

Para poder calcular la posición del receptor GPS, es necesario conocer los vectores de posición del dicho receptor con respecto a los satélites. Para ello se deben realizar medidas de distancias, las cuales se pueden efectuar de tres métodos distintos:

- Mediante el sistema Doppler
- Mediante pseudo distancias o código
- Mediante medida de fase

Realmente el sistema Doppler ofrece un posicionamiento rápido, aunque de menor precisión que el proporcionado con el sistema GPS. En la práctica su única aplicación posible es su utilización para realizar una primera aproximación en un posicionamiento por pseudo distancias, y así obtener unas coordenadas aproximadas para comenzar el cálculo y que este converja más rápidamente.

✓ Medida mediante código o pseudo distancias:

Este método consiste en una multilateración espacial que sitúa la posición del receptor en la intersección de dos esferas con centro en el satélite y cuyo radio se corresponde con la distancia medida a cada satélite. En realidad para poder definir sin ambigüedad la posición del receptor, hemos de conocer las distancias a al menos cuatro satélites, para poder dar solución a las cuatro incógnitas planteadas, es decir la posición (x,y,z) y el tiempo (estado del reloj del receptor).

La distancia entre el receptor y el satélite se determina por medio de una medición de los observables del tiempo de propagación del código C/A(modulado sobre L1) o del código P (modulado sobre L1 ó L2). Este procedimiento consiste en la emisión de un impulso (código); por parte del satélite, con información adicional del instante de emisión, y la recepción; por parte del receptor, de dicho código con el registro del instante en el que se recibe. De esta forma, si se conoce el tiempo transcurrido desde la emisión hasta la recepción de la señal, y la velocidad de propagación de la misma, se calcula la distancia recorrida, para lo cual es muy importante la correcta sincronización de los relojes del satélite y del receptor.

✓ Medida de fase:

Mediante este método se puede llegar a medir la distancia entre satélites y receptores de una manera comparable a los distanciómetros utilizados en topografía clásica.

El método se basa en la emisión de una onda radioeléctrica de una determinada frecuencia (L1 ó L2) por parte del satélite, y la generación de esa misma onda, por parte del receptor en el mismo instante. En este caso el observable utilizado es el desfase de onda, el cual es función de la distancia entre el satélite y el receptor. Conociendo la longitud de la onda emitida, para calcular la distancia,

es necesario determinar el valor del número entero de longitudes de onda, más una fracción de longitud de onda, calculada al comparar la onda recibida y la generada por el propio receptor.

$$Distancia = \lambda(N+\Delta\varphi)$$

El valor del desfase $\Delta\varphi$ varía entre 0º y 360º, y cuando supera los 360º el valor de N aumenta un entero y el desfase pasa a ser cero. Por tanto la incógnita a determinar en este método es el valor de N, es decir, el número entero de longitudes de onda que separan el receptor del satélite. En este caso, y a diferencia que en distanciometría electrónica, no se puede variar la frecuencia sobre la que se realiza la medida, por tanto no es posible conocer de esta manera el valor de N. Por ello es fundamental no perder el seguimiento de la fase para no variar la ambigüedad inicial N, ya que si existe una pérdida de recepción de señal se rompe la cuenta de ciclos enteros y se produce lo que se denomina como "pérdida de ciclos".

Por tanto la resolución de la ambigüedad se realiza mediante el proceso de cálculo, así como de las otras incógnitas a determinar, como son los incrementos de coordenadas.

3.1.4 Métodos de Posicionamiento GPS

Los distintos métodos de posicionamiento; utilizando el sistema GPS se pueden clasificar atendiendo a distintos criterios, tal y como se ha citado al comienzo de este capítulo y que a continuación se detallan:

1. Según el sistema de referencia adoptado:

   a) Posicionamiento absoluto: Este tipo de posicionamiento determina la posición del receptor en coordenadas absolutas y referidas al sistema de referencia al que estén referidos los satélites. Los observables utilizados para este tipo de posicionamiento suelen ser los códigos C/A o P para determinar la pseudo distancia.

   Este tipo de posicionamiento se realiza con un solo receptor y tiene como inconveniente la escasa precisión del posicionamiento, que está afectado por una serie de errores que degradan la posición del receptor entre 4 y 100 m en el caso que la disposición selectiva esté desactivada (S/A = OFF).

   La solución de este método se obtiene en tiempo real por navegación o por resolución de un sistema mínimo cuadrático en el que la redundancia del sistema se encuentra en función del tiempo de observación, caso en el que se mejora la precisión y se denomina como "single point".

   b) Posicionamiento relativo: Este tipo de posicionamiento determina la posición del receptor en un sistema de coordenadas local o relativo, mediante el cálculo de incrementos de coordenadas.

Es necesaria la utilización de dos o más receptores, y se superan con creces las precisiones del anterior método ya que al emplear dos equipos, se observa una serie de satélites en el mismo instante, de modo que se pueden eliminar errores propios del sistema GPS.
Se calculan así los incrementos de coordenadas del receptor "móvil", respecto al receptor que se establece como referencia o receptor "fijo", de manera que los incrementos de coordenadas se obtienen con unas precisiones entre 0.5 y 0.05 m.
En muchas ocasiones se asignan las coordenadas obtenidas mediante un "single point" a receptor utilizado como referencia, y a partir del cual se calculan los incrementos de coordenadas
La disponibilidad de los resultados, en tiempo real o en postproceso, depende de la existencia de radio comunicación de los receptores en el momento de observación.

2. Según el movimiento del receptor:

a) Estático: Mediante este tipo de posicionamiento se determinan las coordenadas del receptor a partir de una serie de observaciones realizadas en un periodo de tiempo en el que no hay desplazamientos del receptor superiores a la precisión del sistema utilizado.

El tiempo de observación puede ser incrementado para la obtención de soluciones tan redundantes como se necesite. En la modalidad relativa, permite la obtención de precisiones muy altas.

b) Cinemático: En este caso se determinan las coordenadas del receptor según varía el tiempo y la situación de una antena que tenga desplazamientos superiores a la precisión del sistema utilizado. En este caso cada tripleta de coordenadas se obtiene a partir de una única muestra de datos, por lo que no hay redundancia.

3. Según el modo de obtención de resultados:

a) Tiempo real: Las coordenadas se obtienen en el mismo instante en que se realiza la observación.

b) Tiempo diferido: Las coordenadas se obtienen con posterioridad a la toma de datos, en el postproceso de los mismos.

4. Según el tipo de observable:

a*) Medida de Fase:* En este método el satélite genera una onda con una determinada frecuencia L1 ó L2 en un determinado instante y el receptor genera esa misma onda en el mismo instante. El receptor compara ambas ondas y mide la diferencia de fase entre ambas, así como la variación de ese desfase a lo largo del tiempo. Para la determinación de la distancia exacta falta únicamente conocer el valor inicial del número entero de longitudes de onda, también denominadas ambigüedades. Mediante este método se consiguen las mayores precisiones.

b) Medida por código: La distancia desde el receptor al satélite, se determina mediante una medición del tiempo de propagación del código C/A o del código P. Es decir, el satélite transmite un impulso, código, que contiene información adicional en el momento de la emisión. En el receptor se mide el momento de llegada del impulso y se lee la información contenida sobre el instante de emisión. La diferencia de tiempo multiplicada por la velocidad de propagación de la señal proporciona la distancia, siempre que los relojes del receptor y el satélite estén adecuadamente sincronizados. La medida obtenida de esta forma se denomina "pseudo distancia".

5. Según combinación de métodos:

Entre las distintas posibilidades cabe destacar:

a) Estático absoluto: Se obtienen la posición en tiempo real y sólo se pueden usar pseudo distancias.

b) Cinemático absoluto: Se obtienen la posición en tiempo real mediante medida de psudodistancias o de fase.

c) Estático relativo: Puede usarse tanto el sistema de pseudo distancias como la medida de fase, obteniéndose una gran precisión.

3.1.5 Fuentes de Error

Al igual que cualquier observación de topografía clásica, una observación GPS está sometida a varias fuentes de error que se pueden minimizar o modelar según los equipos y la metodología de observación que se utilice. Un receptor GPS determina las distancias que existen entre su antena y las antenas de los satélites de los que recibe señal. Basándose en estas distancias y en el conocimiento de las posiciones de los satélites, el receptor puede calcular su posición. Sin embargo, diversos errores afectan a la medida de la distancia y por consiguiente se propagan al cálculo de la posición del receptor.

Las medidas de código y las medidas de fase se ven afectadas por errores sistemáticos y accidentales. La precisión en posicionamiento absoluto que un usuario puede alcanzar con un receptor GPS, depende principalmente de cómo sus sistemas hardware y software puedan manipular los diversos errores que afectan a la medición.
Estos errores pueden ser clasificados en tres grandes grupos, atendiendo a la fuente de que produce el error:

- ✓ Errores relativos al satélite:
  - Errores en el oscilador
  - S/A o disponibilidad selectiva
  - A/S o Anti spoofing
  - Errores o variaciones en los parámetros orbítales

- ✓ Errores relativos a la propagación de la señal:
  - Refracción ionosférica

- Refracción troposférica
- Pérdidas de ciclos
- Multipath u ondas reflejadas

✓ Errores relativos al receptor
- Errores en el oscilador
- Errores en las coordenadas del punto de referencia
- Error en el estacionamiento
- Error en la manipulación del equipo
- Variación y desfase del centro de la antena

Estos errores en algunos casos pueden modelarse, y en otros pueden eliminarse aplicando los algoritmos adecuados. El posicionamiento en modo diferencial o relativo los reduce en gran medida.

En las técnicas GPS se consideran dos contribuciones distintas al error esperable, como son el UERE y DOP:

✓ UERE: *User Equivalenty Range Error*. Supone que la fuente de error no esta correlada con las demás fuentes de error y es la contribución al error en la medida de la distancia producida por una sola fuente de error.

✓ DOP: *Dilution Of Precisión.* Es la contribución puramente geométrica a la incertidumbre de un posicionamiento.

Este es un parámetro adimensional, que describe la solidez de la figura formada por el receptor y los vectores que determina con los satélites que se encuentran en su horizonte de observación. Su valor inicial es 1 y aumenta conforme empeora la geometría, pudiendo establecer límites en sus valores a partir de los cuales se suspenden las observaciones por su mala geometría de observación.
Estos parámetros se pueden clasificar como:

- GDOP: Aplicado a las tres coordenadas de posición y al estado del reloj.
- PDOP: Aplicado únicamente a las tres coordenadas de posición.
- HDO: Aplicado a las coordenadas planimétricas.
- VDO: Aplicado a la altitud.
- TDOP: Aplicado al estado del reloj.

3.2 Fundamentos teóricos de Gravimetría

3.2.1 Teoría del potencial gravitatorio terrestre:

Según la ley de la gravitación universal, enunciada por Newton, dos masas puntuales m y m´ situadas a una distancia r una de la otra, ejercen una fuerza atractiva directamente proporcional al producto de sus masas e inversamente proporcional al cuadrado de las distancias que las separa:

$$F = G\frac{m_1 m_2}{r^2}$$

Donde G es la constante de gravitación universal, cuyo valor es 6.673 10^{-11} $m^3/Kg\ s^{-2}$ y expresa la fuerza de atracción que ejercen dos masas de 1 Kg separadas una distancia de 1 metro. Este valor fue determinado por Cavendish a principios del siglo XIX.

Analizando la fuerza F, cuyo carácter es atractivo, podemos determinar:

- Módulo: determinado según la anterior expresión.
- Dirección: la recta que une ambas masas.
- Sentido: de una masa a otra

Por otra parte, el módulo de aceleración de una masa puntual m_2 debida a la atracción de masa puntual m_1 situada a una distancia r, puede ser fácilmente obtenida dividiendo la fuerza de atracción F entre la masa m_2:

$$a = \frac{F}{m_2} = G\frac{m_1}{r^2}$$

3.2.2 Campo Gravitatorio Terrestre

El campo gravitatorio terrestre esta compuesto por el campo de fuerzas gravitacionales y por el campo de las fuerzas centrífugas. Como ambas partes son creadas por fuerzas que actúan sobre un punto fijo y su magnitud depende de la distancia a un punto, las dos tendrán magnitudes escalares asociadas: el potencial newtoniano y el potencial centrífugo.

3.2.2.1 Campo de fuerza gravitacional. Intensidad de campo y potencial gravitacional.

La ***intensidad de campo gravitacional*** es una función vectorial de punto. En el caso de un cuerpo extenso de masa M y de volumen V, constituido este último por infinitos

elementos de masa infinitesimales (dm). La fuerza con que es atraída una partícula puntual de masa m por el cuerpo extenso será:

$$\vec{F} = -Gm\int_V \frac{dm}{l^3}\vec{l}$$

Por lo tanto la expresión de la intensidad de campo será:

$$\vec{I} = \frac{\vec{F}}{m} = -G\int_V \frac{dm}{l^3}\vec{l}$$

El ***potencial gravitacional*** tiene la siguiente expresión:

$$V = G\int_V \frac{dm}{l}$$

El campo de fuerza gravitacional es conservativo, por lo que se cumplirá:

$$\vec{I} = grad(V)$$

Esta propiedad consiste, en que las derivadas del potencial respecto a las coordenadas del punto atraído son iguales a las componentes de la fuerza de atracción según los correspondientes ejes de coordenadas.

3.2.2.2 Campo de fuerza centrífugo. Intensidad de campo y potencial centrífugos.

Un cuerpo de masa unidad que rota alrededor de un eje, experimentara una fuerza denominada fuerza centrífuga, cuya ***intensidad de campo*** tiene la siguiente expresión:

$$\vec{f}_c = \varpi^2 \vec{r}_p = \varpi^2 (x\vec{i} + y\vec{j})$$

Donde ϖ^2 es la velocidad angular al cuadrado, y r_p el radio vector, que une el eje de rotación con el punto en cuestión. Al ser una magnitud vectorial se puede determinar:

- Módulo: determinado según la expresión anterior.
- Dirección: radial.
- Sentido: hacia fuera.

Por otra parte del ***potencial centrífugo***, será el trabajo realizado por la fuerza al trasladar la unidad de masa desde un punto del eje de rotación de la Tierra, al punto considerado, y tendrá como expresión:

$$\phi = \frac{1}{2}\varpi^2(x^2 + y^2) = \frac{1}{2}\varpi^2 R^2 \cos^2\varphi$$

Siendo:

-R: Radio terrestre.
- φ : Latitud.
- ϖ : Velocidad angular de la Tierra.

Analizando detenidamente la expresión anterior, podemos llegar a deducir los máximos y mínimos valores del potencial centrífugo. Será mínimo en los polos, ya que el $\cos\varphi$=0, mientras que será máximo en el ecuador ya que el $\cos\varphi$=1, por lo que la expresión del máximo valor del potencial centrífugo será:

$$\phi = \varpi^2 \frac{R^2}{2}$$

3.2.2.3 Gravedad y Potencial gravitatorio terrestres

La **gravedad terrestre** es el vector resultante, de la suma del vector intensidad de campo gravitacional y el vector intensidad de campo de las fuerzas centrífugas:

$$\vec{g} = \vec{I} + \vec{f}_c$$

El ***potencial gravitatorio terrestre*** W, es la suma de los potenciales gravitacional o newtoniano V y centrífugo ϕ:

$$W = V + \phi$$

Por tanto:

$$W = G\int_V \frac{dm}{l} + \frac{1}{2}\varpi^2(x^2 + y^2)$$

El valor de la gravedad terrestre se obtendrá como:

$$\vec{g} = grad(W)$$

3.2.3 El potencial y la gravedad normal

3.2.3.1 Superficie equipotencial

En el apartado anterior se ha expresado el valor del potencial gravitatorio terrestre como:

$$W = V + \phi$$

Considerando W definido por sus coordenadas esféricas (R,θ,λ), obtenemos la función geopotencial como:

$$\mathrm{W} = \mathrm{W}(R,\theta,\lambda)$$

Partiendo de esta expresión, se definen las superficies equipotenciales o superficies de nivel de la siguiente forma:

$$\mathrm{W}(R,\theta,\lambda) = \mathrm{cte}$$

Por tanto las superficies de equipotenciales son aquellas superficies que se caracterizan por tener un valor del potencial gravitatorio constante, este es el caso del Geoide, ya que particularizando para este caso la expresión anterior:

$$\mathrm{W}(R,\theta,\lambda) = \mathrm{cte} = \mathrm{W}_0$$

3.2.3.2 La gravedad normal

El potencial gravitatorio terrestre se puede descomponer en la suma de un potencial normal U y un potencial perturbador T :

$$\mathrm{W} = \mathrm{U} + \mathrm{T}$$

La gravedad normal en un punto es la gravedad asociada al potencial normal en dicho punto. Es la derivada direccional del potencial normal respecto a la normal a la superficie equipotencial que pasa por el punto en el que se está midiendo:

$$\gamma = \frac{dU}{dn}$$

La gravedad normal es una gravedad teórica que se calcula sobre el elipsoide de nivel. Dentro del primer orden de aproximación, la fórmula de la gravedad normal asociada a un esferoride ($U=cte=U_0$) es la siguiente:

$$\gamma = \gamma_e \left[1 + \beta \sin^2 \varphi\right] \text{ En función de la latitud}$$

O bien

$$\gamma = \gamma_e \left[1 + \beta \cos^2 \theta\right] \text{ En función de la colatitud}$$

Siendo:

$$\theta = 90º - \varphi \quad \text{; colatitud}$$

$$\beta = \frac{g_p - g_e}{g_e} \text{; aplanamiento gravimétrico, siendo}$$

g_p y g_e, la gravedad en el polo y la gravedad en el ecuador.

En segundo orden de aproximación la fórmula de la gravedad normal asociada al elipsoide es la siguiente:

$$\gamma = \gamma_e \left[1 + \beta_1 \sin^2 \varphi + \beta_2 \sin^2 2\varphi\right]$$

Somigliana llegó a una fórmula rigurosa para el cálculo de la gravedad normal sobre el elipsoide, basándose en el teorema de Stokes:

$$\gamma = \frac{a\gamma_e \cos^2 \varphi + b\gamma_p \sin^2 \varphi}{\sqrt{a^2 \cos^2 \varphi + b^2 \sin^2 \varphi}}$$

Esta es la llamada "fórmula cerrada" o Pozzetti-Somigliana, donde a es el semieje mayor del elipsoide, b el semieje menor del elipsoide, γ_e la gravedad normal en el ecuador y γ_p la gravedad normal en los polos.

3.2.4 Fórmula fundamental de la geodesia física

Tal y como se ha citado en el apartado anterior, el potencial gravitatorio terrestre se compone de la suma del Potencial Normal " U " y del Potencial Perturbador "T" por tanto su expresión es:

$$W = U + T$$

La fórmula de Bruns, relaciona la ondulación del Geoide con el potencial perturbador, a través de la gravedad normal, siendo su expresión:

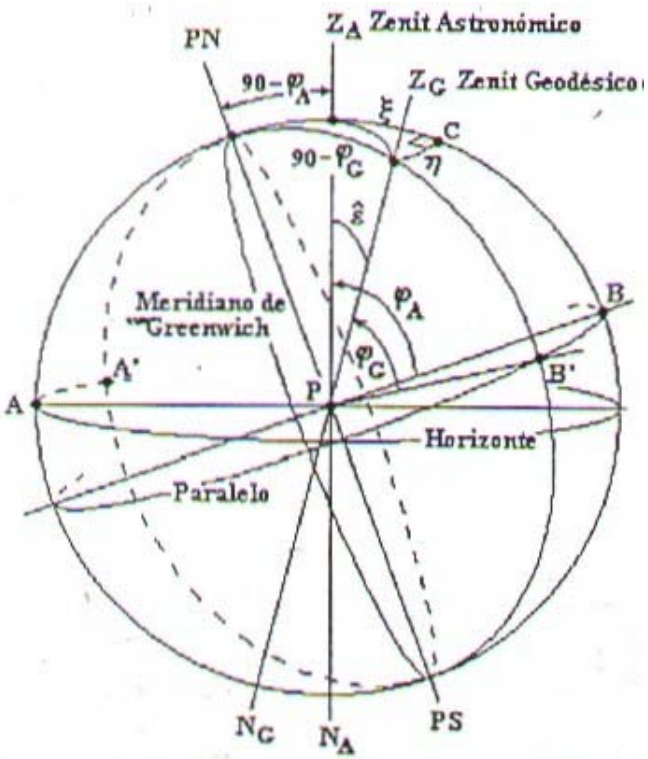
$$N = \frac{T}{\gamma}$$

La ecuación o fórmula fundamental de la Geodesia Física expresa la relación entre la anomalía y el potencial perturbador, y su expresión es la siguiente:

$$\Delta g = \frac{dT}{dN} - \frac{1}{\gamma}\left[\frac{d\gamma}{dn}\right]T$$

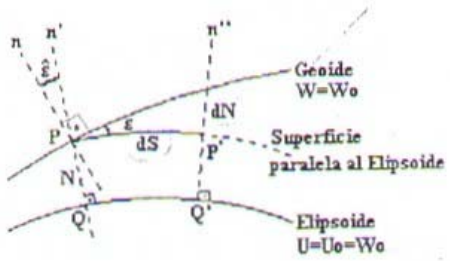
Puede considerarse como una condición de contorno, solamente en tanto que las anomalías de gravedad son conocidas sólo en la superficie de la Tierra, aunque aparentemente pueda parecer una ecuación diferencial.

3.2.5 El campo de la gravedad anómalo



3.2.5.1 Anomalía de la gravedad. Ondulación del Geoide. Desviación de la vertical.

En la figura adyacente, definimos un punto P sobre la superficie del geoide, y un punto Q sobre el elipsoide. Dicho punto Q es la proyección del punto P, sobre el elipsoide según la dirección normal a este último.



Según esta figura, podemos definir:

- ✓ Vector anomalía de la gravedad $\Delta\vec{g}$, es la diferencia entre el vector de la gravedad real en un punto situado sobre el geoide "P" y el vector de la gravedad normal en un punto del elipsoide "Q", situado en la normal al elipsoide que pasa por "P". Su expresión matemática es la siguiente:

$$\Delta\vec{g} = \vec{g}_p - \vec{\gamma}_Q$$

La anomalía de la gravedad Δg, es la diferencia entre los módulos de ambos vectores y se expresa como:

$$\Delta g = g_p - \gamma_Q$$

Las anomalías de gravedad, son por tanto, la diferencia entre la gravedad observada y la gravedad que tendría un modelo elipsoidal de la tierra. Estas diferencias se interpretan fundamentalmente, como consecuencia de un desigual reparto de la masa interna terrestre, principalmente de la corteza, dado que, en capas más profundas la masa esta distribuida de forma mas regular, no homogénea, pero sí en capas de diversas densidades.

- ✓ Ondulación del geoide "N", o también definido como la "altitud del geoide sobre el elipsoide", es la distancia entre P y Q, medida sobre la normal al elipsoide. Este valor puede ser conocido a partir de las anomalías de la gravedad.

- ✓ Desviación de la vertical ε, es la diferencia entre las direcciones de las normales al geoide y al elipsoide en el punto P; es decir es el ángulo que se desvía la normal al geoide "n" respecto a la normal al elipsoide "n´" en ese punto, y sus dos componentes NS y EW nos determinan la orientación del geoide respecto al elipsoide en el punto P. Puede ser un factor conocido geométricamente y a partir de anomalías de la gravedad.

3.2.6 Variaciones en el valor de la gravedad

El campo gravitatorio terrestre, no permanece constante en el tiempo, ya que la cambiante distribución interna de la masa terrestre, debida a la multitud de procesos geológicos internos y externos, influye en la variación del mismo.
A su vez las posiciones relativas de la Tierra, la Luna, el Sol y otros cuerpos celestes, también influyen en dicho campo gravitatorio.

Las variaciones que pueden afectar al valor de la gravedad, se pueden dividir en:

a) Variaciones periódicas: relacionadas con la rotación de la Tierra alrededor de su eje y las posiciones entre la Tierra, Sol y Luna, que se repiten periódicamente.

b) Variaciones no periódicas: dependen de procesos geológicos y geofísicos que se producen en la Tierra, y que no guardan una cadencia temporal fija.

El conocimiento de la magnitud de las variaciones no periódicas, implica la necesidad de basarse en hipótesis teóricas y en observaciones indirectas en el tiempo, poniendo como ejemplo, el movimiento tectónico de placas que provoca cambios en la altitud en diversos puntos de la superficie terrestre del orden de cm/año.

El moderno y sofisticado instrumental con el que se realiza actualmente las mediciones de gravedad, detecta los incrementos de dicha gravedad que se producen por las variaciones de altitud mencionadas anteriormente, cuya magnitud es de aproximadamente 0,2 mGal por metro en altitud.

Los grandes desplazamientos de masa que, lentamente se producen en el interior de la Tierra a lo largo del tiempo, pueden ser capaces de provocar apreciables variaciones de la intensidad de la gravedad.

Además pueden influir en el valor de la gravedad las siguientes variaciones:

- Variaciones de latitud: en el siglo XVII, Richter dedujo sin explicación alguna, cómo la gravedad variaba según el punto de la Tierra en el que nos encontrásemos. Posteriormente, Newton y Huygens, explican este fenómeno, anunciando que se debía a la falta de esfericidad de la Tierra. Tal y como se ha enunciado anteriormente, la gravedad consta de dos componentes: la fuerza de atracción terrestre y la fuerza centrífuga. Esta última depende de la distancia existente entre el eje de rotación y el punto de la superficie, por lo que será máxima en los puntos del Ecuador e irá disminuyendo hasta ser nula en los polos terrestres. Éste es uno de los motivos (otro es que el radio terrestre es menor en los polos) por el que la gravedad es máxima en los polos (≈ 983 gales) y mímima en puntos del Ecuador (≈ 978 gales).

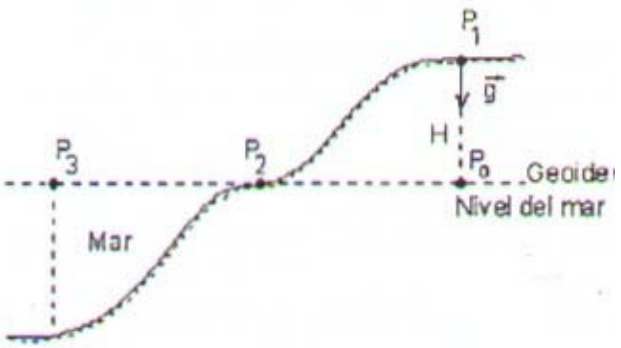
- Variaciones por altitud del punto de observación: El valor observado o medido con el gravímetro ha de ser reducido al Geoide, aplicando las correcciones correspondientes, ya que la altitud es uno de los factores que influyen en la variación del valor de la gravedad.

- Variaciones temporales (periódicas): son aquellas variaciones cuyo factor determinante es el tiempo, como por ejemplo la variación producida por marea: las influencias gravitatorias del Sol y de la Luna, producen el denominado "efecto marea" que depende de las posiciones astronómicas de ambos y de la latitud, siendo variable con el tiempo, estas fuerzas producen una pequeña deformación en la superficie marina. Este fenómeno influye también sobre los gravímetros y da lugar al efecto luni-solar o de las mareas, siendo su amplitud máxima del orden de 0,3 miligales.

3.2.7 Reducción de los valores observados de la gravedad

3.2.7.1 Finalidad de las reducciones

La gravedad es un valor observado sobre la superficie de la Tierra. Antiguamente, se deducía mediante la utilización de un péndulo, y actualmente, se utilizan gravímetros que nos dan incrementos de gravedad. Si tenemos tres puntos situados a la misma latitud, según la siguiente figura, y comparamos los valores de la gravedad en los mismos, veremos que la gravedad en P1 es menor que la gravedad en P2 y a su vez, mayor que la gravedad en P3, dado que la densidad del agua situada bajo P3, es menor que la de la tierra situada bajo P2:



Vemos que la gravedad variará dependiendo de la altitud del punto, de la profundidad del océano, etc.. es decir, los valores directamente observados no son comparables con la gravedad normal. Para poder utilizar los valores de la gravedad en las fórmulas, hemos de reducir estos valores observados al Geoide. De esta manera, podemos calcular las anomalías sobre el Geoide, en base a las cuales se pueden deducir gran cantidad de parámetros, también útiles para deducir la distribución de densidades o irregularidades de masa de la corteza terrestre causantes de "anomalías" en los valores de gravedad.

Las reducciones de los valores observados de la gravedad, se realizan para obtener valores referidos al nivel medio del mar, es decir, al Geoide. Los fines a los que estas medidas van a ser usadas pueden ser tanto geodésicos como geofísicos.

Las reducciones a aplicar se pueden clasificar atendiendo al siguiente esquema:

1) Reducciones no isostáticas
   a. Reducción de aire libre o Faye
   b. Reducción de Bouguer
      i. Corrección por lámina Bouguer o corrección de meseta
      ii. Corrección topográfica.
2) Reducciones isostáticas
   a. Modelo isostático de Pratt-Hayford
   b. Modelo isostático de Airy-Heiskanen
   c. Compensación Regional de Vening Meinesz

3.2.7.2 Reducciones no isostáticas

a. *Reducción aire libre o Faye*

Esta corrección tiene la denominación de "Aire Libre" debido a que sólo tiene en cuenta la altura de la estación, pero no las masas que hay interpuestas entre el Geoide y el nivel de la estación.

La gravedad en un punto de la corteza terrestre responde a la siguiente expresión:

$$g = G\frac{M}{(R+H)^2}$$

Siendo R el radio terrestre y H la altitud ortométrica, o altitud sobre el Geoide. Sin embargo si calculamos el valor de la gravedad en ese punto, pero sobre el Geoide la expresión será la siguiente:

$$g_0 = G\frac{M}{R^2}$$

Si comparamos ambas expresiones, observamos como la segunda fórmula, se trata de la primera particularizada para el caso H=0.

Por tanto la corrección Faye δ_f, consistirá en restar: $\delta_f = g_o - g$ *(exp.1)*

De forma que para obtener el valor de la gravedad: $g = g_{observada} + \delta_f$

Como $R \rangle\rangle\rangle H$, desarrollamos la expresión de g mediante el desarrollo del binomio de Newton obteniendo la siguiente expresión:

$$g = G\frac{M}{R^2\left[1+\frac{H}{R}\right]^2} = \frac{GM}{R^2}\left[1+\frac{H}{R}\right]^{-2} = \frac{GM}{R^2}\left[1-2\frac{H}{R}+3\frac{H^2}{R^2}\ldots\right] = g_o\left[1-\frac{2H}{R}+\frac{3H^2}{R^2}\right]$$

Aplicando (exp.1):

$$g_o - g = \frac{2g_o}{R}\left[1 - \frac{3h}{2R}\right]H = \delta_f$$

Considerando que:

$$\frac{GM}{R^2} = g_o = g_{media}$$

Llegamos a la siguiente expresión:

$$\delta_f = 2\frac{g_{media}}{R}H$$

En la práctica se utiliza la siguiente expresión, para el cálculo de la corrección:

$$\delta_f = 0.3086H$$

La corrección de Aire Libre o Faye será positiva para puntos que estén situados por encima del Geoide y será negativa para puntos que estén situados por debajo de la superficie de éste.

Se denomina *gravedad reducida de Faye o gravedad Faye* a la gravedad observada a la que sólo se le ha aplicado la corrección Aire Libre o Faye. Su expresión será por tanto la siguiente:

$$g_F = g_{obs} + \delta_f = g_{obs} + 0.3086H$$

En consecuencia la expresión de la *anomalía de Aire Libre o Faye* será:

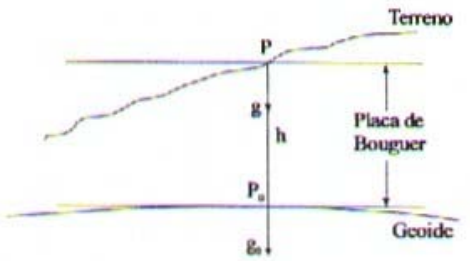
$$\Delta F = g_F - \gamma = g_{obs} + \delta_f - \gamma = g_{obs} + 0.3086H - \gamma$$

b. Reducción Bouguer:

El objeto de la reducción de Bouguer, es eliminar completamente el efecto producido por las masas exteriores al Geoide. En este caso se acepta que la estación donde se

realiza la lectura, descansa sobre una "placa infinita" o "meseta plana e indefinida", de densidad constante y de un espesor igual a la altitud ortométrica H de la estación.

Por tanto para calcular la corrección por lámina de Bouguer o corrección de meseta procedemos de la siguiente forma:



Consideramos la lámina de Bouguer como un cilindro macizo de densidad constante ρ, igual a la densidad media de la corteza terrestre $\approx 2{,}67 \frac{gr}{cm^3}$, con un radio interior nulo y radio exterior infinito. Por tanto calculamos la componente vertical de la atracción en P de la masa correspondiente a la meseta, de la siguiente forma:

$\delta_{BouguerSimple} = 2\pi G\rho H$ Siendo: G: la constante de gravitación universal

$$\rho : 2{,}67 \frac{gr}{cm^3}$$

Según la expresión anterior, y aplicando los valores de las constantes, la *corrección por meseta o lámina de Bouguer* simple en la práctica se reduce a la siguiente expresión:

$$\delta_{BouguerSimple} = 0.1119H(mGal)$$

La corrección por meseta es negativa, para puntos situados por encima del Geoide, debido a que se debe contrarrestar el efecto de atracción de la meseta generada.

La *gravedad reducida Bouguer simple*, tiene la siguiente expresión:

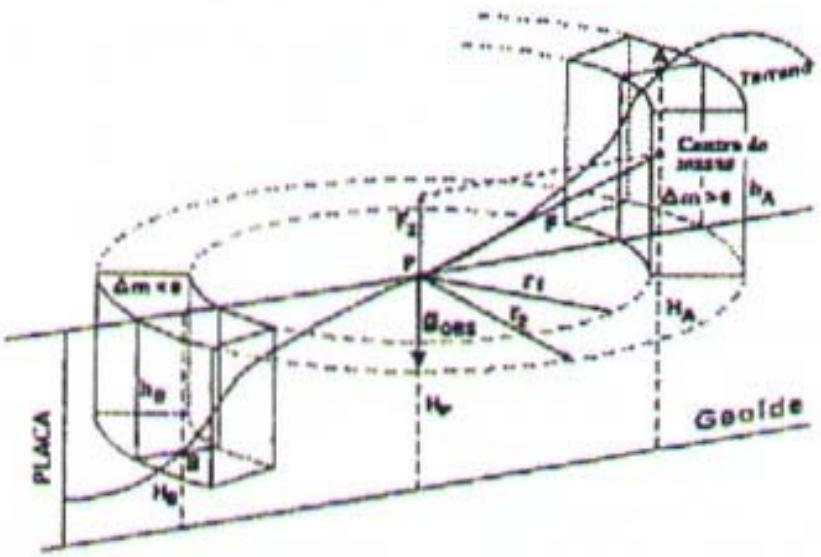
$$g_{BouguerSimple} = g_{obs} + \delta_F - \delta_B = g_{obs} + (0.3086 - 0.119)H = g_{obs} + 0.1967H$$

A su vez, la expresión de la *anomalía de la gravedad Bouguer simple*, será:

$$\Delta g_{BouguerSimple} = (g_{obs} + 0.1967H) - \gamma$$

c. Corrección Topográfica

Hay que tener en cuenta los excesos o defectos de masa por encima o por debajo del nivel de la estación. Para realizarlo, en la práctica, hay que elegir algún modelo de subdivisión del terreno alrededor de la estación, que nos permita discretizar el terreno. El más común es el de "zonas circulares":



Este modelo de subdivisión, esta formado por anillos concéntricos en el punto de estación (P). Dentro de cada zona, habrá un número de compartimentos. Se tendrá que conocer la altitud media en cada uno de los compartimentos, mediante mapas topográficos adecuados, o mediante una nivelación precisa del terreno.

Por tanto se definen una serie de sectores cilíndricos de diversa altura con centro en el eje definido por el punto de estación. Las atracciones verticales de estas masas sobre el mencionado punto nos darán el valor de la corrección buscada.

En la figura anterior podemos ver como:

En el punto A; el incremento de masa es positivo $\Delta m > 0$
En el punto B; el incremento de masa es negativo $\Delta m < 0$, ya que en realidad en dicho compartimento no existe masa.

En ambos casos la corrección en positiva, debido a que la corrección es equivalente a la componente vertical de la atracción entre masas:

En el punto A, la masa existe, por lo que la gravedad observada será menor que si elimino la masa, por tanto, la corrección ha de ser positiva.

En el punto B, quito la masa que no existe y que habrá que rellenar, por tanto la corrección debe ser también positiva.

Si observamos la figura anterior, esta corrección se realiza mediante bloques a los que se asigna una cierta altitud. Esto supone que estamos añadiendo o restando masas que, en realidad no existen. Se tendrán que eliminar las masas que estén por encima de la estación y rellenar las que estén por debajo, ya que en realidad no existen y se han

eliminado. Por tanto la corrección debe ser siempre positiva, como se ha justificado antes, y de nuevo se puede aclarar de la siguiente forma:

Masas por encima del nivel de la estación: debemos tener en cuenta la componente vertical de la fuerza de atracción que dicha masa ejerce sobre P. Esta fuerza es contraría a la dirección de la gravedad, y actúa disminuyendo el valor de ésta en el momento que realizamos la medida, por tanto hemos de contrarrestar esta pérdida de gravedad, sumando al valor de g_{obs} el valor del módulo de dicha componente vertical F_z.

Masas por debajo del nivel de la estación: en este caso al aplicar la corrección de Bouguer, dábamos por supuesto que dicha zona estaba rellena de materia, y para compensarlo debemos sumarle el efecto que produciría sobre el valor de la gravedad una masa del mismo volumen y en la misma posición que la zona vacía. Para ello debemos sumar la componente vertical que dicha fuerza atractiva provocaría en la estación P.

Por tanto, finalmente se obtendrá la expresión de la *gravedad de Bouguer Completa* que será:

$$g_{BouguerCompleta} = g_{Observada} + \delta_F - \delta_{BoueguerSimple} + \delta_{Topográfica}$$

En consecuencia, la expresión de la *anomalía de Bouguer* completa es:

$$\Delta_{BouguerCompuesta} = g_{BougeurCompuesta} - \gamma = g_{observada} + \delta_F - \delta_{BouguerSimple} + \delta_{Topográfica} - \gamma$$

3.2.7.3 Reducciones Isostáticas

Isostasia significa equilibrio, en el sentido hidrostático de la corteza terrestre con respecto al sustrato sobre el que descansa y que se considera un líquido. Éste término se debe a Dutton (1889). Este concepto supone que todos los excesos o defectos de masa por encima o por debajo del nivel del geoide están compensados de tal forma que, a una cierta profundidad, el material terrestre se encuentra en equilibrio isostáticamente.

Si una corrección estuviese hecha, las anomalías deberían ser próximas a cero. Sin embargo puede suceder que:

$\Delta g = 0$ en altitudes cercanas a cero (puntos próximos al geoide)
$\Delta g > 0$ por debajo del nivel del mar
$\Delta g < 0$ por encima del nivel del mar

Además:

Una anomalía Bouguer positiva, indica exceso de masa
Una anomalía Bouguer negativa, indica defecto de masa

Las reducciones isostáticas son las correcciones que se van a aplicar a los valores observados de la gravedad para regularizar la corteza, dándole una densidad media $\rho : 2{,}67 \frac{gr}{cm^3}$. El tipo de reducción dependerá del modelo isostático utilizado.

Las masas topográficas no son completamente eliminadas, como en la reducción de Bouguer, sino que son llevadas al interior del Geoide para rellenar deficiencias de masas que existen debajo de los continentes.

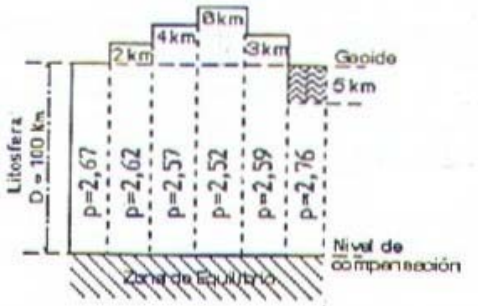
En el modelo isostático de Pratt-Hayford las masas topográficas son distribuidas entre el nivel de compensación y el nivel del mar, para traer la densidad de su corteza de un valor original al valor estándar constante $\rho : 2{,}67 \frac{gr}{cm^3}$.

En el modelo isostático de Airy-Heiskanen, las masas topográficas se usan para llenar las raíces de los continentes trayendo la densidad de los continentes de $\rho : 2{,}67 \frac{gr}{cm^3}$ a $\rho_1 : 3{,}27 \frac{gr}{cm^3}$. Siendo este modelo isostático el que mas se ajusta al modelo de corteza dado por la Sismología.

a. Sistema isostático de Pratt-Hayford

Este sistema isostático fue creado por Pratt y puesto en forma matemática por J.F.Hayford, quién lo utilizó sistemáticamente para fines geodésicos. La compensación es de tipo local y se tienen en cuente columnas verticales. El problema se puede plantear en términos de igualdad de masas o igualdad de presiones. Para la explicación teórica, es suficiente con la igualdad de masas.

El esquema gráfico de este sistema es el siguiente:

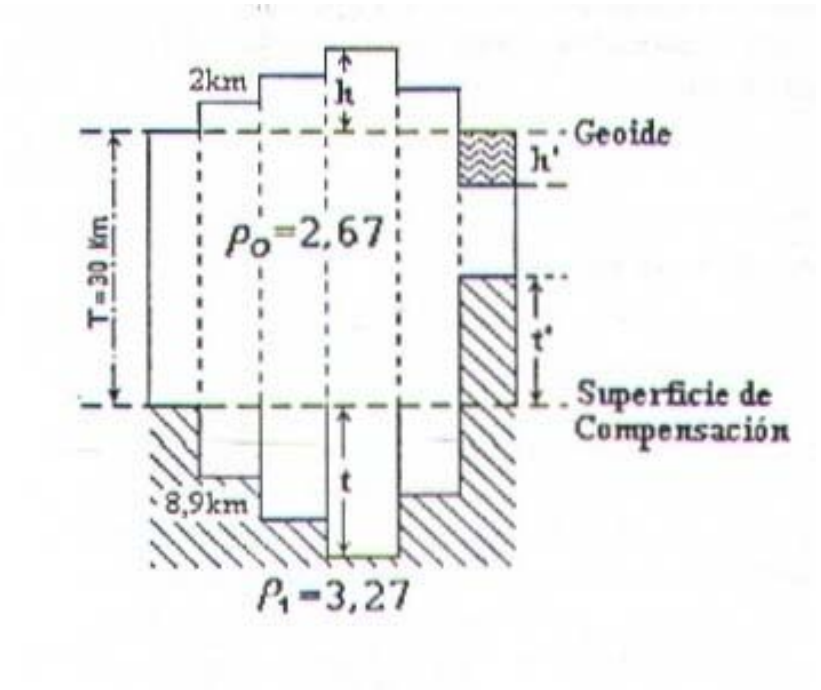


Pratt supuso que la corteza terrestre debajo del Himalaya debía tener menor densidad que en las depresiones del río Ganges. Así las montañas habrían surgido del subsuelo al igual que una masa de pan en fermentación.

b. Sistema isostático de Airy-Heiskanen

Airy propuso este modelo y Heiskanen le dio una formulación precisa para fines geodésicos, y lo aplico sucesivamente. La compensación también es de tipo local, por columnas verticales. El problema se plantea también en igualdad de masas.

El esquema gráfico de este sistema es el siguiente:



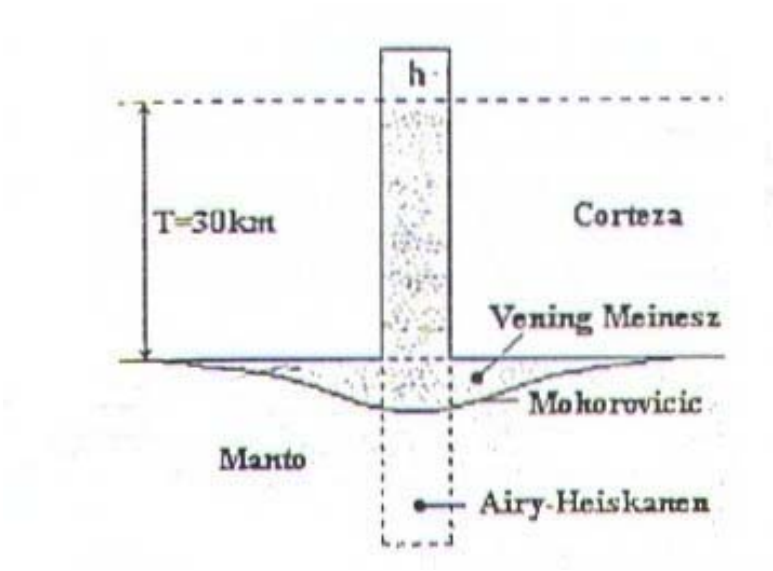
En este modelo, se propone una corteza cuya densidad es constante, mientras que varía su espesor y sus bloques flotan sobre el sustrato como lo hace el hielo sobre el agua.

c. Compensación regional de Vening Meinesz

Es una modificación del sistema isostático de Airy-Heiskanen. Las dos compensaciones anteriores son locales, en cambio esta tiene un carácter regional.

Vening Meinesz supone que la corteza descansa sobre una superficie inferior cuyo comportamiento es de tipo elástico. La superficie de discontinuidad que separa la corteza y el manto (Discontinuidad de Mohorovic) se comporta como una membrana elástica, con lo cual la deformación producida para compensar un exceso de masa h no queda localizada en forma prismática justo debajo de dicho exceso, como supone el modelo de Airy-Heiskanen, sino repartida sobre dicha superficie.

En la práctica, este modelo apenas se ha utilizado para el cálculo de compensaciones isostáticas. Su esquema gráfico es el siguiente:



d. Efecto indirecto

Al realizar las reducciones de los valores de la gravedad observados, hemos supuesto que las masas que estaban por encima del Geoide eran eliminadas por la corrección de Bouguer. El cambio de masas producirá un efecto en el valor del potencial gravitatorio que genera el cuerpo de la Tierra.

Ahora la superficie de referencia que buscamos no será el Geoide, sino una muy próxima a él, denominada "Cogeoide". Este cambio de superficie de referencia es un efecto indirecto de las reducciones de la gravedad. Cada reducción de la gravedad, tendrá su efecto indirecto.

Con las anomalías Bouguer, el efecto indirecto es muy grande. En las isostáticas es menor porque la masa apenas varía. A falta de anomalías isostáticas se pueden utilizar las de Faye o Aire Libre.

3.2.8 Medidas de la gravedad

Las medidas de la gravedad se realizan, para conocer como está distribuido el campo gravitatorio terrestre. Se denomina como unidad gravimétrica u.d. a la décima de miligal. Es una unidad de uso frecuente en la prospección gravimétrica.

Los distintos métodos de medida de la gravedad se pueden clasificar según el método empleado en:

A. *Métodos dinámicos*: Son aquellos en los que se observa el movimiento de un cuerpo bajo la acción de la gravedad, midiéndose el tiempo empleado por éste para pasar de una posición a otra.

B. *Métodos estáticos*: Son aquellos en los que se observa el cambio en la posición de equilibrio de un cuerpo sometido a la acción de la gravedad y a otra fuerza antagonista que equilibra ésta, generalmente ejercida por un elemento elástico. El cambio en la posición de equilibrio se traduce en un deslizamiento, siendo ésta una cantidad medible, lineal o angular del cuerpo. Se utiliza para medidas relativas.

Por otra parte se pueden clasificar las medidas realizadas, en dos grupos:

A. *Medidas absolutas*: Se obtiene como resultado el valor de la gravedad en el punto de observación. Por tanto, el instrumento a utilizar, ha de proporcionar el valor de la gravedad en un punto independientemente del valor de la gravedad en cualquier otro punto. Este tipo de mediciones son las más laboriosas y delicadas.

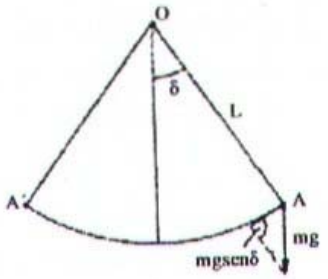
B. *Medidas relativas*: Se obtiene como resultado, la diferencia de gravedad entro dos puntos. Con estas medidas no se obtiene directamente el valor de la gravedad en el punto de observación. Realizando medidas relativas en distintos puntos, se obtienen las diferencias de gravedad entre ellos. Se utilizan por tanto, para enlace con puntos base, en los que se conoce la gravedad absoluta, de forma que calculando incrementos de gravedad, se calculan los valores de la gravedad en cada punto. Estas observaciones se realizan de forma más rápida y sencilla, que las observaciones absolutas.

3.2.8.1 Medidas absolutas

Las medidas absolutas se pueden clasificar en dos grandes grupos, según sus fundamentos teóricos:

1. **Medidas pendulares**: Se basan en la observación del periodo de un péndulo, es decir el tiempo empleado en una oscilación completa de un péndulo de longitud conocida, dentro del campo gravitatorio.

   1.1. ***Péndulo matemático simple***:



Esta formado por una pequeña masa suspendida de un hilo inextensible, teóricamente sin masa, perfectamente flexible, que oscila alrededor de un eje horizontal que pasa por el punto de suspensión O. Consideramos un péndulo matemático simple, como en de la figura anterior, de longitud L, oscilando con una pequeña amplitud y su periodo viene definido por la siguiente expresión:

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{L}{g}}$$

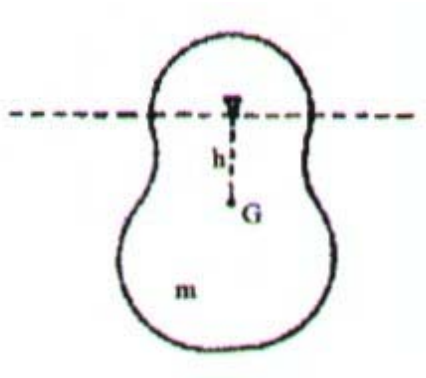
Y la aceleración de la gravedad será:

$$g = 4\pi^2 \frac{L}{T^2}$$

Por tanto conocida la longitud del hilo L, y el periodo de oscilación T, se determina el valor de la gravedad.

1.2 Péndulo físico

Un péndulo físico esta constituido por un sólido-rígido oscilando libremente alrededor de un eje horizontal, debido a la acción de la gravedad.



En este caso, su periodo de oscilación viene determinado por la siguiente expresión:

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{I_C}{mgh}}$$

Por tanto despejando de la ecuación anterior, el valor de la gravedad se obtiene de la siguiente forma:

$$g = \frac{4\pi^2 I_C}{T^2 mh}$$

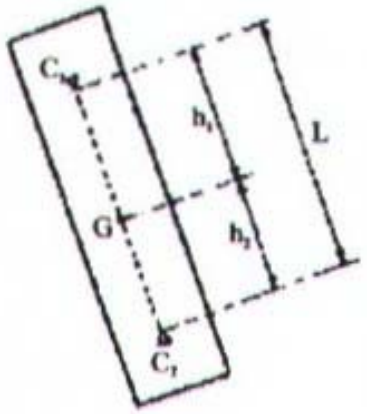
Así se determina el valor de la gravedad, donde I_C es el momento de inercia del péndulo respecto al eje de giro c, m su masa y h la distancia del centro de giro al centro de la masa.

1.3 *Principio de reversibilidad del péndulo físico*

Todo péndulo es reversible respecto a dos ejes horizontales separados una distancia L.

Como Ic y h no pueden medirse fácilmente, se recurre al llamado péndulo reversible o de Kater, tal que, haciéndose oscilar desde dos puntos (C y C´) el periodo sea el mismo. La longitud L del péndulo simple equivale con idéntico periodo se obtiene con la expresión:

$$L_e = \frac{I_c}{mh}$$



Por lo que el periodo será:

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{L}{g}}$$

Con lo que el valor de la gravedad:

$$g = \frac{4\pi^2 L}{T^2}$$

2. Medidas basadas en el movimiento libre de graves

Aunque la medida del tiempo de la caída libre de un cuerpo fue el primer método de determinar g, la precisión era pobre por la dificultad en la medida de pequeños intervalos de tiempo.

El método se ha vuelto a utilizar como resultado de las mejoras instrumentales y la construcción de instalaciones de caída libre. Ha acabado sustituyendo al método pendular, para las medidas absolutas.

Los métodos de medida basados en el movimiento libre de graves se pueden clasificar en:

2.1 Caída libre

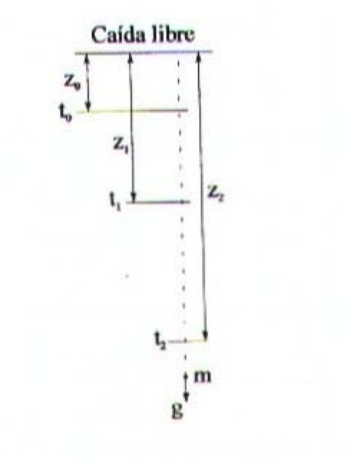
Este método consiste en dejar caer una partícula con respecto a una posición original y se miden los tiempos empleados y las distancias recorridas por el cuerpo respecto a un instante de referencia. La partícula describirá un movimiento unifórmenle acelerado cuyas incógnitas serán: el espacio inicial Z_0, la velocidad inicial v_0 y el valor de la gravedad g. Por tanto como mínimo se deben realizar tres observaciones, para resolver las incógnitas anteriores.

Las ecuaciones a plantear son:

$$z_1 = z_0 + v_0 t_1 + \frac{1}{2} g t_1^2$$

$$z_2 = z_0 + v_0 t_2 + \frac{1}{2} g t_2^2$$

$$z_3 = z_0 + v_0 t_3 + \frac{1}{2} g t_3^2$$

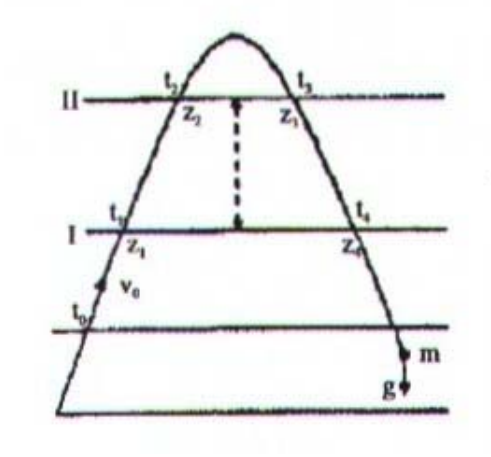


Desarrollando el sistema, obtenemos el valor de la gravedad, según la siguiente expresión:

$$g = \frac{2[(z_1 - z_2)(t_1 - t_3) - (z_1 - z_3)(t_1 - t_3)]}{(t_1 - t_2)(t_1 - t_3)(t_2 - t_3)}$$

2.2 Caída simétrica, elevación y caída

Este método consiste en el lanzamiento vertical de un objeto en un recipiente en el que se ha realizado el vacío y la medida del tiempo que tarda en pasar por dos marcas cuya distancia se conoce, tanto en su camino ascendente como descendente como se muestra en el siguiente gráfico:



Si dichas marcas están a z1 y z2 de un origen arbitrario, los tiempos de pasada por cada una de ellas son t1 y t2 en la trayectoria de ascenso, y t3 y t4 en la

trayectoria de descenso, siendo por tanto el recorrido en cada caso expresado por las siguientes ecuaciones:

$$z_1 = z_0 + v_0 t_1 - \frac{1}{2} g t_1^2$$
$$z_2 = z_0 + v_0 t_2 - \frac{1}{2} g t_2^2$$
$$z_3 = z_0 + v_0 t_3 - \frac{1}{2} g t_3^2$$
$$z_4 = z_0 + v_0 t_4 - \frac{1}{2} g t_4^2$$

Resolviendo el sistema anterior, obtenemos el valor de la gravedad como:

$$g = \frac{8H}{T_2^2 - T_1^2}$$

Siendo:

$$T_2 = t_4 - t_1$$
$$T_1 = t_3 - t_2$$
$$H = z_2 - z_1$$

3.2.8.2 Medidas relativas

Este tipo de medidas, como se ha mencionado anteriormente, son más económicas y rápidas que las medidas absolutas. Pueden llevarse acabo mediante tres tipos de instrumentos: péndulos, balanza de torsión y gravímetros. Los dos primeros has quedado ya obsoletos y sin duda el más utilizado actualmente es el gravímetro.

1. Métodos pendulares (Método dinámico)

Las medidas realizadas con métodos pendulares son mucho menos precisas que las medidas absolutas.

En este caso los péndulos son móviles, y se determina el periodo de oscilación de un péndulo (T_1), en un punto de valor conocido de la fuerza de la gravedad (g_1), y posteriormente el periodo de oscilación (T_2) en un punto de valor desconocido de la fuerza de la gravedad (g_2).

Tal y como se ha expresado anteriormente, la fórmula del periodo es:

$$T = \pi \sqrt{\frac{L}{g}}$$

Por tanto, comparando ambas situaciones, se llega a la siguiente expresión:

$$g_2 - g_1 = \Delta g = -2g_1 \frac{\Delta T}{T_1} + 3g_2 \frac{\Delta T^2}{T_1^2}$$

2. Balanza de Torsión (Método estático)

Este método consiste en la utilización de dos pesos iguales, situados y unidos mediante un eje rígido, que a su vez esta suspendido de un hilo de torsión.

Con la balanza de torsión se mide el gradiente y la curvatura del campo gravitacional, y a partir de dichos valores, se puede obtener el valor de la gravedad mediante integración.

Existen dos tipos de balanzas:

a) *Balanza de Cavendish*: Consiste en una balanza con pesos situados a la misma altura (balanza de primera especie), y fue utilizada para determinar la constante de gravitación universal.

b) *Balanza de Eötvös*: Utilizada para medir las segundas derivadas del potencial gravitacional, mediante pesos situados a distinta altura (balanza de segunda especie).

3. Gravímetros

Un gravímetro, en general, es un sistema elástico que se deforma bajo la acción de la fuerza de la gravedad. El resultado de la medición con un gravímetro, es una lectura expresada en divisiones de la escala que utilice el instrumento. El valor de la gravedad estará relacionado con la lectura según una función que deberíamos conocer, y que proporciona el fabricante del gravímetro.

El calibrado del instrumento, consiste en determinar dicha función, que se denomina función de calibrado. Los gravímetros estáticos son los instrumentos que actualmente, se utilizan para determinar las pequeñas variaciones de la gravedad.

Los gravímetros tienen como ventaja, ser aparatos relativamente ligeros y portátiles, de forma que han sustituido a los métodos pendulares, mucho más aparatosos. A su vez permiten determinar los incrementos de la fuerza de la gravedad con gran exactitud, llegando a los 0.01 mGal de precisión nominal. También cabe destacar como ventaja, el rendimiento que ofrecen, ya que se tarda entre tres y cinco minutos, en realizar una medición.

Sin embargo presentan una deriva del punto cero, como consecuencia de la variación continua del material elástico con que están construidos (histéresis).

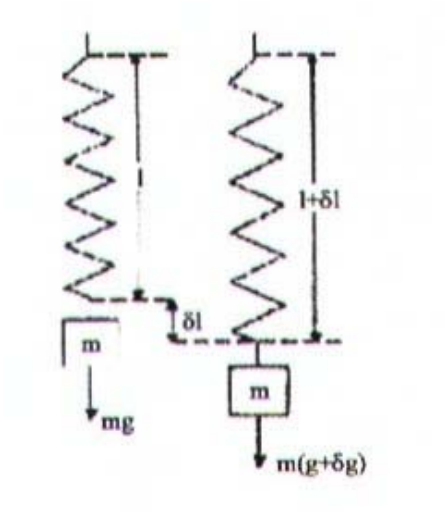
Todos los gravímetros estáticos son balanzas de muelle de alta precisión, en las que se mide un mismo peso de masa constante la medida de la variación de la fuerza de la

gravedad es la magnitud de la deformación del elemento elástico. Según el sistema de esta deformación los gravímetros pueden dividirse en dos grandes grupos: lineales (o no astáticos) y no lineales (o astáticos).

3.1 Gravímetros lineales o no astáticos

También son denominados balanzas de resorte vertical. Están en desuso, y se basan en el mismo principio que los sismómetros de componente vertical.

La sensibilidad del muelle es proporcional a la magnitud de la deformación del mismo, que siempre será extremadamente pequeña , y que es medida de forma directa por medio de una amplificación óptica, mecánica o eléctrica.



El esquema del instrumento se corresponde con la figura adyacente, en el que se suspende una masa de un muelle y por efecto de la gravedad se produce una elongación del mismo, de forma que:

$$k(l - l_0) = mg$$

Siendo:

l_0 : longitud inicial del muelle.
l : longitud final del melle.
K : constante del muelle.

Como la masa m es constante, pequeñas variaciones de la gravedad se traducen en incrementos del l:

$$m\Delta g = K\Delta l$$

Apreciando Δl podemos determinar Δg. El problema reside en la pequeña magnitud de Δl, por lo su apreciación es difícil.

La sensibilidad del sistema, vendrá definida como:

$$\frac{dl}{dg} = \frac{m}{K}$$

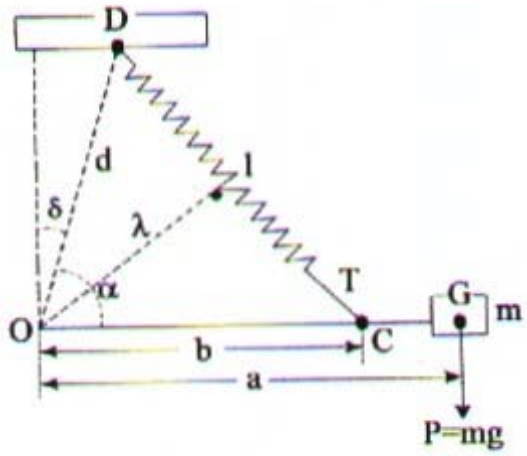
Según esta expresión, para aumentar la sensibilidad, o se aumenta m o se disminuye K. Ambas posibilidades presentan problemas de ejecución, debido a esto y a que este tipo de gravímetros son muy sensibles a las condiciones ambientales de presión, temperatura e influencias magnéticas, son instrumentos de poca utilización.

3.2 Gravímetros no lineales o astáticos

Los gravímetros no lineales constan de una masa *m* suspendida inestablemente de un muelle o sistema de muelles, tal que para un determinado valor de g, la masa se encuentra en posición de equilibrio. Desde esa posición, basta un pequeño cambio en el valor de la gravedad, para que se traduzca en desplazamientos relativamente grandes del muelle que suspende la masa.

El gravímetro utilizado para la realización de este proyecto, es un gravímetro de este tipo y esta basado en el sismógrafo de largo periodo ideado por LaCoste en 1934. Este gravímetro fue el primero en emplear un muelle de longitud cero, esto es, un muelle cuya longitud total es proporcional a la tensión ejercida sobre él, de forma que si se retiran todas las fuerzas, su longitud será nula. Físicamente un muelle perfecto de longitud nula no puede construirse, aunque sí se puede aproximar lo suficiente.

El esquema de funcionamiento de este tipo de gravímetros es el siguiente:



Considerando el concepto de muelle de longitud cero, la tensión ejercida en el mismo será:

$T = Kl$ Siendo K la constante elástica del muelle

Pero como el muelle no es perfecto, sufre deformaciones, entonces la tensión ejercida se expresa como:

$$T = K(l - l_0)$$

Para que en cualquier posición el muelle este en equilibrio, tomando momentos con respecto al origen, según el gráfico anterior, se obtiene la siguiente expresión:

El momento recuperador será:

$$M_r = M_r(\alpha) \Rightarrow M_r = \lambda T$$

Mientras que el momento producido por las fuerzas gravitatorias será:

$$M_g = M_g(g,\alpha) \Rightarrow M_g = amg\sin(\alpha)$$

Siendo por tanto, el momento resultante:

$$|M_{RES}| = |M_g| - |M_r| = amg\sin(\alpha+\delta) - \lambda T$$

Pero teniendo en cuenta que λ se puede expresar en función del área del triángulo, se obtiene que:

$$\frac{1}{2}l\lambda = \frac{1}{2}bd\sin(\alpha) \Rightarrow \lambda = \frac{bd}{l}\sin(\alpha)$$

De esta forma el momento resultante, quedaría como:

$$|M_{RES}| = amg\sin(\alpha+\delta) - \left(\frac{bd}{l}\sin(\alpha)K(l-l_0)\right)$$

Dicha expresión, cuando el sistema se encuentra en equilibrio se puede igualar a cero, de manera que:

$$amg\sin(\alpha+\delta) - \left(\frac{bd}{l}\sin(\alpha)K(l-l_0)\right) = 0$$

En cuanto a la sensibilidad de un gravímetro astático, es el factor que relaciona el incremento de gravedad con la longitud del muelle utilizado para contrarrestar la fuerza de la gravedad:

$$Sensibilidad = \frac{d\alpha}{dg}$$

Para calcular el valor de la sensibilidad, se tiene que derivar la expresión de la Ecuación de Equilibrio, obteniendo:

$$am\sin(\alpha+\delta)dg + amg\cos(\alpha+\delta)d\alpha - (bdK\cos(\alpha)d\alpha) = 0$$

Despejando de la Ecuación de Equilibrio, los términos bdK, se obtiene:

$$bdK = \frac{amg\sin(\alpha+\delta)}{\sin(\alpha)}$$

Con lo que la expresión de la sensibilidad, se expresa de la siguiente forma:

$$\frac{d\alpha}{dg} = \frac{am\sin(\alpha+\delta)}{\frac{amg\sin(\alpha+\delta)}{\sin(\alpha)} - (amg\cos(\alpha+\beta))}$$

$$\frac{d\alpha}{dg} = \frac{am\sin(\alpha+\delta)}{amg(\cos(\alpha)\sin(\alpha+\delta) - \sin(\alpha)\cos(\alpha+\delta))}$$

$$\frac{d\alpha}{dg} = \frac{\sin(\alpha+\delta)\sin(\alpha)}{g\sin(\delta)}$$

Por tanto, la sensibilidad del gravímetro, queda definida por la configuración des sistema, es decir por los ángulos que se forman, por una parte el ángulo δ, propio de la construcción del sistema, y por otra parte el ángulo α, que depende de la posición de equilibrio en cada caso.

El valor del ángulo δ debe ser siempre muy pequeño, para que la sensibilidad sea mayor. Cuando la sensibilidad es infinita, el periodo también lo es, y se dice que se ha conseguido la astatización perfecta o equilibrio indiferente.

Si $\delta = 0$ entonces $amg - Kbd = 0$

Denominando a la anterior expresión, como la *Condición de Astatización*

Se entiende por astatización de un sistema, conseguir incrementar la sensibilidad mecánica de un sistema rotacional actuando sobre los momentos de fuerza peso y fuerza antagonista.

La astatización de un sistema puede realizarse de distintos modos:

- Situando de manera conveniente las masas y resortes
- Introduciendo en el sistema masas astáticas complementarias
- Creando campos eléctricos o magnéticos

3.2.8.3 Factores que influyen en las medidas

Existen varios factores que influyen en la obtención de medidas realizadas con un gravímetro, que se deben conocer para tratar adecuadamente según su naturaleza:

a) Temperatura:

Si se produce un cambio de temperatura, varían las propiedades elásticas de los resortes, longitud de las articulaciones y palancas del gravímetro. Esto produciría una alteración de la situación de equilibrio del mismo. En teoría lo ideal sería utilizar materiales, que no se viesen afectados por los cambios de temperatura, lo cual a su vez es utópico, por lo que la manera de actuar debe ser la siguiente:

- Utilizar un sistema termostatizado, es decir situar el sistema elástico del gravímetro en el interior de un recipiente dotado de un termostato que mantenga su temperatura interior constante. Para ello el gravímetro debe disponer de una fuente de energía eléctrica que permita el funcionamiento del termostato.
- Utilización de sistemazas termocompensados, en los que si una parte del sistema sufre alguna dilatación por variación de temperatura, dicha deformación queda compensada por la deformación de otra zona.

b) Presión Atmosférica:

De este factor depende, en gran medida, la densidad del aire y por tanto, los empujes sobre los elementos del sistema elástico del gravímetro. Para evitar la influencia de las variaciones de presión, los sistemas elásticos se presurizan en recipientes herméticamente cerrados. Hoy en día es una influencia insignificante.

c) Inclinación del eje de giro del gravímetro:

El sistema elástico del gravímetro, esta diseñado para girar en torno a un eje. Para ello se debe controlar la posición espacial del mismo, en el momento de la observación, de forma que se corresponda con la disposición teórica para la que ha sido diseñado. Para ello los gravímetros están dotados de niveles tubulares que permiten controlar la horizontalidad del mismo. En el caso del gravímetro Lacoste&Romberg utilizado, esta dotado de un nivel tubular transversal situado a lo largo del eje de giro del sistema, y regulado por medio de dos tornillos nivelantes situados en la misma dirección, y otro nivel tubular dispuesto en dirección perpendicular, que permite situar horizontalmente la barra del sistema de lecturas, mediante un tercer tornillo nivelante.

d) Campo magnético:

Para evitar la influencia del campo magnético externo, los sistemas elásticos del gravímetro, se fabrican en la medida de lo posible, con materiales que no sean magnéticos como el cuarzo y sílice fundida. Pero existen algunos componentes que inevitablemente, son metálicos, como por ejemplo, los resortes

del sistema, a los cuales se les somete a un proceso de desmagnetización a la hora de su fabricación y se usan pantallas magnéticas especiales que disminuyen la influencia del campo magnético exterior, entre cinco y diez veces.

e) Marea gravimétrica:

Este factor se debe a que la fuerza de la gravedad no es constante en el tiempo, ya que la tierra sufre distintos procesos geológicos y geofísicos que producen alteraciones en el campo gravitatorio, así como su situación con respecto al resto de cuerpos celestes tampoco es constante en el tiempo.

La marea gravimétrica se produce por los efectos de las fuerzas de atracción de la Luna y el Sol, y la deformación elástica de la Tierra producida por estas fuerzas. La variación, que depende de la posición relativa de nuestro planeta respecto a su satélite y el astro rey (época del mes y del año), así como de la latitud, no llega a superar en el peor de los casos los 0.3 mGal.

La marea gravimétrica, se compensa según unos valores tabulados, en función de la fecha y la latitud del punto. En trabajos de poca precisión, o en aquellos en los que las estaciones se encuentren muy próximas, y los intervalos de tiempo de las observaciones son pequeños; como es en este proyecto, no es necesario realizar una corrección por marea gravimétrica, ya que todas las estaciones se encuentran afectadas del mismo modo. Si se trata de comparar distintos valores de la gravedad en estaciones muy distanciadas, o en distintas épocas, esta corrección es imprescindible, para obtener buenas precisiones.

f) Deriva instrumental:

La deriva instrumental es la diferencia entre dos lecturas realizadas en una misma estación en un cierto intervalo de tiempo debido a causas intrínsecas del gravímetro.
Estas lecturas no son iguales aunque teóricamente deberían serlo, porque existen variaciones continuas e irreversibles del material con que se ha construido el sistema elástico del gravímetro.
Por tanto el propio sistema elástico, debido al tipo de materiales con los que está construido y a pequeños desajustes y distensiones (provocadas por los movimientos propios del desplazamiento del instrumento), se producen variaciones continuas e irreversibles, aunque las condiciones de presión y temperatura sean las correctas. Para minimizar en la medida de lo posible la deriva instrumental se puede proceder de la siguiente forma:

- Siendo extremadamente cuidadoso en el transporte del instrumental, evitando los golpes y cambios de temperatura bruscos.
- Seleccionando estaciones atendiendo a criterios de estabilidad, humedad…
- Utilizando en la toma de datos, siempre un protocolo similar.
- Realizando las observaciones bajo climatología estable.

Para realizar la corrección de deriva, se deben reiteran las medidas gravimétricas en una misma estación, a lo largo del tiempo. Por ello la

observación se realiza en anillos cerrados, comenzando y terminando en el mismo punto, a la vez que se anota la hora de observación en cada estación.

La deriva del instrumento se puede modelizar de distintas formas, deriva lineal, curvas de deriva, deriva media del punto cero…, la forma más sencilla es considerar la deriva como una función lineal, modelo tanto más válido, cuanto menor sean los incrementos de tiempo.

El modelo de deriva lineal, consiste en suponer que la deriva varía linealmente entre cada dos estaciones consecutivas, siendo una hipótesis bastante aproximada para intervalos de tiempo pequeños, tal y como se ha señalado anteriormente. Por tanto basta con calcular el error de cierre de cada anillo, y repartirlo de forma proporcional al tiempo transcurrido en cada tramo del anillo. El error de cierre del anillo será:

$$e_{cierre} = L_{final} - L_{inicial}$$

Dividiendo este error entre el tiempo transcurrido entre ambas observaciones, se obtiene la variación temporal de lecturas respecto al tiempo:

$$D = \frac{\left(L_{final} - L_{inicial}\right)}{\left(T_{final} - T_{inicial}\right)}$$

De forma que la corrección por deriva, será el resultado de multiplicar este valor por la duración del tramo a considerar:

$$C_d = -\left[\frac{\left(L_{final} - L_{inicial}\right)}{\left(T_{final} - T_{inicial}\right)}\right]\Delta t_n$$

La lectura corregida será el resultado de sumar a cada lectura original su corrección correspondiente:

$$L_n = l_n + C_{d_n}$$

3.2.9 Tipos de levantamientos gravimétricos

Se denomina levantamiento gravimétrico a la medición de los valores de la fuerza de la gravedad en distintos puntos de la superficie a investigar para obtener la distribución de las anomalías de la fuerza de la gravedad. Los levantamientos gravimétricos, se emplean principalmente en estudios geológicos, como puede ser el estudio de la estructura profunda de la corteza terrestre o la búsqueda de minerales.

Se pueden clasificar atendiendo a dos criterios: según la finalidad planteada, o según la distribución de los puntos.

Según la finalidad planteada, podemos definir los siguientes tipos de levantamientos:

- ✓ Levantamiento regional: permite obtener un cuadro general del campo gravitatorio en un extenso territorio, revelar las propiedades más generales del campo y su relación con las estructuras geológicas regionales, y por tanto destacar las zonas de mayor perspectiva para una posterior investigación más minuciosa.

  Este tipo de levantamiento ayuda a realizar una división téctonica de las zonas geosinclinales y de plataforma, contornear distintos elementos estructurales y estudiar la estructura profunda de la corteza terrestre y de la Tierra en su totalidad.

- ✓ Levantamiento de reconocimiento: se realiza en distintas superficies con perspectiva de hallar minerales útiles. Este levantamiento se plantea, para hallar y delimitar las estructuras locales que definen la posible zona de mineral buscado.

- ✓ Levantamiento minucioso o detallado: sirve para buscar los yacimientos de minerales útiles, investigar distintas estructuras y minerales.

Otra manera de clasificar los distintos tipos de levantamientos gravimétricos, es atendiendo a la distribución espacial de los puntos levantados, existiendo por tanto:

- ✓ Levantamiento de áreas: aquel en el que los puntos de observación están distribuidos más o menos uniformemente por la superficie. Según sea la estructura geológica de la zona se toleran ciertas discrepancias de la red con respecto a la uniforme, que, sin embargo, no deben disminuir la veracidad de los mapas de las anomalías de gravedad. Por eso, la relación de distancias entre los puntos de observación a lo largo de un perfil (ó línea) y entre los perfiles no debe ser mayor de 1:5.

  El levantamiento de áreas ofrece el cuadro más completo y veraz del campo gravitatorio del territorio estudiado y es el levantamiento gravimétrico fundamental.

- ✓ Levantamiento de itinerario (de perfil o lineal): aquel en el que los puntos de observación están situados a lo largo de los distintos perfiles (líneas) o itinerarios no relacionados o débilmente relacionados entre sí. El levantamiento de itinerario nos da idea del carácter de la variación del campo gravitatorio solamente a lo largo de estos itinerarios.

  Esta clase de levantamientos se utiliza para la prospección previa de las zonas de difícil acceso (desiertos, grandes montañas…), para el estudio de estructuras de forma muy alargada, y para puntualizar el carácter del campo en las zonas de los levantamientos de áreas.

3.2.10 Interpretación de las anomalías

Tal y como se ha expresado en el capitulo *3.2.7.2 Reducciones no isostáticas*, la anomalía de Bouguer se puede obtener según la siguiente ecuación:

$$\Delta_{BouguerCompuesta} = g_{BougeurCompuesta} - \gamma = g_{observada} + \delta_F - \delta_{BouguerSimple} + \delta_{Topográfica} - \gamma$$

Por tanto una vez obtenidos los valores de dicha anomalía, en el número de puntos considerados, se puede proceder a la obtención del mapa de anomalías de Bouguer, mediante el modelado y curvado de dichos valores.

La interpretación de estos valores de forma matemática, solo se podría llevar a cabo mediante una integración aproximada, por tanto en la realidad hay que tener en cuenta las siguientes consideraciones:

Las medidas de la gravedad no son sensibles a las variaciones de densidad verticales en tanto que sean constantes a lo largo de capas horizontales; sin embargo cualquier variación horizontal en densidad causará una variación horizontal en gravedad (es decir, sobre las estaciones de la zona a estudio). Son precisamente estas variaciones horizontales las que aparecen en un mapa gravimétrico; por lo que cualquier condición geológica que produzca una variación horizontal en la densidad, produciría asimismo, un cambio horizontal en la gravedad o lo que es lo mismo una anomalía gravimétrica que podría ser producida por:

1) Un depósito mineral o simplemente un dique de densidad superior a la densidad media de las formaciones geológicas.
2) Un levantamiento de capas de diferente densidad producido por cualquier cambio estructural que dará lugar, asimismo, a una anomalía gravimétrica cuya magnitud dependerá de los contrastes de densidades de las diferentes capas, así como de sus espesores, forma y profundidad.

Sin embargo no se debe tratar de traducir ni siquiera aproximadamente los contornos de las curvas isoanómalas, en contornos estructurales, ya que esto es completamente erróneo. La limitación principal del método gravimétrico estriba principalmente en que los valores observados no son suficientes para definir la distribución de las masas que los producen.

Por la teoría del potencial es conocido que la interpretación de los campos de potencial nunca es única, ya que siempre será posible disponer de una serie de distribuciones de masas que produzcan un mismo efecto gravífico.
Por ejemplo, una masa grande de una determinada densidad y próxima a la superficie produciría una anomalía gravimétrica, semejante a la originada por una masa pequeña de gran densidad y a mayor profundidad.

La interpretación gravimétrica puede ser cualitativa y cuantitativa. La cualitativa para determinar las anomalías existentes en la zona y su probable relación con estructuras de tipo anticlinal, sinclinal, domos, etc. mientras que la cuantitativa tratará

de determinar el volumen, masa y profundidad de las masas que producen las anomalías gravimétricas. Esta última interpretación se hace siempre dentro de ciertos límites.

Como es lógico la interpretación final será tanto más aproximada cuanto mayor información geológica tengamos de la zona objeto de prospección ya que ésta contribuirá a disminuir el número de parámetros en juego.

A la hora de interpretar un mapa de anomalías de Bouguer, se tiene que tener en cuenta que éste expresa todos los efectos debidos a las masas presentes, tanto en profundidad como en superficie. Es decir, que el mapa de Bouguer muestra la suma de los efectos de las rocas sedimentáreas próximas a la superficie, del basamento ígneo, e incluso del magma en el interior de la tierra.

Sin embargo, los efectos de las masas anómalas muy profundas; así como los debidos a las masas montañosas lejanas no incluidos en la corrección topográfica, están muy atenuados debido a su gran distancia, produciendo variaciones amplias de curvas isanómalas, mientras que las estructuras sedimentarias próximas producen variaciones relativamente agudas y frecuentemente fuertes del campo gravitatorio terrestre. De aquí podemos deducir los principales objetivos de la interpretación gravimétrica:

1) La separación de los efectos de las masas profundas y someras *(cualitativo)*

a) Mediante el cálculo del mapa residual
b) Mediante el cálculo del mapa de segundas derivadas

2) La definición de los efectos gravimétricos de las anomalías sedimentarias, determinando la probable profundidad y dimensiones de las estructuras interpretadas. *(Cuantitativo)*

3.2.10.1 Cálculo de mapa residual

El mapa de anomalías de Bouguer se puede considerar como la suma de otros dos: el mapa regional, debido al efecto de las masas profundas y lejanas; generalmente en el basamento, y el mapa residual debido a los efectos de las masas superficiales.

En prospección interesa hacer resaltar el efecto debido a las masas superficiales, eliminando o reduciendo al mínimo el debido a las masas profundas. Por ello se define corrientemente anomalía regional como *el efecto de todo aquello que no interesa al prospector.*

La anomalía residual, responde a la siguiente expresión:

Anomalía residual = Anomalía de Bouguer – Anomalía regional

$$R = A_B - A_R$$

Por tanto para calcular la anomalía residual, una vez obtenida la anomalía de Bouguer, es necesario el cálculo de la anomalía regional. Este cálculo es tan antiguo

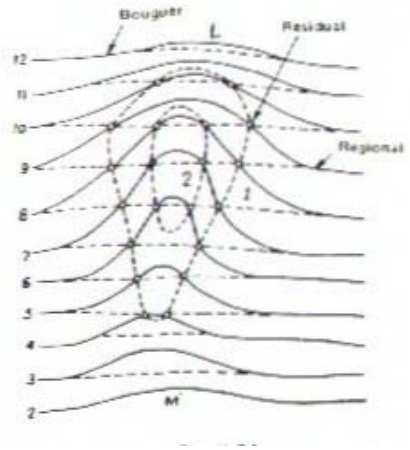
como el método gravimétrico y ha dado lugar a diversos sistemas de cálculo desarrollados o utilizados por las diferentes compañías prospectoras.

Algunos de los métodos para calcular la anomalía regional, son los siguientes:

1) Métodos gráficos:

Estos métodos son muy útiles para ver rápidamente los efectos regional y residual sobre un mapa de anomalías Bouguer, pero tienen el inconveniente de la importancia del factor personal en la realización de los mismos, ya que su trazado es completamente arbitrario.

a) Método de suavización de curvas isoanómalas: este método se basa en suavizar el contorno de las curvas, par obtener la tendencia regional de la zona.

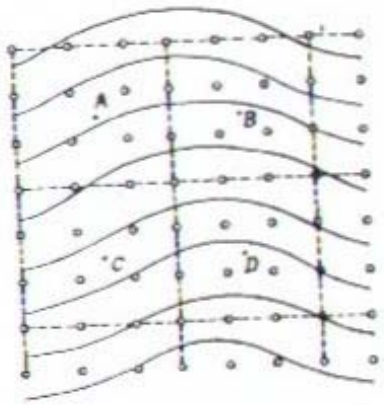


b) Método de los perfiles: similar al anterior, pero utilizando perfiles gravimétricos.

2) Métodos analíticos:

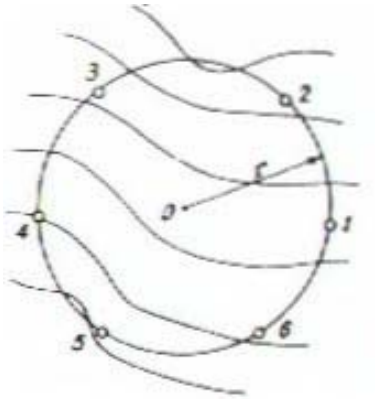
Son métodos más precisos que los gráficos, y sobre todo más objetivos. Los métodos analíticos son los más utilizados, y en consecuencias los más numerosos. Algunos de los utilizados son:

a) Método de las medias aritméticas: Es uno de los más sencillos. Consiste en dividir la malla observada en figuras geométricas iguales, y adoptar como valor de la anomalía regional en el centro de cada figura, el valor de la media de las anomalías de Bouguer observadas dentro de dicha figura. (A,B,C,D).



b) Determinación por mínimos cuadrados: Existen a su vez diversos métodos de cálculo. El más sencillo es suponer que la anomalía regional varía en un plano, es decir, de forma lineal.

c) Método de Griffin: Es uno de los más utilizados en prospección gravimétrica, consiste en definir la anomalía regional, como la integral a lo largo de un círculo de radio arbitrario r, de todos los valores de la gravedad correspondientes a la circunferencia considerada. En realidad, se adopta un método numérico, para sustituir el cálculo de dicha integral. Este método consiste en el cálculo de la media aritmética de un número finito de puntos situados en la circunferencia de radio r, definida previamente.



Normalmente se observan entre cuatro o diez puntos distribuidos de manera regular en la circunferencia, tal y como se muestra en la figura superior.

d) Método de Savox y Nygaard: Este método consiste, sucintamente, en calcular la anomalía residual empleando dos círculos concéntricos de radios r1 y r2, con centro en el punto en que se desea obtener el valor de la residual.

3.2.10.2 Calculo de las segundas derivadas

El método de interpretación de la segunda derivada de la gravedad consiste en determinar, partiendo de los valores de la gravedad observados en el mapa de Bouguer, la segunda derivada vertical de la gravedad. Es decir, si tomamos unos ejes de coordenadas con el eje OZ en la vertical hacia abajo, el problema se reduce a determinar $\frac{\partial^2 g}{\partial z^2}$. Este método tiene la ventaja de que señala mejor los cambios bruscos de la gravedad que los métodos anteriores, y asimismo, que permite separar las anomalías gravimétricas compuestas (es decir, las debidas a la superposición de los efectos de varias masas próximas) en sus componentes separadas.

Aunque este método tiene mucho mas poder resolutivo que los anteriores, debido a la doble diferenciación de g respecto a z, tiene diversos inconvenientes como son:

- No se puede aplicar si las estaciones de la red están muy espaciadas.
- Las observaciones gravimétricas se deben efectuar con alta precisión, debiendo por tanto, realizar las correcciones topográficas adecuadamente.

- Las segundas derivadas no están relacionadas directamente con las estructuras que las causan, por lo que es muy difícil entender la relación entre las masas del subsuelo y las segundas derivadas. Por ello la forma de una anomalía no se puede deducir del mapa de segundas derivadas.
- Como las derivadas segundas decrecen con las potencias de la profundidad de las masas, las anomalías profundas quedan anuladas en el mapa de segundas derivadas.

Este método no ha tenido una aplicación práctica importante en el campo de la prospección gravimétrica. Solamente Elkins en el año 1951 y posteriormente Rosenbach en el año 1953 idearon un método, para aplicar las segundas derivadas al campo de la prospección.

Mediante estos los dos apartados anteriores, cálculo del mapa residual y cálculo del mapa de segundas derivadas, podemos realizar una interpretación cualitativa de las anomalías de la gravedad, pero la definición de los efectos gravimétricos de las anomalías sedimentarias, determinando la probable profundidad y dimensiones de las estructuras interpretadas, es decir realizar una interpretación cuantitativa, se realiza siguiendo otros criterios.

La interpretación cuantitativa persigue: en prospección petrolífera determinar el tamaño y la profundidad de las posibles *trampas*, y en prospección minera determinar, principalmente, la masa que produce una determinada anomalía.

La interpretación en el primer caso, se basa en la comparación de la anomalía obtenida, con la producida por cuerpos de forma previamente establecida. Si ambas coinciden para una determinada forma, profundidad y distribución de densidades, ésta sería una posible solución; sin embargo, pueden existir otras distribuciones de masas, a diferentes profundidades, que produzcan la misma anomalía y únicamente la posterior información geológica haría posible la obtención de la solución más probable.

La interpretación cuantitativa en este caso es indirecta, ya que trata de asimilar las anomalías encontradas a las producidas por cuerpos de la índole de los que puedan ser hallados en la zona objeto de la prospección. Por ello no se podrá intentar hacer una interpretación cuantitativa sin un conocimiento geológico previo de las condiciones aproximadas de las profundidades de las masas, densidades en juego, forma y tamaño de las masas esperadas…

Los procedimientos de interpretación serán:

A. Comparar los efectos observados con los de cuerpos de formas geométricas sencillas (esfera, cilindro horizontal,…)

B. Comparar los efectos observados con los calculados para cuerpos de forma cualquiera.

En prospección minera generalmente, se busca la masa que produce una determinada anomalía. En este caso la magnitud de la masa se puede determinar como una solución única, siempre que se conozca el contraste de densidad del mineral que se busque. Por lo que vuelve a ser imprescindible un conocimiento previo de las características geológicas de la zona a estudio.

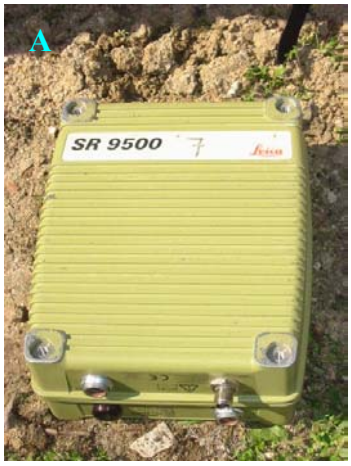
4.Instrumentación

4. Instrumentación

Un factor destacable; en la realización y toma de datos de este proyecto, es la diversidad de instrumentos topográficos utilizados, que a continuación se describen clasificándolos según su ámbito de aplicación.

4.1 Instrumentación G.P.S.

Para realizar las observaciones de la red como de parte del levantamiento, se han utilizado técnicas de posicionamiento GPS. Para ambos trabajos se han empleado los mismos instrumentos, receptores GPS Leica Serie 300, capaces de ofrecer una precisión nominal, en posicionamiento relativo de 5mm + 1ppm. Estos equipos están formados por los siguientes componentes:



- Receptor ó sensor GPS "*Leica SR 9500*" (A)
  Este receptor se caracteriza por ser bifrecuencia con 24 canales, 12 canales para recibir la señal L1, y otros 12 para la señal L2.

- Antena GPS "*Leica AT 302*" (B)
  Antena externa, dotada de un plano de tierra, que permite reducir en parte los efectos de multicamino, que influyen negativamente en el posicionamiento GPS.

- Unidad de control "*Leica CR 344*" (C)
  Se trata de un periférico de comunicación con el sensor GPS, que permite la inicialización, configuración y control de las observaciones, así como su almacenamiento en el correspondiente módulo de memoria.

Utilizando este instrumental, se han realizado las medidas necesarias, mediante un posicionamiento estático relativo; para la observación de la red, así como mediante RTK para la realización del levantamiento cartográfico.

4.2 Instrumentación Topografía Clásica

Para la realización de los trabajos de topográficos efectuados en este proyecto; confección de un levantamiento cartográfico y realización nivelación geométrica, se han utilizado una estación total y un nivel digital.

4.2.1 Estación Total

La estación total utilizada, es el modelo Leica TCR 705, y ha sido empleada en la realización del levantamiento cartográfico, y replanteo en campo, de los perfiles gravimétricos a realizar.

Las características técnicas de la estación son las siguientes:

Desviación típica angular: 5´´ (1.5 mgon)
Desviación típica M.E.D.: 2mm + 2ppm
Ud. mínima en pantalla: 1´´ (0.5 mgon) y 1mm
Compensador electrónico central de dos ejes.
Amplitud de oscilación/Precisión de estabilización
+-4´ / 0.5´´ - 1.5´´

Anteojo: 30 X
Posibilidad de medida de distancias sin reflector

4.2.2 Nivel Digital

Una vez replanteados en campo los perfiles gravimétricos, se ha procedido a realizar una nivelación geométrica, para determinar los desniveles existentes dichos puntos, sobre los que posteriormente se estacionaría el gravímetro. Para ello se ha utilizado un nivel Leica NA2000, cuya principal característica consiste en la posibilidad de realizar lecturas de forma automática, utilizando una mira adecuada dotada de una escala mediante un código de barras.

Wild NA2000 *Equipo de nivelación en campo*

Para poder realizar las lecturas de forma automática, la mira debe estar lo suficientemente iluminada con luz diurna o luz artificial similar a la diurna. A su vez, como el nivel registra y procesa la información del segmento de mira captado por el objetivo, para lecturas realizadas hasta cinco metros de distancia, el campo visual del objetivo sobre la mira debe ser completo. En lecturas realizadas a mayor distancia el campo visual puede estar cubierto hasta un 30 %, permitiendo aún la realización de la lectura.

Utilizando la mira completa se pueden realizar lecturas desde 0.00 hasta los 4.5 m, y si el objetivo capta un segmento de mira suficiente para la medición, pueden realizarse lecturas ligeramente por debajo del pie de la mira, así como por encima de su extremo; resultando una lectura negativa en el primero de los casos. Si no es necesaria la utilización de toda la mira, y para facilitar su transporte y nivelación, se puede utilizar con sólo dos tramos montados, y por tanto de una longitud de 2,5 m.

Las características técnicas más destacables de este instrumento son:

- ✓ Desviación Típica (en 1 km de nivelación doble)
  - Medición electrónica 1,5 mm
  - Medición óptica 2,0 mm

- ✓ Margen de medición
  - Medición electrónica 1,8 a 100 m
  - Medición óptica a partir de 0,6 m

- ✓ Compensador de péndulo, con sensor electrónico del sector.
  - Margen de inclinación +-12´
  - Precisión de estabilización +-0.8´´

- ✓ Anteojo con aumento 24 x
  - Diámetro libre del objetivo 36mm
  - Diámetro del campo visual a 100 m 3.5 m

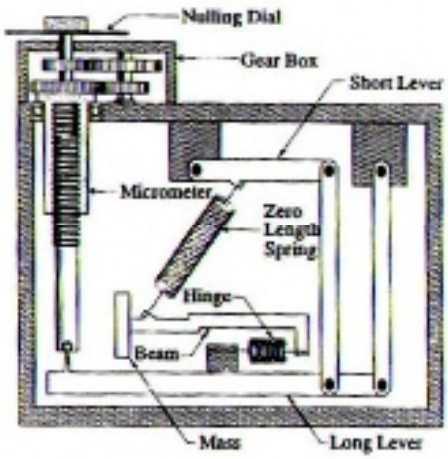
4.3 Instrumentación gravimétrica

Para la observación gravimétrica de este proyecto se ha utilizado un gravímetro de tipo astático Lacoste&Romberg modelo G-1001, con el que cuenta la Escuela Técnica Superior de Topografía, Geodesia y Cartografía. Este gravímetro astático o no lineal permite realizar medidas relativas de gravedad; incrementos de gravedad entre distintos puntos, siendo este el objetivo buscado con las observaciones gravimétricas a realizar.

Lacoste&Romberg G1001

El gravímetro Lacoste&Romberg se basa en el "sismógrafo de largo periodo" ideado por Lacoste en el año 1934. Su precisión nominal es de 0,01mGal.

El esquema de funcionamiento del gravímetro es el siguiente:



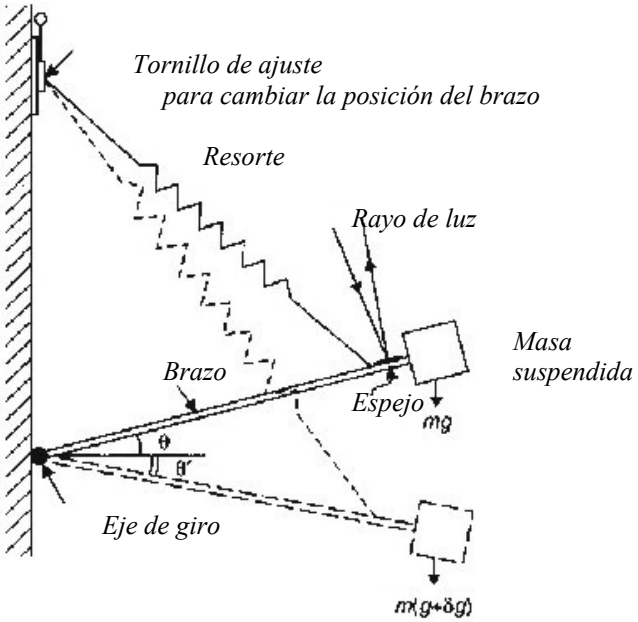
Tal y como se observa en la anterior ilustración, el gravímetro consta de una masa situada en el extremo de un brazo horizontal que está suspendido de un muelle de "longitud cero". Este muelle mide unos 3.5 cm y sirve para anular el efecto de la masa, situándola de esta forma en la misma posición de lectura, mediante una serie de palancas niveladoras. Dichas palancas son accionadas por un tornillo cuyo movimiento es desmultiplicado por un conjunto de engranajes.

Al variar la fuerza de la gravedad, según se estacione el gravímetro en uno u otro punto, provocará una variación del ángulo entre el brazo y el muelle. Esta variación puede anularse mediante el tornillo antes mencionado, el cual varía la posición del muelle de longitud cero. El ángulo que este tornillo debe girarse para restaurar la posición del brazo con la masa en posición nula, es cuantificado y a partir del mismo se deduce la variación relativa de gravedad existente.

Por tanto para realizar una lectura el brazo horizontal que esta suspendido de un muelle de longitud cero, debe situarse en la posición nula. Para controlar la posición del brazo y por tanto realizar la lectura existen distintas posibilidades:

a) Ópticamente:

Este método se basa en un rayo de luz que incide sobre un espejo que lleva acoplado el brazo con la masa. Cuando el brazo es desplazado hasta la posición inicial, o nula, desde aquella que le suministró la gravedad existente en el punto de estación, el rayo vuelve a reflejarse sobre la línea de lectura.



b) Electrónicamente

El modo electrónico permite realizar lecturas con menor fatiga que mediante el sistema óptico. Está compuesto por un condensador que rodea el brazo y de dos láminas que están situadas una por encima y otra por debajo del mismo. Éste genera una determinada corriente eléctrica cuya intensidad mide un galvanómetro. La posición nula corresponde una intensidad determinada, precisamente la que hace que el galvanómetro marque el centro de la ventana exterior al sistema; donde se realiza la lectura. Este dispositivo tiene una sensibilidad de 10 mV/mGal.

En este caso se utilizó el segundo método para la realización de las observaciones en cada punto. Por tanto una vez estacionado el gravímetro en el punto de estación, la lectura se realiza girando el dial de medición, hasta conseguir que el galvanómetro marque el centro de la ventana de lecturas. Con el gravímetro utilizado una rotación simple del dial corresponde a un miligal.

Este modelo de gravímetro tiene un rango de lecturas de hasta 7000 divisiones, ya que se trata del modelo G (geodésico) a diferencia del modelo D, que cuenta con 2000 divisiones. Teniendo en cuenta por tanto, que la constante del gravímetro es de aproximadamente 1mGal/división, con el modelo G pueden registrarse las variaciones de gravedad desde el Ecuador hasta los polos.

De esta forma, para facilitar la realización de la lectura, debemos aproximar previamente la lectura del contador, a la lectura que realmente realicemos. Para ello se debe tener en cuenta que el valor de la gravedad; y por tanto del contador, aumenta de forma directamente proporcional con el aumento de la latitud, a si como disminuye igualmente con el aumento de la altitud del punto. Para ello podemos utilizar la siguiente tabla a modo de orientación:

Latitud	Gravedad aproximada mGal	Lectura aproximada
0º	978046	1430
10º	978203	1600
20º	978652	2050
30º	979337	2750
40º	980178	3600
50º	981078	4530
60º	981930	5400
70º	982623	6100
80º	983073	6560
90º	983223	6700

Con esta tabla, y considerando que la gravedad disminuye en orden de 0,3 mGal por cada metro que se asciende, podemos aproximar el contador a la lectura real, para así facilitar la observación en campo.

El equipo de medida gravimétrico se complementa con los siguientes elementos:

- Basada circular de aluminio, para estacionar el gravímetro.
- Baterías y adaptador de corriente eléctrica.
- Caja acolchada y acondicionada para el transporte del equipo.

El uso y transporte del equipo debe realizarse con sumo cuidado, debido a la configuración interna del instrumento. Las partes móviles del gravímetro no pueden moverse más allá de la décima de milímetro. Por tanto mientras que el gravímetro no se encuentra efectuando ninguna observación, dispone de un dispositivo que amordaza el brazo horizontal que suspende la masa. De forma que siempre debe activarse este dispositivo durante el transporte y almacenamiento del instrumento, para evitar al fatiga innecesaria de los elementos internos, y posible daños causados por movimientos bruscos o golpes.

De igual forma para evitar un mal funcionamiento del gravímetro, a causa de agentes externos, como la presión y la temperatura, el aparato se encuentra sellado herméticamente para evitar cambios de presión y posee un compensador barométrico por si el sellado fallase. Para mantener constante la temperatura necesaria para el buen funcionamiento del instrumento; 53º C posee una serie de resistencias y un termostato que regulan la temperatura interior, manteniéndola constante. Por ello el gravímetro necesita del uso de baterías que alimenten este sistema.

Un cambio en la temperatura de utilización del gravímetro, afectaría a las lecturas realizadas, ya que por ejemplo una variación de temperatura de 0,001ºC, produciría una desviación en las lecturas de 0,01 mGal, debido a la dilatación y/o contracción de los elementos internos.

Con estas consideraciones, para realizar una observación con el gravímetro es necesario realizar los siguientes pasos:

1. Antes de realizar la primera observación, efectuar una comprobación el instrumento. Para ello se pueden realizar una serie de comprobaciones en campo, que se describen en el manual de uso de este gravímetro como son:

    a. Comprobación de los dos niveles tubulares
    b. Comprobación de la sensibilidad del instrumento
    c. Comprobación de la línea de lectura

2. Conectar el gravímetro a una fuente de energía eléctrica, de forma que adquiera la temperatura adecuada para su funcionamiento. Para ello es aconsejable planificar la observación, y antes de salir a realizarla, conectar el gravímetro a la red eléctrica durante varias horas, para que consiga la temperatura adecuada y se estabilice. Posteriormente para su traslado y uso en campo, se utilizarán las baterías adecuadas.

3. Situar el gravímetro sobre la basada de aluminio, sobre el punto en el que se quiere realizar la observación. Nivelarlo aproximadamente, deslizándolo sobre dicha basada. Posteriormente se termina de nivelar utilizando los niveles tubulares de los que dispone, nivelando preferiblemente el nivel transversal y después el longitudinal.

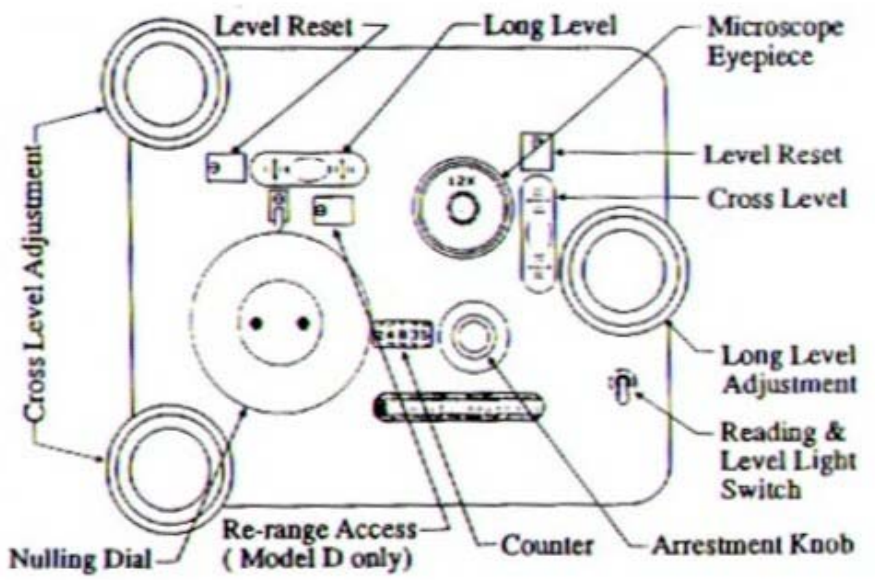
4. Una vez nivelado, y en una posición estable, se libera el tornillo que actúa de mordaza del brazo interno del gravímetro, girando dicho tornillo en sentido inverso a las agujas del reloj.

5. A continuación se realiza la lectura, en nuestro caso utilizamos el galvanómetro. Para ello utilizamos el tornillo micrométrico que desplaza la posición del brazo interno del gravímetro, girándolo en el sentido adecuado. Para facilitar la lectura, se debe calcular de antemano un valor aproximado, que deberá fijarse y partiendo de él se llegará con mayor brevedad a la lectura real. Para realizar la lectura girando el tornillo micrométrico, modificamos la lectura del contador, así como la posición de la aguja del galvanómetro en la ventana exterior. Debemos conseguir que la aguja del galvanómetro se sitúe en la división central de la ventana, para lo cual giramos el tornillo micrométrico a derecha o izquierda, y la aguja del galvanómetro se desplazará en el mismo sentido.

6. Una vez situada la aguja del galvanómetro en la división central de la ventana de lecturas, procedemos a realizar la lectura, utilizando tanto el contador, como el tornillo micrométrico. El último número del contador debe coincidir con el número que se muestra en el tornillo micrométrico, siendo este la décima de unidad. Por tanto las cinco primeras cifras de la lectura se obtienen del contador, mientras que la décima y la centésima de unidad se obtienen del tornillo micrométrico. Este tornillo se encuentra dividido en décimas de unidad, pudiendo estimar las centésimas de unidad. Se debe anotar la hora en la cual se realiza la lectura (hh:mm:ss), para facilitar la posterior corrección por deriva instrumental.

7. Es conveniente hacer varias observaciones en cada estacionamiento, en este caso se han realizado dos observaciones en cada punto. Para ello se procede a descorregir la aguja exterior del galvanómetro, desplazándola de su posición central en la ventana de lecturas. Es recomendable realizar este desplazamiento, siempre en el mismo sentido, para así poder realizar las lecturas siempre desplazando la aguja de la misma forma.

8. Una vez realizada la observación, y antes de mover el gravímetro se debe amordazar el brazo interno del mismo, para evitar posibles daños. Por tanto se gira el tornillo que actúa como mordaza en sentido horario. Posteriormente se introduce en la caja de transporte, tanto el gravímetro como las baterías correspondientes, asegurándose en todo momento que durante el transporte del gravímetro, su brazo interno permanece amordazado.



Una vez realizada la observación, lo que obtenemos son lecturas de contador, que se deben transformar adecuadamente en miligales. Para ello el fabricante proporciona con el manual de uso del gravímetro, la constante de transformación según el rango de lecturas. El proceso de transformación a miligales, se puede asimilar fácilmente con un ejemplo práctico:

Si realizamos la lectura 2654.32 en el contador, debemos observar en la tabla de calibración, el rango de lecturas en el que se encuentra, y mediante interpolación lineal obtendremos su equivalencia en miligales:

Lectura Contador	Valor en mGal (cts acumulativas)	Factor de interpolación
2500	2519.42	1.00794
2600	2620.21	1.00799
2700	2721.01	1.00805
2800	2821.82	1.00811

En este caso, como la lectura esta comprendida entre 2600 y 2700, la conversión se realiza de la siguiente forma:

Dividimos la lectura en dos partes

- 2600 + 54.32 y convertimos ambas por separado
- 2600 equivale a 2620.21 según se observa en la tabla
- 54.32 lo multiplicamos por el factor de interpolación correspondiente, en este caso 1.00799 y equivale a 54.75 miligal

Finalmente sumamos ambos valores transformados, y obtenemos la lectura en miligales:

2620.21 + 54.75 = 2674.96 mGal

En nuestro caso todas las observaciones efectuadas se encuentran entre 3500 y 3600 unidades de contador, por lo que se puede realizar la conversión a miligales, multiplicando directamente por el factor de interpolación correspondiente. De esta forma todas las lecturas han sido multiplicadas por el factor 1.02367 para transformarlas a miligales.

Para realizar todas las observaciones necesarias, además del instrumental descrito, se ha utilizado el material auxiliar correspondiente en cada caso, como trípodes, basadas, jalones, prismas, miras, baterías, cargadores, flexómetro, cinta métrica, maza, pintura, estacas, clavos, hitos tipo "feno", siendo necesario por tanto la utilización de un considerable equipo instrumental.

Gravímetro, estación total y nivel digital

Equipo GPS

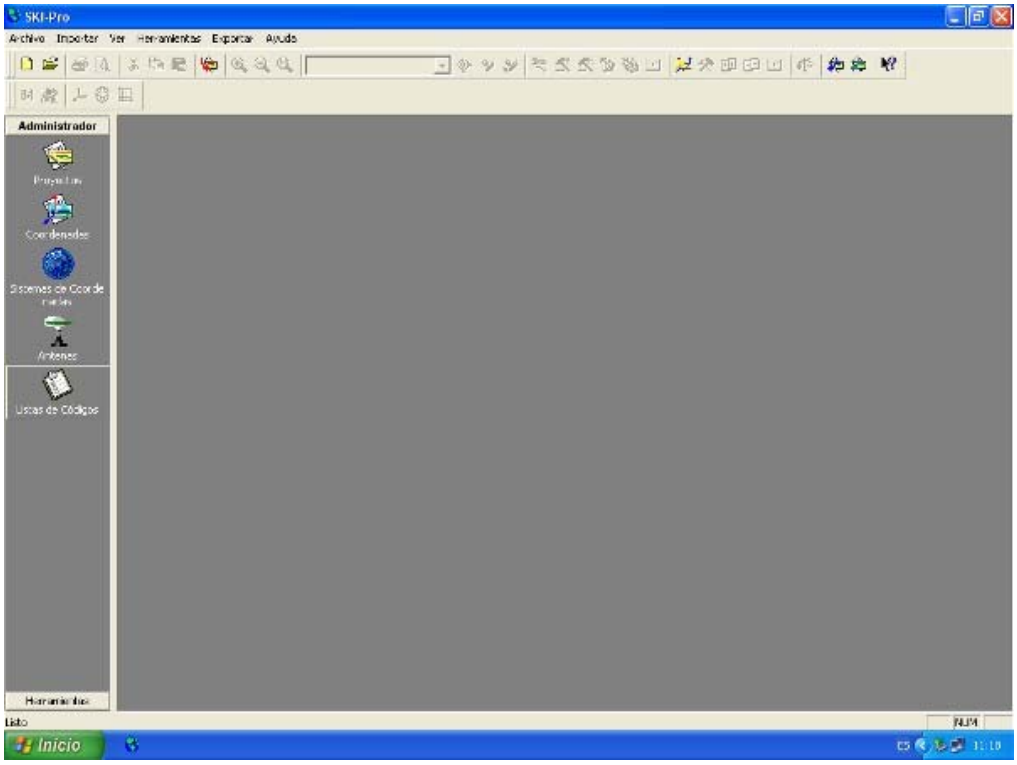
5.Software

5. Software

Para la realización del presente proyecto, además del software ofimático utilizado, como procesador de textos y hoja de cálculo adecuada, se han empleado recursos técnicos más especializados. Entre ellos cabe destacar:

5.1 Leica SKI Pro 5.0

El programa SKI Pro (Static-Kinematic-Professional) de la casa comercial Leica, se ha utilizado para el postproceso y manejo de datos GPS, recibidos y almacenados por los receptores utilizados, de la misma casa comercial. Esta constituido por un conjunto de rutinas automatizadas para el postproceso de datos obtenidos mediante GPS.



Pantalla Principal del programa

Las principales funciones que ofrece son:

- Importación de datos
- Administración de datos
- Procesamiento de datos
- Ajuste de redes
- Cálculo de transformación de coordenadas
- Exportación de datos

Las funciones utilizadas mediante este software, tanto en el cálculo y ajuste de la red, en el cálculo de transformaciones, así como en el cálculo del levantamiento, se detallan en capítulos posteriores, según se justifica la metodología utilizada en cada caso.

5.2 MDT 4.0

Se ha empleado en software MDT 4.0 de la firma comercial TCP Informática y Topografía, bajo AutoCad 2002. Este software diseñado específicamente para el ámbito de la topografía, ha sido utilizado para la confección del levantamiento, a través de la creación de un modelo digital de la zona y su posterior curvado.

A su vez se ha empleado en la realización de los perfiles gravimétricos realizados, mediante la creación de un modelo digital, en el que la tripleta de coordenadas de cada punto la forman su posición planimétrica y un valor que indica la anomalía de gravedad existente en dicho punto, en lugar de su altitud. El uso de esta superficie ha facilitado en gran medida, la representación de los perfiles realizados, así como la representación de los datos obtenidos.

Las principales funciones de este software son las siguientes:

- Realización de cálculos topográficos: intersecciones, poligonales, transformaciones,….
- Creación y manipulación de modelos digitales del terreno
- Utilidades de cálculo y representación cartográfica: curvados, confección de perfiles longitudinales y transversales, mapas de alturas, mapas de pendientes, cálculos de visibilidad…
- Utilidades de cálculo y encaje de trazados: creación de alineaciones en planta, rasantes, acuerdos verticales,…
- Utilidades de cálculo de replanteo, áreas, volúmenes…

6.Metodología operativa

6.1 Observación y cálculo de la red mediante técnicas G.P.S

6.1.1 Diseño de la red

La planificación y observación de la red de coordenadas a establecer en este proyecto, se ha planteado para poder dotar de un sistema de coordenadas oficiales; coordenadas ED-50 utilizando la proyección UTM, a toda la extensión del yacimiento arqueológico Clunia Sulpicia con la precisión adecuada para los posibles trabajos topográficos que demanden los estudios arqueológicos propios de este yacimiento.

Para la cartografía realizada en este proyecto, se ha elegido una escala 1/500, considerando tanto el uso a la que se destina, como las características topográficas del terreno. El diseño y elección del método de trabajo para la observación de la red, aún estando supeditado a la obtención de la mayor precisión posible, debe cumplir las tolerancias a priori establecidas por la escala cartográfica elegida, de forma que para evitar la representación en la cartografía de errores en planimetría, estos errores deben de situarse por debajo de los seis centímetros, tal y como se establece en la propuesta del proyecto.

La red a establecer debe dar cobertura a la totalidad del yacimiento arqueológico Clunia Sulpicia, de aproximadamente 100 Ha de extensión. Este yacimiento se sitúa en una altiplanicie en la cual se asentaba la antigua ciudad romana de Clunia, localizándose actualmente la mayoría de las ruinas en la zona central del mismo. Teniendo en cuenta estos condicionantes, se ha diseñado una red que se sitúa en la zona central del yacimiento y que conforma una figura lo más regular posible; en concreto un heptágono, de forma que la red se compone de ocho vértices. Así mismo aunque la observación de la red se ha realizado mediante técnicas GPS, se ha facilitado en la medida de lo posible la intervisibilidad entre las bases de la red, para permitir posibles trabajos posteriores mediante topografía clásica, de forma que desde cada base de la red, se pueden observar al menos otras dos bases más.

Con estas premisas, y ayudándose de una cartografía previa de la zona, se determinaron las posibles ubicaciones de las bases de la red. La situación de la base central de la red, se estableció en el mirador del conjunto termal, debido tanto a su posición central en el yacimiento, como a su elevación, ya que se trata de un mirador artificial constituido por un pequeño acopio de tierras acondicionado como tal.

Posteriormente la situación de las demás bases, se estableció siguiendo criterios geométricos y su cercanía a puntos de interés dentro del yacimiento. Esta planificación anterior fue de gran ayuda, determinando la posición definitiva de los vértices de la red en el momento de su señalización en campo.

Para la materialización en campo de las bases de la red de coordenadas, se ha elegido la utilización de hitos tipo “feno”, que garantizan la estabilidad y continuidad en el tiempo de las bases observadas, así como su fácil localización.

6.1.2 Observación de la red.

Una vez realizada la planificación y señalización de la red en campo, el siguiente paso es la observación de la red mediante técnicas G.P.S.

Para la observación de la red se realizo un posicionamiento estático relativo, utilizando receptores Leica serie 300.

En primer lugar, ser realizo el enlace con la red REGENTE (Red Geodésica Nacional por Técnicas Espaciales), para ello se utilizo un vértice de esta red situado a unos tres kilómetros del yacimiento. De esta forma se realizó una observación simultánea, estacionando receptores G.P.S tanto en el vértice Piconisio (REGENTE), como en dos vértices de la red a observar, en este caso Mirador y 2000. La observación se prolongó durante unos cincuenta minutos, para asegurar la correcta resolución de ambigüedades, teniendo en cuenta la distancia de las líneas base a resolver. De esta forma, y tras el cálculo posterior adecuado, es posible calcular las coordenadas de los vértices Mirador y 2000, mediante incrementos respecto a las coordenadas del vértice Piconisio, siendo por tanto un posicionamiento estático relativo post-proceso.

Para estacionar la antena sobre el vértice de la red REGENTE, Piconisio, se utilizó una basada nivelante, mientras que para el estacionamiento de las antenas en los vértices de la red a observar, se utilizaron trípodes, centrados sobre los hitos que materializan los puntos en el terreno.

El siguiente paso, después de la observación del enlace con la red REGENTE, es la observación de la red, partiendo en este caso de los vértices Mirador y 2000. Para esta observación también se utilizaron tres receptores G.P.S, de forma que uno de ellos, se estacionó en el vértice central de la red Mirador, durante toda la observación y los otros dos se estacionarían en los demás vértices de la red. Se comenzó la observación desde el vértice 2000, en sentido antihorario, de forma que mientras el receptor estacionado en Mirador permanecía siempre fijo como referencia, los otros dos se estacionaban durante unos 45-50 minutos en cada vértice de la red. Utilizando esta metodología se observa cada triángulo formado por los tres receptores durante al menos unos 20-25 minutos, además de observar siempre dos veces los lados que unen los vértices exteriores, con el vértice central.

De esta manera la observación comenzó, estacionando en Mirador, 2000 y 1000 sendos receptores G.P.S. durante unos 25 minutos, posteriormente el receptor estacionado en 2000, se estacionó en el vértice 7000, mientras los otros dos receptores permanecían en su ubicación original, y se mantuvo esta ubicación durante otros 25 minutos. El siguiente paso consistió en mover el receptor utilizado en el vértice 1000 al vértice 6000, mientras los otros dos receptores permanecen inmóviles, y así sucesivamente, hasta completar la observación de toda la red, volviendo finalmente a estacionar un receptor en el vértice de partida; 2000, en la observación del último triangulo formado por Mirador, 3000 y 2000.

Por tanto así se aseguró en campo la realización de las observaciones necesarias, para el cálculo de las líneas base a resolver, en función de la magnitud de las mismas.

A su vez también se realizaron observaciones a tres bases de una red secundaria que se utilizaría posteriormente para realizar el levantamiento topográfico de la zona de interés, formada por los vértices estaca1, estaca2 y aparca.

La observación en campo de la red, se completó mediante la realización de croquis de la situación de los vértices en campo, para facilitar su posterior localización, así como la toma de datos complementaria, como alturas de antena, tiempos de observación y fotografías de los vértices.

Todas las observaciones realizadas quedan registradas en los módulos de memoria extraíble de los receptores utilizados. Una vez completada la observación y ya en gabinete se ha procedido al volcado de los datos obtenidos, mediante un módulo lector adecuado de dichos módulos de memoria. De esta forma ya se dispone de todas las observaciones realizadas en formato digital. A continuación es necesario realizar el correspondiente proceso de cálculo.

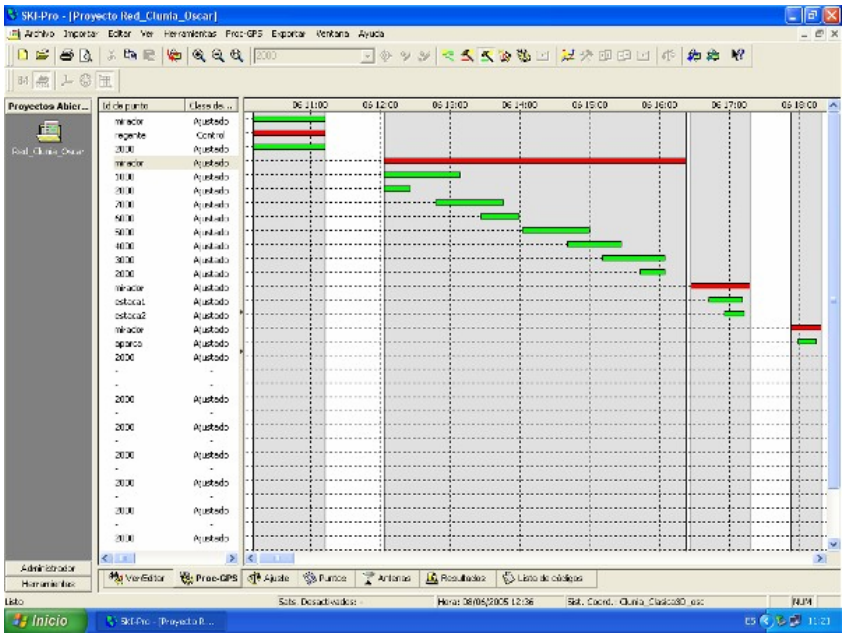
6.1.3 Cálculo de la red

Para procesar las observaciones obtenidas, y realizar el cálculo de la red, se ha utilizado el software; de la casa Leica , Sky-Pro.

En primer lugar procedemos a crear un nuevo proyecto, utilizando el administrador de proyectos, donde volcaremos todas las observaciones realizadas, mediante el comando *importar datos crudos* del programa, seleccionando el tipo de receptor utilizado, en este caso GPS Leica Serie 300.

Una vez asignadas estas observaciones en nuestro proyecto, realizamos una comprobación de las mismas, comprobando los nombres de las estaciones y las alturas de antena, así como comprobamos que el tipo de antena asignado automáticamente a las observaciones es el correcto.

Tras la comprobación de los resultados, continuamos realizando la configuración de la red anteriormente diseñada y observada. Para ello utilizando el administrador de Coordenadas y en la pestaña Proceso GPS, designaremos las estaciones utilizadas como referencia, y las estaciones observadas. Para ello utilizamos la siguiente pantalla:

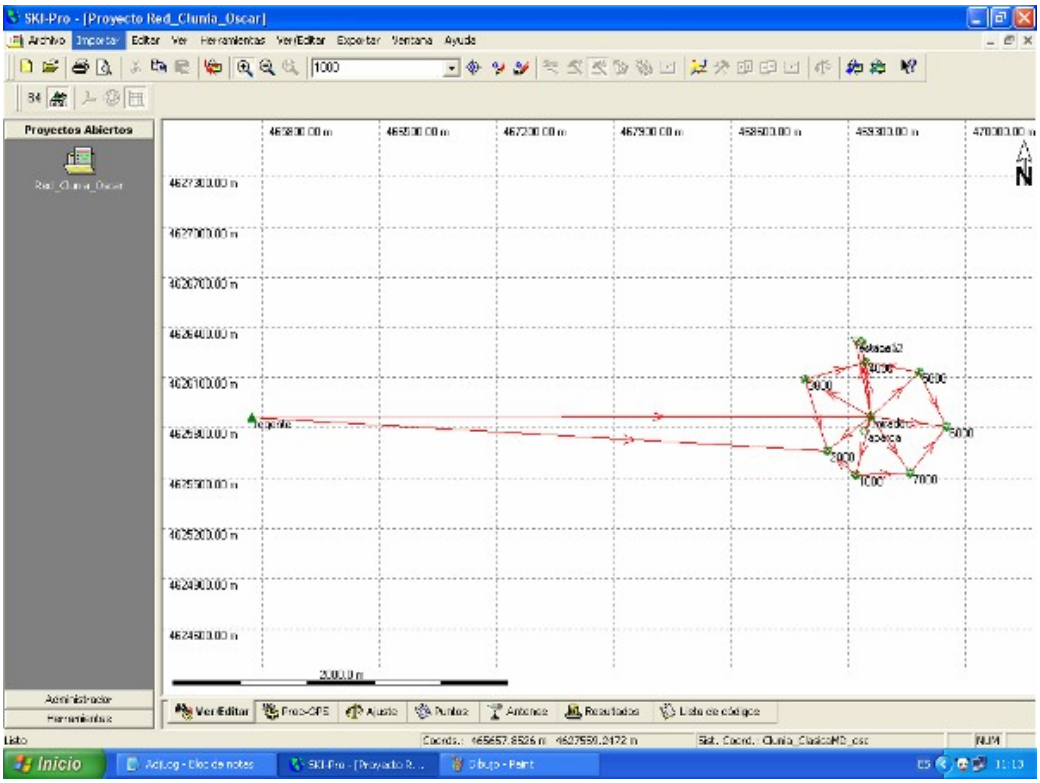


Mediante esta pantalla podemos visualizar las observaciones realizadas en cada estación, así como su duración, de forma que es posible determinar que observaciones han sido realizadas a la vez. Por tanto, tal y como se ha planificado la observación de la red, deben cumplirse los solapes temporales necesarios para la resolución de ambigüedades, necesarias para el cálculo de las líneas base.

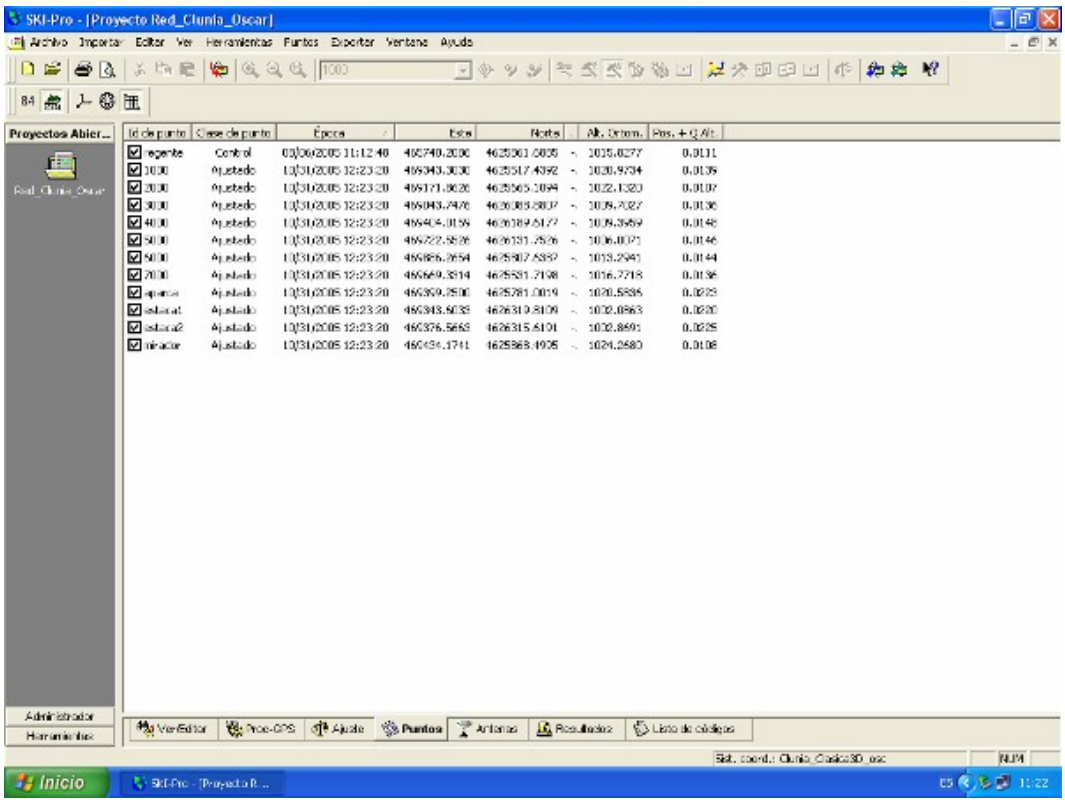
Para realizar este cálculo, debemos fijar como referencia al menos una de las estaciones que tienen solape con las demás, de forma que su representación en la pantalla se realiza mediante el color rojo, siendo el verde el color utilizado para las demás observaciones. Una vez establecidas las estaciones que actúan como referencia, se realiza el cálculo de las líneas bases, mediante el comando "procesar". Una vez realizado el cálculo, en la pestaña de resultados, hemos de observar en la columna de estado de ambigüedades el valor "si", lo cual nos indica que se ha podido resolver correctamente las ambigüedades existentes.

Tras realizar el primer cálculo de la red, observamos la posibilidad de realizar distintas configuraciones, debido a los solapes temporales existentes, de forma que se realizan varios cálculos variando las estaciones que se utilizan como referencia, excepto las observaciones realizadas en "Piconisio"; ya que esta estación siempre se considera como un punto de control.

Por tanto se obtienen varias soluciones para el cálculo de la red, en función de las estaciones utilizadas como referencia. El siguiente paso, es el ajuste de la red mediante mínimos cuadrados. Para ello utilizamos la pestaña de ajuste, y mediante el comando "calculo" se procesan los datos, de forma que finalmente se obtendrá una única tripleta de coordenadas para cada estación, así como la precisión obtenida en dicha determinación.



El resultado final del ajuste, se muestra tanto gráficamente, como se observa en la pantalla anterior, así como numéricamente:



A la vez se genera un informe con todos los datos del cálculo y ajuste de la red, que se adjunta en el *anexo 2*, a este proyecto.

Las coordenadas obtenidas en el cálculo de la red, para los vértices observados, así como sus precisiones son las siguientes:

Estación	Latitud φ	σ	Longitud λ	σ	Altura elipsoidal	σ
1000	41º 46´ 44.52133´´ N	0.0094 m	3º 22´ 12.71010´´ W	0.0097 m	1074.334 m	0.0236 m
2000	41º 46´ 49.28560´´ N	0.0070 m	3º 22´ 20.16430´´ W	0.0081 m	1075.493 m	0.0181 m
3000	41º 47´ 03.00832´´ N	0.0101 m	3º 22´ 25.79372´´ W	0.0102 m	1063.070 m	0.0225 m
4000	41º 47´ 06.32497´´ N	0.0097 m	3º 22´ 10.20473´´ W	0.0103 m	1062.770 m	0.0254 m
5000	41º 47´ 04.49268´´ N	0.0099 m	3º 21´ 56.39414´´ W	0.0097 m	1059.384 m	0.0251 m
6000	41º 46´ 54.00578´´ N	0.0111 m	3º 21´ 49.24250´´ W	0.0100 m	1066.668 m	0.0239 m
7000	41º 46´ 45.02945´´ N	0.0104 m	3º 21´ 58.58952´´ W	0.0096 m	1070.137 m	0.0226 m
Mirador	41º 46´ 55.91698´´ N	0.0070 m	3º 22´ 08.83870´´ W	0.0081 m	1077.636 m	0.0182 m
Estaca1	41º 47´ 10.53806´´ N	0.0182 m	3º 22´ 12.84618´´ W	0.0131 m	1055.461 m	0.0368 m
Estaca2	41º 47´ 10.40672´´ N	0.0179 m	3º 22´ 11.41732´´ W	0.0132 m	1056.244 m	0.0381 m
Aparca	41º 46´ 53.07505´´ N	0.0183 m	3º 22´ 10.33542´´ W	0.0155 m	1073.950 m	0.0364 m

Estas coordenadas son la que resultan tras efectuar el cálculo y ajuste de la red, siendo coordenadas geodésicas bajo el marco de referencia ETRS-89. Esto se debe a que en el ajuste de la red se han introducido las coordenadas del vértice Piconisio, como un valor fijo, obtenidas de la reseña correspondiente de la red REGENTE.

Podemos observar como la precisión obtenida en el cálculo está por debajo de la tolerancia establecida a priori para el trabajo, ya que en planimetría la precisión de los puntos se sitúa en torno al centímetro, mientras que en altimetría en torno a los dos centímetros.

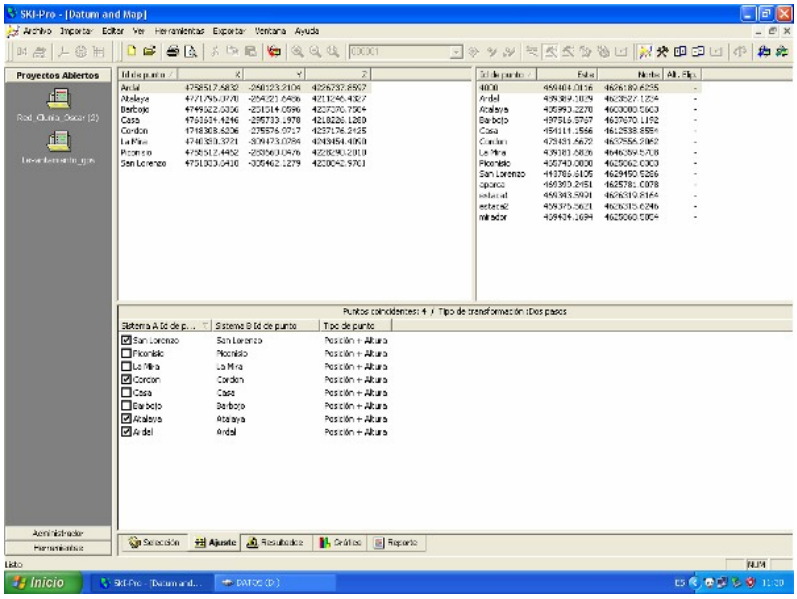
Por tanto tras el ajuste de la red, obtenemos una tripleta de coordenadas para cada estación de nuestra red, con su correspondiente precisión. Debido a la necesidad de obtener estas coordenadas en el sistema oficial ED-50, utilizando la proyección cartográfica UTM, es necesario el cálculo de una transformación de coordenadas. La necesidad de utilizar este sistema de coordenadas, se debe a la posibilidad de facilitar la homogeneización, de los futuros trabajos cartográficos basados en la red establecida, con cartografía existente en el sistema oficial actualmente.

Para el cálculo de la transformación de coordenadas necesaria, se ha utilizado un módulo del programa Sky-Pro, denominado Datum and Map.

Mediante esta transformación, podemos expresar las coordenadas de los vértices de la red calculada, tanto en el sistema ETRS-89, como en el sistema ED-50, utilizando la proyección UTM.

Para este cálculo necesitamos puntos, cuyas coordenadas en ambos sistemas nos sean conocidas. De esta manera utilizamos los vértices de la red REGENTE, que se encuentran rodeando nuestra zona de actuación. Actualmente la densidad de vértices de esta red, se sitúa en torno a un vértice por cada hoja del MTN 1/50.000, por tanto en nuestro caso elegimos los vértices que se sitúan tanto en la propia hoja donde se encuentra el yacimiento, como en las colindantes. De esta forma partimos de ocho vértices, cuyas coordenadas nos son conocidas en ambos sistemas.

Utilizando el módulo Datum and Map, creamos dos sistemas de coordenadas. Es necesario definir un sistema de coordenadas ETRS-89, y un sistema de coordenadas Local, en nuestro caso sistema ED50 con proyección UTM.
En dichos sistemas, introducimos las coordenadas correspondientes, de los vértices de la red REGENTE.



Pantalla correspondiente a los sistemas de coordenadas utilizados

A continuación, en la pestaña de *ajuste*, y configurando los parámetros de la transformación, calculamos una transformación Clásica 3D, con el modelo de transformación de Molodensky Badekas. Para definir esta transformación espacial, es necesaria la determinación de siete parámetros. A priori, disponemos de ocho puntos en ambos sistemas, lo cual nos proporciona 24 ecuaciones, para resolver 7 incógnitas, generando por tanto 17 grados de libertad.

La elección del cálculo de una transformación Clásica 3D, se debe a las dimensiones reducidas de la zona de estudio, así como el modelo de transformación utilizado ya que calcula los parámetros de transformación en función de un centroide de la zona, lo que resulta idóneo en el cálculo de redes locales de pequeñas dimensiones.

Realizamos un primer cálculo utilizando todos los vértices, y observamos en la pestaña *resultados*, las precisiones obtenidas. En este primer cálculo, deducimos que el vértice Barbijo, genera unos residuos de hasta 50 cm en planimetría, por lo cual lo desechamos para el cálculo de la transformación. Realizamos esta operación repetidamente, eliminado del ajuste el punto que en cada operación nos genera mayores residuos, hasta llegar a la precisión deseada o al mínimo número de puntos posibles, que den solución a la transformación. Finalmente utilizamos tan sólo cuatro vértices San Lorenzo, Cordón, Atalaya y Ardal, de forma que la precisión en posición+altura se encuentra por debajo de los diez centímetros, siendo éste el mejor resultado obtenido.
Estos cuatro puntos, generan 12 ecuaciones, para resolver 7 parámetros, lo cual nos proporciona 5 grados de libertad. La transformación calculada con estos cuatro vértices, genera el siguiente informe:

Informe de Transformación Clásica 3D

Sistema A Clunia_WGS84_osc	Sistema B	Clunia_ED50_osc
Elipsoide: WGS 1984	Elipsoide:	International (Hayford)
Sistema: -	Sistema:	-
Modo de altura:		Ortométrica

Parámetros de Transformación

Número de puntos comunes:		4	
Modelo de transformación	Molodensky Badekas		
Origen de rotación:	X0	4757614.0054	m
	Y0	-276345.9897	m
	Z0	4226500.8778	m

Núm.	Parámetro:	Valor	e.m.c.	Unidad
1	dX de Desplazamiento	99.1647	0.0300	m
2	dY de Desplazamiento	103.2608	0.0300	m
3	dZ de Desplazamiento	131.8117	0.0300	m
4	Rotación sobre X	2.05626	0.34603	"
5	Rotación sobre Y	7.82626	0.54251	"
6	Rotación sobre Z	-7.15066	0.34580	"
7	Esc.	-14.4690	1.3612	ppm

Sigma a priori: 1.0000 *Sigma a posteriori*: **0.0600**

Residuales m

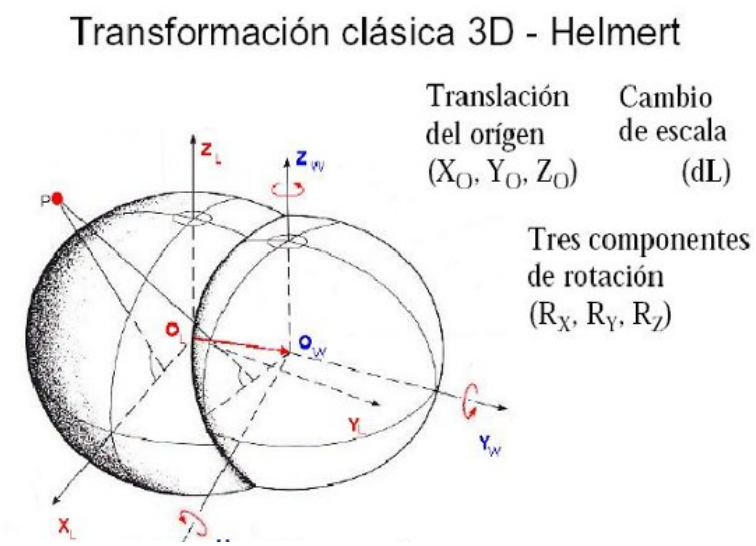
Cartesianas:

Sistema A	Sistema B	dX	dY	dZ
Ardal	*Ardal*	0.0451	0.0847	-0.0364
Atalaya	Atalaya	-0.0490	-0.0301	0.0496
Cordon	Cordon	0.0020	-0.0339	-0.0122
S.Lorenzo	S. Lorenzo	0.0019	-0.0207	-0.0010

Cuadrícula:

Sistema A	*Sistema B*	dE	dN	dA
Ardal	Ardal	0.0870	-0.0541	0.0059
Atalaya	Atalaya	-0.0328	0.0685	-0.0025
Cordon	Cordon	-0.0337	-0.0117	-0.0052
S. Lorenzo	S. Lorenzo	-0.0205	-0.0029	0.0018

En la siguiente figura, se muestra la configuración de la transformación utilizada:



En la transformación calculada, la distribución de los residuales, se realizó en función del inverso del cuadrado de la distancia por dos motivos:

- Al tratarse de una transformación de grado uno, no es necesario la utilización de polinomios de mayor grado para la distribución de residuales.

- Con este modelo de distribución se pondera de forma negativa los puntos más alejados del centro de la zona.

Una vez calculada la transformación espacial entre ambos sistemas de coordenadas, es necesario guardar los resultados para poder aplicarlos posteriormente. Para ello utilizando el comando *guardar parámetros de transformación*, se almacena la transformación como un sistema de coordenadas más, que se utilizará para expresar las coordenadas de los puntos medidos en el sistema ED50, utilizando la proyección UTM. De esta forma dispondremos en cualquier momento de las coordenadas de los puntos en ambos sistemas.

6.2 Levantamiento Topográfico

6.2.1 Planificación del levantamiento

Para la realización del levantamiento topográfico, en primer lugar se estableció la zona a levantar. El objetivo de este levantamiento, es cubrir en superficie la zona por la que interiormente discurre la galería subterránea buscada. Esta zona se ha determinado deduciendo el trazado aproximado de dicha galería debido a:

- ✓ La existencia en superficie, en el flanco Norte del Alto de Castro, donde se encuentra el yacimiento, de una entrada a la galería denominada como "Cueva de Román". Por tanto de este punto debe partir la galería, y deducimos que de alguna forma se comunica con los conjuntos termales "Los Arcos I" y "Los Arcos II", para el suministro de agua.

- ✓ La existencia de un trazado aproximado de la galería realizado mediante brújula y medida de distancias, recorriendo físicamente la galería. Este es trazado orientativo, incompleto y de menor precisión cuanto más se aleja de la entrada a la galería. La poca precisión del trazado se debe tanto al método de medida utilizado, como a las condiciones en las que se realiza, ya que el acceso a la galería únicamente es posible para espeleólogos experimentados, y con el equipo adecuado, al encontrar zonas derruidas, y de muy difícil acceso. A su vez este trazado ha sido complementado con un estudio de radiolocalización realizado por el GTE (Grupo de Tecnologías en Entornos hostiles) de la Universidad de Zaragoza, citado en el capítulo de antecedentes y objetivos de este proyecto, y que se adjunta en el *anexo 1*.

Con estas consideraciones previas, se determinó una zona de aproximadamente 15 Ha, para realizar la toma de datos necesaria para el levantamiento. La escala del mismo se fijo en 1/500, considerando esta escala más que suficiente para las aplicaciones a las que se puede destinar este levantamiento, así como el nivel de detalle a representar, ya que se trata de una zona de campo abierto, con escasa vegetación y con un relieve uniforme.

Una vez definidos tanto la zona a levantar como la escala, se debe determinar la precisión del levantamiento, que vendrá impuesta por esta última. Por tanto a escala 1/500, y considerando como límite de percepción visual 0.2 mm, solamente tendrán representación a escala en la cartografía, elementos cuyas magnitudes superen los 0.10 m en la realidad. Para lo cual, y debido a las características del levantamiento, establecemos como incertidumbre máxima en planimetría en los puntos radiados +-0.06 m.

Para llegar a obtener esta precisión en la determinación de los puntos medidos, se debe tener en cuenta la concatenación de los errores producidos, siendo en este caso la unión del error en la determinación de la red, y el error producido en la propia radiación de los puntos. De esta forma el error total se corresponde con la siguiente expresión:

$$e_T = \sqrt{e_{RED}^2 + e_{RADIACIÓN}^2}$$

Por tanto para llegar a obtener una precisión en planimetría por debajo de los 6 cm, y teniendo en cuanta que la precisión en el cálculo de la red se establece en 1.5 cm, el error producido en la radiación de los puntos medidos debe ser:

$$e_{RADIACIÓN} = \sqrt{e_T^2 - e_{RED}^2} = \sqrt{0.06^2 - 0.015^2} = 0.058m$$

La realización del levantamiento se planificó, siguiendo dos metodologías distintas; utilizando una estación total radiando los puntos necesarios, o bien mediante la utilización de receptores GPS en RTK. La observación con ambos métodos se planificó previamente de la siguiente forma:

6.2.1.1 Planificación del levantamiento con estación total:

Se planificó el uso de una estación total, para la realización parcial del levantamiento topográfico, por las características del terreno a levantar; de relieve suave y horizonte despejado, así como por la imposibilidad de utilizar instrumentación GPS, en parte de las fechas elegidas para la realización del levantamiento.

El levantamiento, debe estar condicionado a la precisión establecida a priori para el mismo, por tanto se ha de determinar la precisión del método empleado. Al utilizar una estación total y realizar una radiación, el error cometido en la determinación planimétrica de un punto se debe a dos factores:

1) El error producido por la incertidumbre en la medida angular, o también denominado "Error transversal"

2) El error producido por la incertidumbre en la medida de distancias, o también denominado "Error longitudinal"

Por tanto se debe realizar un estudio previo, para conocer de antemano un valor aproximado de estos errores:

1) "***Error transversal***"

   Se debe a la incertidumbre introducida por la medida angular realizada, y tiene la siguiente expresión:

$$e_t = e_a \sqrt{2} D \qquad \text{Siendo} \qquad e_a = \sqrt{e_p^2 + e_v^2 + e_d^2 + e_l^2}$$

   e_p= error de puntería: error producido cuando el operador considera la puntería realizada al punto como correcta, cuando no lo es. Este valor se determina empíricamente entre los siguientes valores

$\frac{30^{cc}}{A} \langle e_p \langle \frac{60^{cc}}{A}$ Siendo A el número de aumentos del antejo, en este caso 30 x

e_v= error de verticalidad: error producido por la falta de verticalidad del eje principal del instrumento. En este caso la estación a utilizar dispone de un compensador electrónico central de dos ejes, cuyo rango de estabilización se encuentra entre 0.5´´ y 1.5´´, por lo que el error producido se limita entre estos valores.

e_d = error de dirección: error producido por observar según una dirección distinta a la que se pretendía, como consecuencia de las imprecisiones en el centrado del instrumento y en el centrado de la señal que materializa el punto a visar. Este error obedece a la siguiente expresión:

$e_d = \frac{e_{estación} + e_{señal}}{D}$ Siendo los errores producidos en el centrado del instrumento y centrado de la señal valores establecidos de forma empírica.

e_l = error de lectura: error producido en la lectura de la medida, siempre que hay una parte que se debe estimar. En este caso se puede establecer como ½ del redondeo utilizado por el instrumento. La estación a utilizar muestra, como último salto en pantalla 1´´ por lo que este error se puede estimar en ½´´.

Conocidas las características técnicas de la estación a utilizar, se determina el error transversal, en este caso, siempre se encuentra por debajo de los seis centímetros, cuando se radien puntos a una distancia teórica inferior a dos kilómetros. En la práctica las distancias a los puntos a levantar, nunca serán superiores a los 250 m. De esta forma se asegura el cumplimiento de la tolerancia establecida a priori, por influencia del error transversal.

2) "Error Longitudinal"

Se entiende como error longitudinal, al error producido por la incertidumbre ocasionada en la posición del punto radiado, debido a la distancia medida. Este error se determina mediante la siguiente expresión:

$$e_l = \sqrt{e_{estándar}^2 + e_e^2 + e_s^2 + e_j^2}$$

$e_{estándar}$= error en la medida de distancias: en este caso la estación a utilizar tiene un distanciometro cuyo error estándar se establece en: 2mm + 2ppm

e_e y e_s = error de estación y error de señal: se establecen valores empíricos, tal y como se ha citado en el apartado anterior, para el cálculo del error de dirección.

e_j= error de jalón: se debe a la falta de verticalidad del jalón a la hora de materializar el punto a visar. Este error se encuentra directamente relacionado con la sensibilidad del nivel esférico a utilizar y con la altura del jalón. En este caso se establece un valor de 2 cm.

De esta forma, y aún limitando la distancia a radiar a 3 kilómetros, el error longitudinal se establece en torno al centímetro.

En este caso, como los errores actúan en direcciones perpendiculares, no se puede considerar el error máximo, como la componente cuadrática de los dos, sino que se considera como error máximo el mayor de los dos. Se demuestra como el error transversal es mucho más restrictivo que el error longitudinal. Es decir, a igual distancia se produce un error transversal mucho mayor que el error longitudinal. Por tanto establecemos como distancia límite a radiar, la que provoque el mayor error admisible. De forma que establecemos como error máximo el error transversal, que con la premisa de radiar puntos cuya distancia a la estación sea menor de 250 m, la incertidumbre en la determinación planimétrica de los puntos se sitúa en 1 cm, cumpliendo ampliamente la precisión establecida a priori para el levantamiento, en función de la escala.

6.2.1.2 Planificación del levantamiento mediante técnicas GPS

Para la realización del levantamiento mediante técnicas GPS, se planificó una observación en tiempo real o RTK. Por tanto para poder trabajar en tiempo real es necesario un equipo que incorpore el software adecuado en la unidad de control, así como un sistema de transmisión de datos que permita la obtención de los mismos al instante. En sí este método de trabajo, no es un tipo de posicionamiento GPS, sino una manera de calcular las líneas base que se originan, al utilizar un posicionamiento diferencial.

Este método de trabajo, se consigue estableciendo una comunicación en directo entre el equipo que actúa como fijo y el móvil, de tal forma que las ambigüedades se resuelven en el momento de la toma de datos y es, en ese mismo instante, cuando se calculan las líneas-base requeridas, es decir las coordenadas del receptor móvil, respecto al fijo. Una de las limitaciones principales de este método de trabajo, es el radio de alcance de las comunicaciones entre equipos. Esta comunicación se realiza a través de un radio-modem que incorpora cada equipo, cuya alcance máximo es de aproximadamente cinco kilómetros. Por tanto en la zona a levantar, siempre se asegura la comunicación entre equipos, tanto por las distancias entre ellos (inferiores siempre a 500 m), como por posibles apantallamientos de la señal de radio, ya que el terreno se encuentra totalmente despejado.

La precisión de este método, a la hora de determinar los puntos medidos, se establece en 10mm + 1ppm, lo cual para las magnitudes de las líneas base a calcular, siempre inferiores a 500 m, se fija en 15 mm de incertidumbre como máximo.

De esta forma, aunque en el levantamiento se utilicen dos métodos de trabajo distintos, se asegura una precisión homogénea en la determinación de los puntos medidos, trabajando siempre en las condiciones previstas.

6.2.2 Observación y cálculo

A la hora de realizar el levantamiento, y con las consideraciones establecidas previamente, el trabajo a realizar consiste en discretizar, con la precisión adecuada una superficie continua como es el terreno real. Para ello se deben medir los puntos adecuados, con una distribución homogénea y en función de las características propias del relieve.

Se deben tomar en el levantamiento, todos aquellos puntos que definan estructuralmente la superficie real, para lo cual se deben determinar todas las líneas de ruptura, así como puntos y elementos singulares del terreno. Además de estos últimos se tomará una nube de puntos de relleno, que describan la superficie a cartografiar. A la vez se deben medir, todos aquellos puntos que lleven asociada alguna información de interés para la temática de la cartografía. En este caso se toman, árboles, roquedos, pozos, vallas y cualquier elemento localizable en la cartografía de interés para su localización.

Como se ha expuesto anteriormente, se han elegido dos métodos de trabajo distintos para la realización del levantamiento, por lo tanto el proceso de observación y cálculo es distinto también.

6.2.2.1 Observación y cálculo con estación total

Esta observación, fue la primera que se realizó en campo. En este caso se partió de la base “Mirador”, en la que se estacionó el instrumento, y se comenzaron los trabajos. En primer lugar se observaron tres puntos, que luego se observarían mediante G.P.S., para realizar una transformación de coordenadas y se comenzó dotando a esta base de un sistema de coordenadas local arbitrario, orientado aproximadamente al norte geográfico.

Una vez estacionado el instrumento en la base de partida, se radiaron los puntos necesarios, siempre a una distancia inferior de 250 m para garantizar la precisión establecida a priori. La radiación se llevó a cabo con dos prismas sobre sus correspondientes jalones, para agilizar la toma de datos en campo. Las observaciones se registraron automáticamente en la memoria de la estación, la cual mediante el software adecuado muestra y almacena en memoria directamente, las coordenadas de los puntos medidos, según las observaciones realizadas. Por tanto se genera un fichero que posteriormente se utilizará, con las coordenadas de todos los puntos medidos, en el sistema de coordenadas local establecido previamente. En este archivo, además de la tripleta de coordenadas correspondiente, se generó un campo en el que se codificaron los puntos, para su correcta interpretación posterior, a la hora de generar la cartografía.

De esta forma se registraron 1114 puntos, que posteriormente se completarían con los medidos mediante técnicas G.P.S.

6.2.2.2 Observación y cálculo mediante técnicas G.P.S

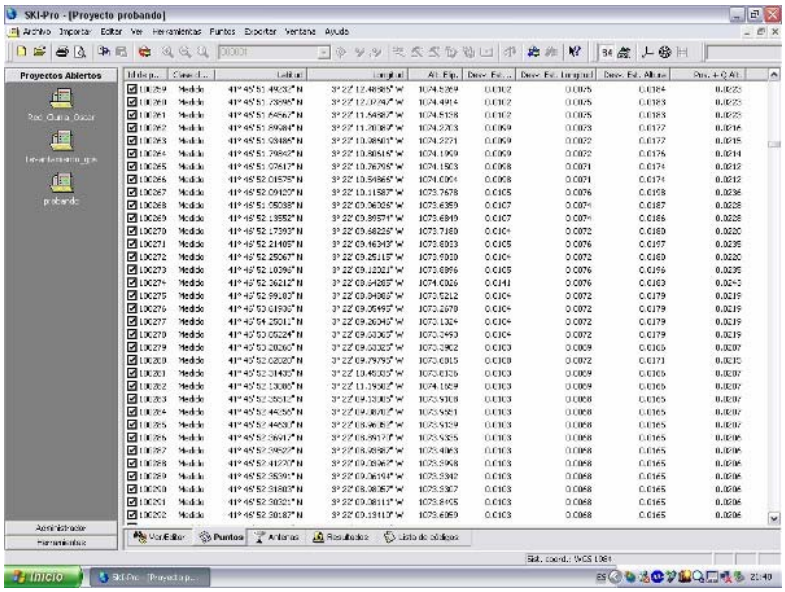
Tal y como se planificó esta observación se realizo mediante RTK, realizando un posicionamiento relativo en tiempo real. Para ello se utilizaron tres receptores GPS, uno de ellos utilizado como receptor de referencia estacionado en la base 2000, y los otros dos utilizados como receptores móviles.

Una vez configurados los receptores, según su función (referencia o móvil), se comenzó la observación. En este caso las coordenadas de la base 2000 ya se conocían con anterioridad, debido a la observación y cálculo de la red. Se eligió esta base como referencia, por su cercanía a la zona a levantar, y su buena situación, alejada del tránsito de visitantes, ya que la base "Mirador" constituía una mejor ubicación geométrica, pero con mayor riesgo debido a la afluencia de visitantes a este punto.

A la hora de realizar la observación en campo, con los tres equipos en funcionamiento, si el número de satélites sobre el horizonte y su geometría es válida, los receptores móviles fijan las ambigüedades en poco tiempo, de manera que una vez realizado este cálculo la determinación de las coordenadas de los puntos a levantar es prácticamente instantánea. Para ello se utilizo una antena GPS, sobre jalón, situando éste en los puntos a levantar, y comprobando que en cada punto medido se cumplían las condiciones necesarias.

De esta forma se registraron en el módulo de memoria del receptor G.P.S las coordenadas de los puntos medidos, en el sistema de coordenadas ETRS-89, que posteriormente se tratarían de forma adecuada con el software Leica Sky-Pro 4.0.

Una vez volcados e importados los datos mediante dicho software, se obtienen automáticamente las coordenadas de los puntos medidos así como su precisión, tal y como se muestra en la siguiente pantalla:



La nube de puntos obtenida, se encuentra expresada en el sistema de coordenadas ETRS-89, por lo que aplicando la transformación calculada en el apartado anterior en el cálculo de la red, obtendremos dichos puntos en el sistema ED50, con proyección UTM.

De esta forma se registraron los puntos necesarios, para completar el levantamiento que se comenzó a realizar con estación total, cubriendo finalmente una extensión de aproximadamente 16 Ha. Se registraron 2027 puntos mediante técnicas GPS, completando por tanto los 1114 puntos tomados mediante estación total. En estos puntos levantados mediante GPS, se consiguieron unas precisiones en planimetría en torno a 1 cm y 2 cm en altimetría, tal y como cabía esperan.

Por tanto, el resultado obtenido mediante ambos métodos, es una nube de puntos, con precisiones similares, pero en dos sistemas de coordenadas distintos. Por una parte, los puntos medidos con estación se encuentran en un sistema de coordenadas local arbitrario; mientras que los medidos por técnicas G.P.S se encuentran en un sistema global de coordenadas, ED50 tras aplicarles la transformación previamente calculada, para pasar de coordenadas ETRS-89 a ED50, con proyección UTM. Para poder fusionar los datos y confeccionar una nube de puntos en un mismo sistema de coordenadas, es necesario realizar una transformación de coordenadas.

La transformación elegida es una transformación clásica 2D, ya que al tratarse de una extensión de terreno reducida, la transformación en altura, se considera únicamente como un cambio del plano de comparación, sin que ello produzca errores considerables. Para el cálculo de la transformación, utilizamos el módulo "Datum and Map", del software Leica Sky-Pro 4.0. Procedemos de forma similar al cálculo de la transformación de coordenadas entre el sistema ETRS-89 y ED50 con proyección UTM, realizado para el cálculo de la red.

En este caso la transformación clásica 2D, queda definida mediante cuatro parámetros, traslación en X, traslación en Y, rotación en Z, y cambio de escala. Por tanto son necesarios al menos dos puntos en ambos sistemas para resolver el cálculo de los parámetros. En nuestro caso observamos cinco puntos en ambos sistemas de coordenadas, como son: 2000, estaca1, estaca2, aparca y mirador. Para el cálculo de la transformación utilizamos cuatro de ellos: aparca, estaca1, estaca2 y mirador, teniendo aún datos redundantes. Una vez calculada la trasformación de coordenadas, del sistema local arbitrario, al sistema global ED50, aplicamos los parámetros de la transformación a la base 2000, y comprobamos que obtenemos como resultado, las coordenadas calculadas de esa base, en el sistema ED50.

El informe generado por el módulo Datum And Map, de la transformación realizada es el siguiente:

Informe de Transformación Clásica 2D

Sistema A Clunia_Estación_osc	Sistema B	Clunia_ED50_osc
Elipsoide: -	Elipsoide:	International (Hayford)
Proyección:-	Proyección:	UTM_30
Sistema: -	Sistema:	-

Parámetros de Transformación

Número de puntos comunes:		4	
Origen de rotación:	X0	996.9658	m
	Y0	1207.9298	m

Núm.	Parámetro:	Valor	e.m.c.	Unidad
1	dX de Desplazamiento	468391.4282	0.0026	m
2	dY de Desplazamiento	4624863.3088	0.0026	m
3	Rotación sobre Z	-42799.14754	2.17517	"
4	Esc.	-568.9872	10.5515	ppm

Sigma a priori: 1.0000 Sigma a posteriori: **0.0053**

Residuales m

Sistema A	Sistema B	dE	dN
aparca	aparca	-0.0031	-0.0028
estaca1	estaca1	-0.0058	0.0003
estaca2	estaca2	0.0056	-0.0016
mirador	mirador	0.0033	0.0040

Como se puede observar en el informe generado, la precisión en la transformación se encuentra por debajo del centímetro, y en el peor de los casos es de 58 mm, precisión mas que suficiente para el objetivo buscado.

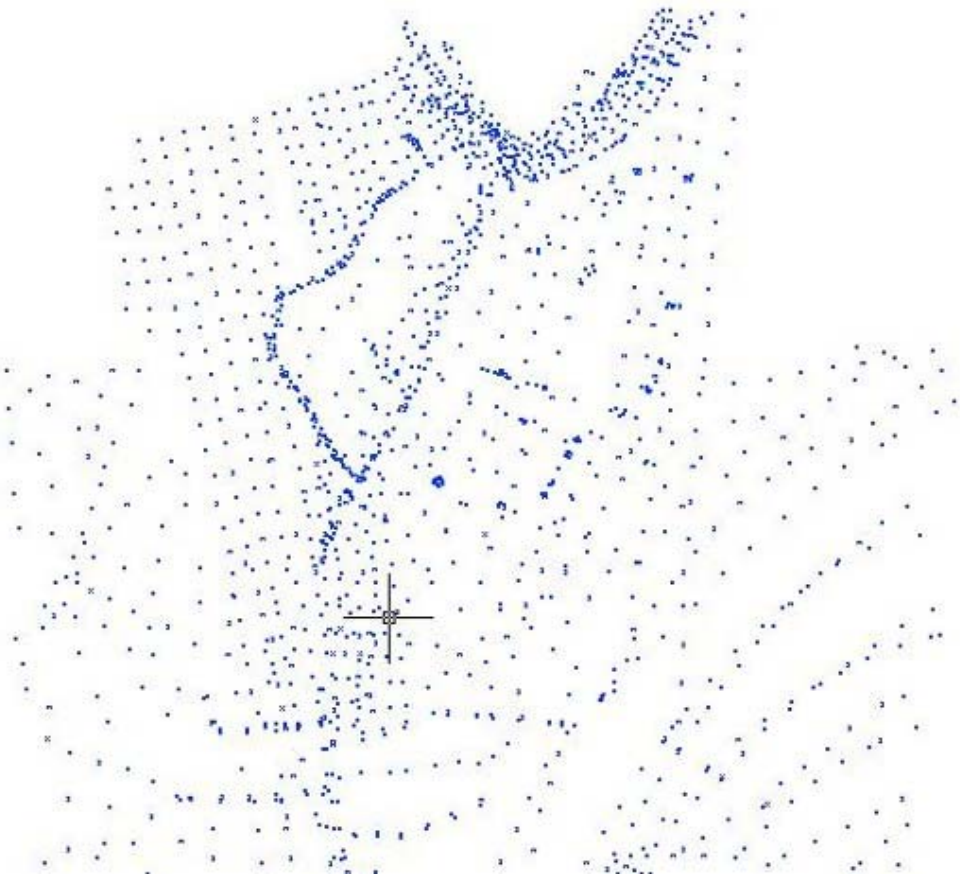
Al utilizar este tipo de transformación de dos dimensiones, la altimetría permanece invariable, siendo necesario el cálculo de una transformación independiente para la altimetría. En este caso debido a las reducidas dimensiones de la zona a estudio, se optó por realizar un cambio del plano de comparación, calculando los incrementos de altitud entre ambos sistemas de coordenadas, al disponer como en el caso anterior de cinco puntos medidos en los dos sistemas:

	H ortométrica Sistema ED-50	*Z (Sistema Local)*	*Diferencia*
Estaca1	1002,086 m	477,824 m	524,262 m
Estaca2	1002,869 m	478,604 m	524,265 m
Aparca	1020,584 m	496,321 m	524,263 m
4000	1009,396 m	485,133 m	524,263 m
Mirador	1024,268 m	500,000 m	524,268 m

Como se puede observar las diferencias entre las coordenadas en los dos sistemas, se mantienen prácticamente constantes, por lo que se ha optado por utilizar un valor medio para variar el plano de comparación, ya que los residuos obtenidos en el peor de los casos son de 4 mm.

De esta forma se calcula la altura ortométrica de los puntos medidos, mediante la suma de 524,264 m a todos ellos, variando por tanto el plano de comparación a utilizar.

Finalmente obtenemos una nube de puntos, con su correspondiente codificación, en el sistema de coordenadas ED50, utilizando la proyección UTM, tal y como se muestra en la siguiente imagen:



Nube de puntos obtenida

6.2.3 Realización de la cartografía

Una vez observado y calculado el levantamiento topográfico, obtenemos una nube de puntos que hemos de representar a la escala elegida. Para ello utilizamos el software MDT 4.0 sobre AutoCad 2002Esp.

Partimos de un archivo de texto con las coordenadas y códigos de todos los puntos, ordenados de la siguiente forma: número de punto, coordenada x, coordenada y, altura ortométrica, y código. Importamos todos los puntos medidos, con sus correspondientes códigos, a partir de los cuales realizaremos la representación adecuada de la superficie.

Para ello en primer lugar, definimos las líneas de ruptura medidas, cabezas y pies de talud, y el contorno de la superficie que se define con los puntos tomados. Este paso es fundamental para la realización de un modelo digital correcto y acorde con la realidad. Posteriormente definimos una superficie, realizando una triangulación, y finalmente obtenemos el curvado de dicha superficie, con una equidistancia de curvas de nivel de 0.5m. Mediante este proceso obtenemos la representación gráfica del levantamiento realizado, tal y como se muestra en la siguiente imagen:

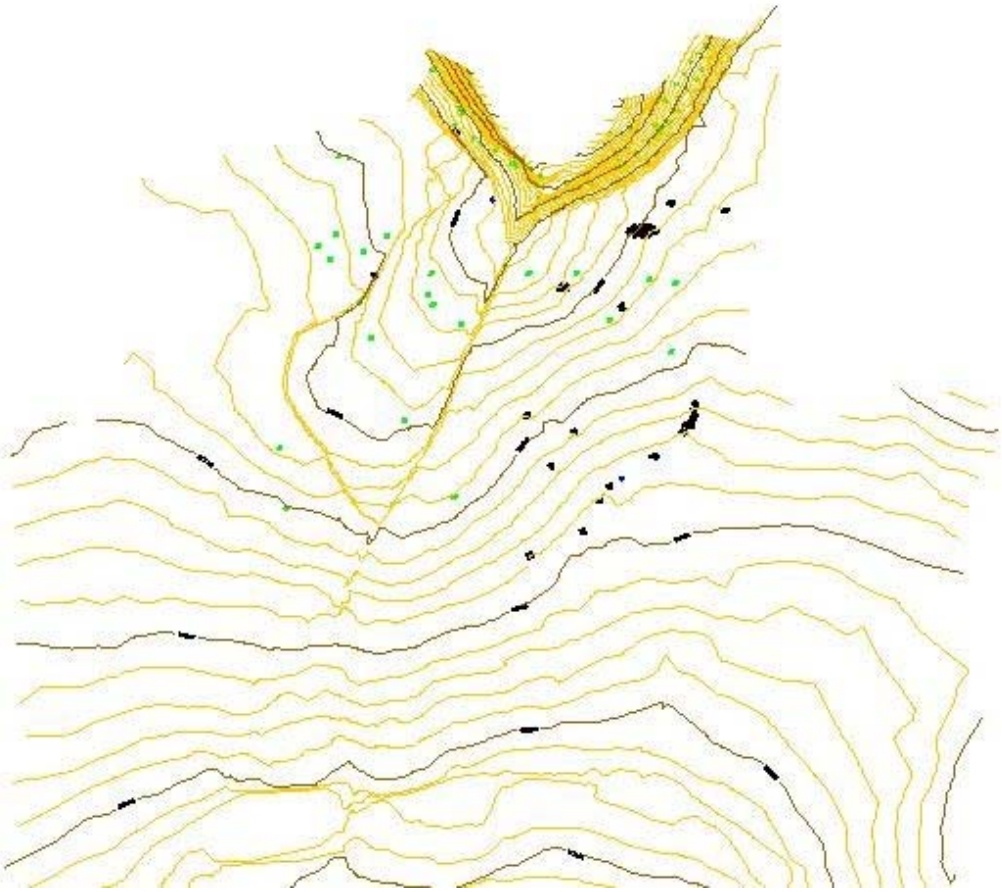


Imagen del curvado obtenido

Finalmente, procedemos a la edición cartográfica, para la correcta representación del levantamiento, cuyo resultado final se adjunta en el capítulo *9.0 Cartografía*

La cartografía que se adjunta, se corresponde con el plano del levantamiento topográfico del terreno con los perfiles observados en planta, así como dichos perfiles.

- ✓ **Levantamiento topográfico**: la confección de la cartografía correspondiente al levantamiento topográfico se ha realizado de acuerdo a la naturaleza del mismo. En este levantamiento; que posteriormente servirá de base cartográfica para los perfiles gravimétricos, se intenta representar todos aquellos aspectos necesarios, para poder discretizar la realidad a estudio. Por tanto la representación del relieve se realiza mediante curvas de nivel, siendo la equidistancia elegida de 0,5 m, de acuerdo con la escala del mapa 1:500.

  En cuanto a la información a representar en planta, en este caso se limita a la escasa vegetación existente, árboles y arbustos, así como elementos artificiales de interés, cerramiento y bases topográficas.

  Para la representación de estos objetos se ha utilizado una simbología que aún siendo lo más sencilla posible, evoque el objeto representado rápidamente, por su geometría y color. En el caso de los árboles y arbustos, se han utilizado símbolos de color verde, que hacen referencia a los objetos representados. De igual forma para representar tanto el cerramiento metálico, como las bases topográficas, se ha utilizado una simbología sencilla y de fácil interpretación, de forma que hace casi innecesaria la consulta a la leyenda gráfica.

- ✓ **Perfiles gravimétricos**: para la elaboración gráfica de los perfiles gravimétricos, se ha utilizado el software MDT4.0 sobre AutoCad2002.Esp. En este caso se ha confeccionado un modelo digital utilizando los puntos observados en cada perfil, con sus coordenadas planimétricas correspondientes, y asignándole a cada uno de ellos como coordenada Z, el valor de la anomalía residual calculada.

  Partiendo de este modelo digital, se han confeccionado unos perfiles en la misma posición en la que se ha realizado la observación gravimétrica. Debido a la diferencia en la magnitud de los valores representados, se ha optado por aplicar un factor de exageración vertical de cinco, de forma que la escala horizontal es 1:500 mientras que la vertical es 1:100. De esta manera se facilita la interpretación de los resultados mediante su representación gráfica.

  En los perfiles realizados se muestran los valores de las anomalías residuales en unidades de miligal, así como las distancias a un eje teórico centrado en el trazado de la galería.

- ✓ **Perfiles gravimétricos en planta**: para la representación de los perfiles gravimétricos en planta, se ha utilizado la cartografía correspondiente al levantamiento topográfico como base. Posteriormente se han representado en planta los perfiles observados, superponiendo un sombreado en un color

difuminado, correspondiente al trazado teórico de la galería según los estudios previos.

Para facilitar la representación e interpretación de los valores obtenidos, y de forma complementaria a los perfiles gravimétricos, se ha optado por representar en planta las diferencias más importantes entre los valores de anomalías residuales. Se ha optado por representar diferencias y no valores absolutos, ya que los que se busca son interrupciones o discontinuidades, dentro de la tendencia de los valores de anomalías residuales, que pongan de manifiesto la existencia de cavidad subterránea.

Para representar este valor, se ha elegido una representación superficial de manera que la superficie representada en el punto, es proporcional al valor del incremento de anomalías residuales. A su vez se ha optado por representar en cada perfil únicamente el valor más relevante, que en todos los casos coincide con una posición más o menos central dentro del perfil, y que se correspondería con un punto sobre la vertical de la cavidad subterránea a estudiar.

6.3 Levantamiento gravimétrico

El levantamiento gravimétrico a realizar, tiene como objeto poner de manifiesto las anomalías de la intensidad de la gravedad, producidas por los defectos de masa propios de existencia de una cavidad subterránea, así como la posibilidad de localizar dichas cavidades mediante la prospección gravimétrica.

6.3.1 Diseño del levantamiento

A la hora de diseñar la realización del levantamiento gravimétrico, se debe estimar previamente el orden de magnitud de las anomalías de gravedad buscadas, para establecer de esta forma la precisión a priori del método, así como su viabilidad práctica.

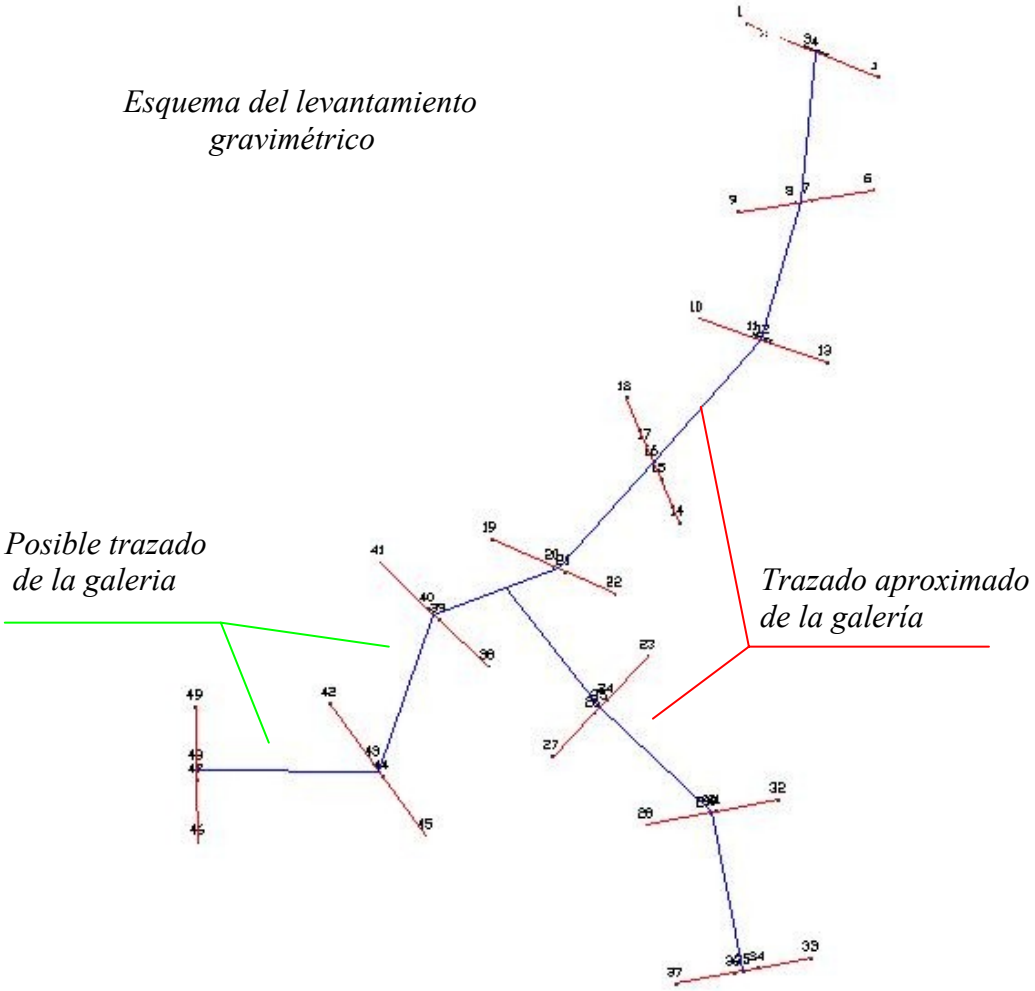
En este caso, las anomalías producidas se deben a la existencia de una galería subterránea, cuyo trazado se ha cartografiado de forma aproximada, e incompleta, mediante un recorrido físico de la misma, utilizando brújula y cinta métrica. La imposibilidad de recorrer físicamente todo el trazado de las galerías, se debe al riesgo que conlleva, al ser cavidades naturales que han servido para el abastecimiento de agua a la antigua ciudad romana, más concretamente a los conjuntos termales. Por tanto el riesgo de derrumbamiento en algunas zonas es importante, existiendo zonas que ya se encuentran derrumbadas, y otras cuyo acceso es complicado y reservado únicamente a espeleólogos experimentados.

La característica geométrica fundamental de la cavidad a estudiar, radica en su carácter lineal, por lo tanto se deberá realizar un levantamiento gravimétrico lineal, de itinerario o de perfil. Para el diseño de este levantamiento se diseñaron una serie de perfiles transversales, atendiendo a las siguientes pautas geométricas:

- La longitud total de los perfiles es de cincuenta metros, formados por cuatro o cinco puntos según las dimensiones aproximadas de la galería en cada caso. Así mismo al menos dos puntos los extremos de cada perfil, no se encuentran sobre la vertical de la cavidad que produce el defecto de masa. De esta forma se pueden comparar incrementos en los valores de las anomalías de gravedad, entre puntos situados fuera y dentro de la traza de la galería.

- Los perfiles se encuentran separados una distancia máxima de sesenta metros, procurando situarlos en las posiciones más favorables, para poder detectar las anomalías causadas. Por tanto se deben situar en las zonas donde se estima que la galería o cavidad tiene mayores dimensiones.

De esta forma en la zona a estudio de la galería, se establecen ocho perfiles, sobre trazado aproximado, así como tres perfiles más sobre un hipotético trazado de la galería. En total se observan once perfiles, formados por 48 puntos.



Para el diseño del levantamiento, se ha utilizado la cartografía aproximada, proporcionada por el grupo de investigación del yacimiento. De esta forma se han distribuido los perfiles sobre el trazado de la galería, en distintas zonas de forma que la sección afectada de la galería varía desde los 6 m hasta los 15 m de anchura. Por tanto, y teniendo en cuenta una altura media de 2 m, se puede realizar un cálculo previo que determine el efecto producido sobre el valor de la gravedad, de un defecto de masa de estas dimensiones.

Para este cálculo intentamos asemejar la cavidad a estudiar, con una forma geométrica sencilla.Se puede aproximar a un cilindro horizontal, de forma que para determinar el radio del cilindro horizontal que produciría el mismo efecto que la cavidad buscada, se pueden igualar las secciones de la galería con la sección del hipotético cilindro:

Para una sección tipo A:

6 m de ancho x 2 m de alto = 12 m^2

$$12m^2 = \pi R_A{}^2 \Rightarrow R_A = \sqrt{\frac{12}{\pi}} = 1.95m$$

Siendo R_A el radio del cilindro horizontal correspondiente a la sección A.

Para una sección tipo B:

15 m de ancho x 2 m de alto = 30 m^2

$$30m^2 = \pi R_B{}^2 \Rightarrow R_B = \sqrt{\frac{30}{\pi}} = 3.09m$$

Siendo R_B el radio del cilindro horizontal correspondiente a la sección B.

Por tanto se debe calcular el efecto de un cilindro horizontal de radio R_A ,ó R_B , de forma que se obtendrán el mínimo y máximo valor respectivamente, de variación de la fuerza de la gravedad producido por el defecto de masa provocado por la galería a estudiar.

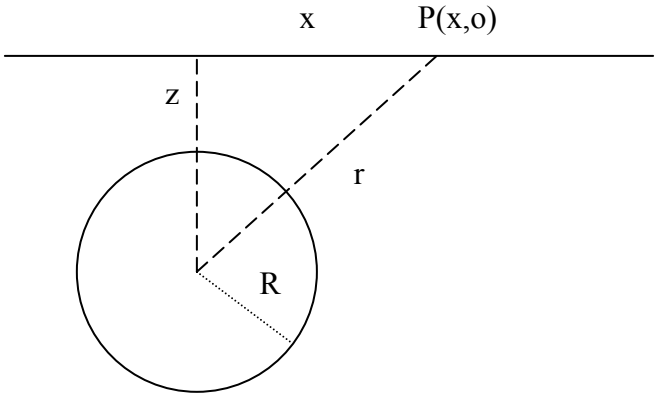
Se puede demostrar que el efecto de un cilindro horizontal de radio R, enterrado a la profundidad z sobre la masa unidad colocada en un punto P(x,o), tal y como se muestra en la *figura 6.3.1*, es equivalente al que resultaría se tuviese su masa concentrada en el eje del cilindro, y que este efecto es:

$$g_z = G\frac{2mz}{r^2}$$

Siendo m, la masa por unidad de longitud por lo que: $m = \pi R^2 \rho$ de forma que la expresión anterior quedaría:

$$g_Z = 2\pi G\rho R^2 \frac{z}{z^2 + x^2}$$

Figura 6.3.1



El valor de g_z será máximo cuando x=0, denominando a este valor como g_0:

$$g_0 = \frac{2\pi G\rho R^2}{z}$$

Siendo en la anterior expresión:

π = numero pi
G = constante de gravitación universal (6.67 10-8 din cm^2 gr^{-2})
ρ = diferencia o contraste de densidades (gr/cm^3)
R = radio del cilindro considerado (cm)
z = profundidad del cilindro, respecto al punto de estación (cm)

Introduciendo todos estos valores en el sistema cegesimal, la expresión anterior nos proporcionará el valor de g_0 en gales, multiplicando dicho valor por 1000 para obtenerlo en miligales.

De esta forma podemos calcular el valor de g_0, planteando distintas hipótesis. En la expresión anterior dicho valor esta en función del contraste de densidades, del radio del cilindro y de su profundidad. El contraste de densidades, se establece como $\rho = 2.67 gr/cm^3$, al considerar que existe un defecto de masa en forma cilíndrica, que se encuentra rodeado de un material cuya densidad es la densidad media terrestre.
Los otros dos parámetros son variables, estableciendo en el caso del radio R del cilindro, las secciones tipo A y B, mínima y máxima respectivamente. En cuanto a la profundidad del cilindro, z, se suponen tres posiciones distintas: a 5m de profundidad, situación aproximada de la galería en su parte Norte, ya que es la diferencia de altitudes entre la boca de la Cueva de Román, y la superficie del terreno sobre el que se realizan las observaciones, a 10 m de profundidad, como situación intermedia, y a 20 m de profundidad como valor máximo dentro de la zona de estudio, proporcionado por el estudio de radiolocalización efectuado por el GTE de la Universidad de Zaragoza.

Los valores obtenidos en cada caso, se corresponden con la siguiente tabla:

g_0	**R=3,09 m**	**R= 1,95 m**
z=5 m	0,21 mGal	0,09 mGal
z=10 m	0,11 mGal	0,04 mGal
z=20 m	0,05 mGal	0,02 mGal

Por tanto, se debe de emplear un método que garantice la percepción de variaciones de la fuerza de la gravedad, entre 0,21 y 0,02 mGal. El gravímetro a utilizar tiene una precisión nominal de 0,01 mGal, aunque observando trabajos anteriores realizados en proyectos de esta escuela, se puede observar como la desviación estándar de las medidas una vez realizado el correspondiente ajuste de las mismas, se sitúa en torno a los 0,02 mGal. De esta forma el caso más desfavorable planteado, corresponde a un cilindro de

radio 1,95 m a 20 m de profundidad, no podría ser detectado ya que la variación producida se sitúa en torno a la precisión de la observación. En la realidad este caso, no se llega a presentar, ya que en la zona más profunda de la galería, esta tiene siempre dimensiones mayores que las establecidas para la sección tipo A. De esta manera se asegura la validez práctica del método, para las condiciones establecidas de antemano.

Para cumplir estas condiciones teóricas, se debe asegurar que la precisión en la determinación de las coordenadas del punto de observación es suficiente en cada caso. Es decir se deben determinar tanto las coordenadas planimétricas, como la altimétrica del punto de observación, de forma que la incertidumbre en su posición no provoque una variación de la observación gravimétrica mayor que la precisión buscada para dicha observación.

Podemos observar la siguiente tabla, propuesta en el "Curso de prospección gravimétrica" de V.S.Mironov, en la que se relaciona la precisión en el cálculo de anomalías Bouguer y la precisión en la determinación de las coordenadas del punto de observación:

Sección de las isoanomalías del mapa de relación, en *mgal*	Precisión de las anomalías de Bouguer, en *mgal*	Escala del mapa de relación	Error de las cordenadas, en *m*		Error cuadrático medio de las alturas, en *m*
			Límite	Cuadrático medio	
5	±1,5	1 : 1 000 000 1 : 500 000	600 600	±200 200	±5
2	0,8	1 : 200 000 1 : 100 000	240 120	80 40	2,5
1	0,4	1 : 100 000 1 : 50 000	120 60	40 20	1,2
0,5	0,2	1 : 50 000 1 : 25 000	60 30	20 10	0,6
0,25	0,10	1 : 25 000	30	10	0,3
0,20	0,08	1 : 25 000 1 : 10 000	30 12	10 4	0,16 0,16
0,10	0,04	1 : 10 000 1 : 5 000	12 6	4 2	0,08 0,08

Según esta tabla, para llegar a una precisión en la determinación de anomalías de 0,02 mgal, se deduce que el error medio cuadrático en la determinación de las coordenadas planimétricas del punto de observación se sitúa en 1 m.

Por otra parte la determinación de la altimetría de los puntos de observación se debe realizar con la precisión adecuada, teniendo en cuenta que un error de 1 m en la determinación de la altitud, acarrea un error de 0,2 mGal en la determinación de la anomalía Bouguer. En este caso la tabla anterior establece un valor para el error medio cuadrático en la determinación de las alturas de 0,6 m, para asegurar la precisión de 0,2 mGal. Por tanto para conseguir una precisión de 0,02 mGal, el error máximo en la

determinación de la altitud del punto de observación no puede ser superior a los 0,10 m y el error medio cuadrático de 0,06 cm.

Con estas consideraciones, relativas a la precisión de las coordenadas de los puntos de observación, se ha considerado oportuno el replanteo en campo de dichos puntos, mediante una estación total, utilizando el método de replanteo por coordenadas polares; para su definición en planta, así como la utilización de un nivel topográfico, para realizar una nivelación geométrica, y establecer la altimetría de los puntos de observación. De esta forma se asegura la precisión necesaria en la determinación de las coordenadas de los puntos de observación, tal y como se demuestra a continuación:

a) Precisión en las coordenadas planimétricas de los puntos de observación:

Para determinar la precisión con la que se obtienen las coordenadas planimétricas de los puntos de observación gravimétrica, se debe tener en cuenta el error longitudinal y el error transversal, estudiados anteriormente en el capítulo *6.2.1.1 Planificación del levantamiento con estación total*. En este caso, la distancia máxima de radiación, se sitúa por debajo de los 250 m, por lo tanto el error que más influye en la determinación de las coordenadas planimétricas es el error transversal, que se establece en 1cm.

b) Precisión en la coordenada altimétrica de los puntos de observación:

Esta precisión viene determinada por el método de nivelación empleado, así como por las características del mismo. Se ha realizado una nivelación geométrica sencilla, partiendo y llegando a puntos de altitud conocida. El nivel empleado ha sido un Wild NA2000, cuyas características se detallan en el apartado *4. Instrumentación*. Por tanto se puede calcular el error kilométrico; como la incertidumbre existente en un kilómetro que se nivelará con este método, de la siguiente forma:

En primer lugar se determina la incertidumbre en la horizontalidad de la visual:

$e = \sqrt{e_p^2 + e_h^2}$ siendo e_p el error de puntería y e_h el error de horizontalidad.

El error de horizontalidad, en este caso al tratarse de un nivel dotado de un compensador automático electrónico, se determina por las características técnicas del aparato, de forma que:

$$e_h = C_{pr} = 0.9^{CC}$$

Por otra parte el error de puntería se establece mediante la siguiente expresión:

$$e_p = \frac{C_n}{A} K$$

$100^{cc} \leq C_n \leq 150^{cc}$ Por tanto $e_p = 10^{cc}$

1,5<K<2,5

La incertidumbre en una nivelada, será el arco que corresponda al ángulo e, e un radio L, es decir:

$$e_n = eL$$

Sustituyendo los valores anteriores:

$$e_n = \frac{\sqrt{e_p^2 + e_h^2}}{636620^{cc}} L$$

Siendo L la longitud de cada nivelada, y n el número de niveladas necesarias para completar un kilómetro, se determina el error kilométrico como:

$$e_k = \frac{\sqrt{e_p^2 + e_h^2}}{636620^{cc}} L\sqrt{n} = 3{,}5mm$$

Con esta expresión se llegaría a determinar un error kilométrico de 3,5 mm. considerando niveladas de 50 metros como máximo. Por tanto la tolerancia de cierre en cada anillo de nivelación será:

$$T = e_k \sqrt{k}$$

Siendo K la distancia de la línea de nivelación expresada en kilómetros. Por tanto cada anillo deberá cerrar con un error menor o igual a dicha tolerancia, en cuyo caso se procederá a la compensación adecuada en cada caso.

Estas precisiones, son relativas al método empleado para el replanteo y observación en campo. Se debe tener en cuenta que son precisiones "relativas", ya que están inevitablemente afectadas por los errores inherentes a las coordenadas de los datos de partida. Estas coordenadas de partida, están afectadas por los errores propios de la observación de la red, y a su vez por la precisión obtenida en la transformación calculada, para transformar las coordenadas en el sistema de referencia ETRS-89, al sistema ED-50 con proyección UTM. Dichas precisiones son de menor importancia, para este caso en la observación gravimétrica, ya que se pretende poner de manifiesto incrementos en los valores de anomalías de la gravedad, por tanto aunque la precisión absoluta no fuese suficiente, al serlo la precisión relativa, todos los puntos se verán afectados de igual forma, y los incrementos calculados serán perfectamente válidos.

Por este motivo, no se ha estimado la realización de un arrastre de cotas ortométricas desde un clavo de nivelación, ni tampoco la realización de un enlace con la red gravimétrica existente, ya que no son objeto de interés de este proyecto el cálculo de valores absolutos de la gravedad y sus anomalías, sino de valores diferenciales.

6.3.2 Observación

El proceso de observación del levantamiento gravimétrico, se ha divido en dos partes, claramente diferenciadas, por una lado el replanteo de los puntos de observación, y su correspondiente nivelación geométrica, y por otro la observación gravimétrica propiamente dicha.

a) Replanteo de los puntos de observación gravimétrica:

Para señalizar en campo los puntos que posteriormente serían observados con el gravímetro, se opto por el replanteo de los mismos mediante una estación total, y realizando un replanteo por coordenadas polares. Para la señalización de los puntos se utilizaron estacas de madera, clavadas en el terreno, de forma que sobresaliesen unos 2-3 cm del suelo, para facilitar así el posterior estacionamiento del gravímetro sobre estos puntos utilizando el plato nivelante correspondiente.

Punto replanteado

La estación a utilizar, fue la misma que la utilizada para realizar parte del levantamiento topográfico, una estación Leica TCR705. Una vez determinadas en gabinete las coordenadas teóricas de los puntos a replantear, y utilizando el programa de replanteo por polares, propio de la estación, se replantearon estos puntos en campo.

Por otra parte, para la altimetría, se realizó una nivelación geométrica con un nivel digital Wild NA2000. Para la realización de la nivelación, se observaron los anillos formados entre cada perfil gravimétrico, y mediante el método del punto medio, se observaron los desniveles entra cada uno de los puntos del perfil, partiendo y llegando siempre a un punto de altitud, conocida. De esta forma se consigue calcular los incrementos de altitud, entre la parte superior de las estacas que materializan en campo

los puntos de observación gravimétrica. Esto facilita la posterior asignación de cotas ortométricas a cada punto, al enlazar esta nivelación con la red de bases establecida mediante técnicas G.P.S, y transformada adecuadamente al sistema de referencia ED-50.

b) Realización de la observación gravimétrica:

Una vez situados en campo, todos los puntos de interés para la observación gravimétrica con la precisión adecuada, se comenzó la observación gravimétrica.

La observación se realizó mediante anillos, de manera que en aproximadamente una hora, se completaría la observación de cada anillo, formado por dos perfiles. Por tanto se realizaría un cierre de lecturas cada hora de observación, lo que posteriormente facilitaría en gran medida el cálculo necesario. A su vez esta metodología, permite obtener observaciones redundantes, ya que exceptuado los tres perfiles extremos, todos los demás han sido observados dos veces, al pertenecer a dos anillos de observación consecutivos.

El estacionamiento del gravímetro en el punto de observación, se realizó centrando el planto nivelante sobre la estaca que materializa el punto. De esta forma y siguiendo las pautas necesarias para realizar una observación, descritas en el capítulo *4.3 Instrumentación gravimétrica*, se realizaron las observaciones necesarias, llevando a cabo la ejecución de dos lecturas en cada estacionamiento realizado.

Estacionamiento del gravímetro en el punto de observación nº14

Durante la ejecución de la observación gravimétrica se procuró realizar todas las operaciones con total minuciosidad, debido tanto a las precisiones buscadas, como a la naturaleza del sistema de medida.

6.3.3 Cálculo del levantamiento gravimétrico

Una vez realizada la observación en campo, el siguiente paso es el cálculo necesario para determinar las anomalías residuales buscadas.

En primer lugar se procede al tratamiento adecuado de las observaciones gravimétricas. Para ello se realiza la media de las dos lecturas realizadas en cada punto, y posteriormente se calcula el error de cierre de cada anillo, como la diferencia de las lecturas inicial y final, realizadas en el mismo punto, para poder calcular la deriva instrumental.

Una vez calculada la lectura media, se multiplica cada una de ellas por el factor adecuado, según la tabla de calibración del instrumento, para expresar dichas lecturas en miligales. En este caso el factor por el que se deben multiplicar todas las lecturas es el mismo 1.02367 ya que la totalidad de las lecturas se encuentran en el mismo intervalo dentro de la tabla de calibración.

A continuación se calcula el cierre de cada anillo observado, a si como los incrementos de tiempo entre cada observación. Con estos valores se procede al cálculo de la corrección por deriva instrumental, de forma proporcional al tiempo transcurrido entre cada observación. De esta forma se obtiene un listado con los valores observados en miligal, en cada punto corregidos ya de deriva instrumental.

Se obtiene un valor observado para cada punto, por cada observación realizada, de forma que según la planificación del levantamiento en anillos consecutivos, todos los perfiles intermedios, exceptuando los tres perfiles extremos, han sido observados dos veces. Además existen dos puntos el 19 y el 27 observados en tres ocasiones, al formar parte de tres anillos distintos. Por tanto se han realizado observaciones redundantes, y se deberá realizar un ajuste de dichas observaciones para obtener un único valor de cada una, así como la precisión obtenida.

6.3.3.1 Ajuste de la red por mínimos cuadrados

Con los distintos valores obtenidos en las observaciones gravimétricas, se realiza un ajuste por mínimos cuadrados. Para dicho ajuste se emplea el método paramétrico y se plantean los siguientes condicionantes:

a) Se considera como observación, el valor del incremento de lectura observado entre dos puntos. Por tanto las observaciones son $\Delta l_n = l - l_0$, y el número total de observaciones es 85, por lo que n=85.

b) El número mínimo de observaciones necesarias para determinar el sistema planteado es de 47, por lo tanto $n_0 = 47$, de forma que en el ajuste de observaciones se deberán utilizar 47 parámetros. En este caso los parámetros elegidos son los incrementos de lectura ajustados, ó $\hat{\Delta} l_n$.

c) La redundancia del sistema planteado es $n - n_0 = 38$, por lo tanto el sistema tendrá 38 grados de libertad.

d) Se plantean por tanto, 85 ecuaciones con 47 parámetros para resolver el sistema. Las ecuaciones se plantean de la siguiente forma:

$$\hat{\Delta} l_n = \Delta l_n + V_n$$

De esta forma se plantean 84 ecuaciones, correspondientes a los incrementos de lecturas observados. Para completar el número de observaciones necesarias, se plantea otra ecuación relacionando los puntos 19 y 27, únicos observados en tres ocasiones, de manera que la ecuación es la siguiente:

$$\hat{\Delta} l_{18} + \hat{\Delta} l_{19} + \hat{\Delta} l_{20} + \hat{\Delta} l_{21} + \hat{\Delta} l_{22} + \hat{\Delta} l_{23} + \hat{\Delta} l_{24} + \hat{\Delta} l_{25} = \Delta l_{19}^{25} + V_{85}$$

e) Una vez planteadas las ecuaciones, se expresa el sistema en términos matriciales, de tal manera que:

$$V = AX - L$$

Siendo:

A= Matriz de los coeficientes de los parámetros, con una dimensión de 85 filas por 47 columnas.
X= Es el vector de los parámetros incógnita, en este caso los incrementos de lectura entre los puntos observados, siendo sus dimensiones de 47 filas por una columna.
L= Vector de términos independientes, cuyas dimensiones son de 85 filas por una columna.
V= Vector de residuos, cuyas dimensiones coincidirán con las del vector L.

f) Planteado el sistema matricial, se resuelve de la siguiente forma:

$$A^t PA = N$$

$$A^t PL = T$$

$$X = N^{-1} T$$

Siendo P, la matriz de pesos, considerándola en este caso como la matriz unidad, ya que todas las observaciones realizadas, ofrecen igual confianza. De esta manera se obtienen los valores de los incrementos de lectura ajustados.

g) Se calculan de las precisiones obtenidas en el ajuste, de la siguiente forma:

Se calcula la matriz de cofactores $Q_{xx} = N^{-1}$

Se determina también la varianza de referencia a posteriori como:

$$\sigma_0^2 = \frac{V^t PV}{r} = 0{,}000759$$

Con estos valores y empleando la Ley de Propagación de Varianzas y Covarianzas se obtiene, la matriz Σ_{xx}, de varianzas y covarianzas:

$$\Sigma_{xx} = \sigma_0^2 Q_{xx}$$

Los valores de la diagonal principal de esta matriz nos proporcional el valor de las varianzas de los parámetros incógnita, mientras que los términos no diagonales representan las covarianzas de dichos parámetros incógnita.

Finalmente la desviación estándar de los valores de incrementos de lectura ajustados, se obtiene como la raíz cuadrada de las varianzas de los parámetros incógnita. De esta forma se obtiene tres desviaciones estándar distintas:

- $\sigma = 0{,}027 mgal$ para los incrementos de los perfiles extremos, observados una sola vez.

- $\sigma = 0.019 mgal$ para los incrementos de los perfiles intermedios, observados en dos ocasiones.

- $\sigma = 0.018 mgal$ para los incrementos en los que interviene un tercera lectura.

De esta forma obtenemos un listado con los incrementos de lectura, así como sus precisiones, siendo estas últimas válidas para el objeto del estudio, según lo expuesto en el apartado *6.3.1 Diseño del levantamiento*.

6.3.3.2 Cálculo de correcciones

En primer lugar, tanto para el cálculo de correcciones, como para el cálculo de anomalías, es necesario conocer dos parámetros:

- Las coordenadas de los puntos de observación gravimétrica, con la precisión necesaria.
- El valor absoluto de la gravedad en algún punto, para poder enlazar las observaciones incrementales realizadas, a la red gravimétrica.

El primer parámetro es conocido, ya que las coordenadas de los puntos, se han calculado previamente, según la posición deseada para su posterior replanteo. En cuanto a la altimetría de los puntos, también son conocidas sus cotas ortométricas, ya que partiendo de la red de coordenadas observada, se ha realizado una nivelación geométrica, entre los puntos replanteados, para así conocer de antemano este valor.

En cuanto al segundo parámetro, el valor de la gravedad absoluta en algún punto de la observación, se ha prescindido de la utilización de un valor verdadero, ya que el objeto de este proyecto es el cálculo de anomalías residuales. En el cálculo de dichas anomalías se basa en la diferencia entre las anomalías de Bouguer y las anomalías regionales. Por tanto si asignamos un valor aleatorio de gravedad absoluta a un punto, dicho valor influirá de igual manera en el cálculo de las anomalías Bouguer, como en las anomalías regionales, de manera que al calcular su diferencia este valor desaparece.

Si el objeto del proyecto fuese el cálculo de las anomalías Bouguer, este procedimiento no sería el adecuado, siendo necesario realizar un enlace con la red gravimétrica para poder dotar de gravedad absoluta a los puntos observados.

De esta manera, se asigna de forma arbitraria una valor de gravedad absoluta al primer punto de observado, sumando el valor de 978000 mgal a la lectura obtenida con el gravímetro. A partir de este valor de gravedad absoluta arbitrario, y aplicando los incrementos de lectura observados, calculamos un hipotético valor de gravedad absoluta, para todos los puntos del levantamiento.

Este procedimiento es similar, en cierta forma, a la realización de un levantamiento topográfico, realizado con técnicas G.P.S, mediante un posicionamiento relativo, si las coordenadas del receptor fijo, fuesen unas coordenadas aproximadas o arbitrarias. En este caso el valor de las coordenadas obtenidas de los puntos levantados, en el sistema de coordenadas global utilizado, no serían correctas, pero los incrementos de coordenadas entre los puntos son perfectamente válidos, definiéndose por tanto un sistema de coordenadas local.

Por tanto, mediante este procedimiento obtenemos un listado de valores de gravedad (hipotéticamente absoluta), asociados a puntos cuyas coordenadas nos son conocidas.

El siguiente paso, será la aplicación de las correcciones necesarias a los valores de gravedad, según los condicionantes de la propia observación:

La aplicación de una corrección por marea gravimétrica, queda descartada por el escaso tiempo en el que se realiza la observación, así como por la cercanía de los puntos observados, todos ellos en una radio de unos 200 m respecto a un punto central de la red. Debido a esto la escasa influencia de la marea gravimétrica, se puede considerar igual para todos los puntos o incluso nula.

De igual forma ocurre con las correcciones isostáticas y la corrección topográfica, descartadas por la proximidad de los puntos observados, de forma que las escasas correcciones a aplicar serían similares para todos los puntos.

Finalmente, se considera la aplicación de dos correcciones:

- Reducción de aire libre o Faye
- Reducción de Bouguer simple

Para el cálculo de estas correcciones se emplea una fórmula conjunta, cuyo parámetro es la cota ortométrica de los puntos de observación, de forma que el valor de

la corrección se obtiene multiplicando este parámetro por 0,1967. El valor de esta corrección siempre es positivo, tal y como se ha demostrado en el capítulo *3.2.7.2 Reducciones no isostáticas*.

Tras aplicar estas correcciones, obtenemos los valores de gravedad (hipotéticamente absoluta) necesarios para calcular las anomalías buscadas.

6.3.3.3 Cálculo de anomalías

Tal y como se ha mencionado anteriormente, el objeto de este estudio es el cálculo de anomalías residuales, obtenidas como la diferencia entre las anomalías de Bouguer y las anomalías regionales. Por tanto hemos de calcular ambas anomalías para llegar al valor buscado:

a) Anomalía Bouguer:

El valor de la anomalía Bouguer se determina mediante la siguiente expresión:

$$\Delta_{BouguerSimple} = g_{observada} + \delta_F - \delta_{BouguerSimple} - \gamma_{30}$$

Siendo γ_{30} el valor de la gravedad normal, según la formula de 1930 ó también conocida como fórmula de Cassinis-Silva:

$$\gamma_{30} = 978{,}049(1 + 0{,}0052884\sin^2\varphi - 0{,}0000059\sin^2 2\varphi)$$

Por lo tanto, para calcular esta expresión, necesitamos conocer las coordenadas geográficas de los puntos observados. Conocemos las coordenadas proyectadas según la proyección UTM, y realizamos el paso a coordenadas geográficas ayudados del software de cálculo topográfico TopCal21.

Una vez introducidos adecuadamente, todos los valores en las expresiones anteriores, llegamos a determinar el valor de la anomalía Bouguer. Para ello necesitaríamos el valor de la gravedad observada en cada punto. Tal y como se ha mencionado anteriormente, se ha considerado un valor hipotético, mediante la suma arbitraria de una cantidad a las lecturas obtenidas, por lo que este valor de la anomalía también será un valor hipotético.

b) Anomalía regional

Para el cálculo de la anomalía regional y basándonos en los fundamentos teóricos expuestos en el capítulo *3.2.10.1 Cálculo del mapa residual*, obtenemos los valores de las anomalías regionales mediante un método analítico.

Tal y como se expone en el capítulo citado, la metodología analítica, para el cálculo de estas anomalías es muy variada. En este caso se ha optado por la utilización de un método mixto, entre el método de las medias aritméticas y el método de Griffin. Se han considerado sectores cuya área se encuentra definida entre dos perfiles observados, de

manera que el valor de la anomalía regional, se obtiene como la media aritmética, de las anomalías de Bouguer que presentan los perfiles que delimitan dicho sector.

c) Anomalías residuales:

La determinación de este valor, como ya se ha mencionado anteriormente, es el objeto de este estudio gravimétrico, para a partir de estos valores realizar una interpretación geológica.

Las anomalías residuales se determinan mediante la diferencia existente entre las anomalías de Bouguer y las anomalías regionales:

$$\Delta_{\mathrm{Re}sidual} = \Delta_{Bouguer} - \Delta_{\mathrm{Re}gional}$$

Para el cálculo de las anomalías de Bouguer, se ha utilizado un artificio matemático, de forma que se ha sumado una cantidad constante a las lecturas, para aproximarse a un valor real de la gravedad absoluta. Este artificio se ha transmitido al cálculo de las anomalías regionales, ya que éstas se han obtenido como media aritmética de las anteriores, por tanto también serán el resultado de sumar dicha constante a un valor diferencial.

Al calcular las anomalías residuales como la diferencia de las anteriores, dicha constante se anula, y por tanto se obtienen valores reales para el cálculo de las anomalías residuales.

Nota: Tanto el cálculo matricial del ajuste, como el cálculo de la nivelación geométrica se adjuntan al presente proyecto, en el anexo 4.

7.Presupuesto

7.0 Presupuesto del proyecto

Para la elaboración del presupuesto de ejecución del presente proyecto, hemos supuesto que el trabajo de gabinete se ha desarrollado en una oficina con la infraestructura necesaria para tal fin.

A su vez se han considerado los costes de amortización del diverso instrumental utilizado, así como el coste de mantenimiento de los mismos.

Para la realización del presupuesto, se ha elaborado un esquema con todas las actividades a realizar, especificando en cada caso el equipo humano e instrumental necesario a si como sus respectivos costes.

7.1 Actividades a realizar

1. Actividades previas
   1.1. Planificación del proyecto: 2 días
   1.2. Recopilación de información previa y documentación: 3 días

2. Implantación de la red de coordenadas:
   2.1. Reconocimiento y planificación de la red: 1 día
   2.2. Observación de la red: 2 días
   2.3. Cálculo de la red: 1 día

3. Realización del levantamiento topográfico:
   3.1. Planificación y determinación de sus límites: 1 día
   3.2. Observación en campo: 3 días
   3.3. Volcado de datos y homogenización del los mismos: 1 día

4. Realización del levantamiento gravimétrico:
   4.1. Planificación del levantamiento: 2 días
   4.2. Observación en campo: 3 días
   4.3. Cálculo en gabinete: 3 días
   4.4. Análisis y conclusiones: 2 días

5. Realización de la cartografía:
   5.1. Cartografía del levantamiento topográfico: 3 días
   5.2. Cartografía del levantamiento gravimétrico: 4 días

6. Realización de la memoria del proyecto:
   6.1. Recopilación de documentación previa: 3 días
   6.2. Redacción de memorias: 20 días
   6.3. Impresión y encuadernación: 3 días

7.2 Recursos e Instrumental

Los recursos e instrumental necesario para la realización del presente proyecto, así como sus correspondientes costes unitarios, son los siguientes:

1. Recursos humanos:

   Ingeniero Técnico en Topografía: 160€/dia en campo; 130€/día en gabinete.
   Auxiliar de Topografía: 100 €/día

2. Instrumental Topográfico:

   Gravímetro Lacoste & Romberg
   Coste total = 75 000 €
   Coste de amortización en 6 años = 60 €/día
   + 10% seguro y mantenimiento = 66€/día

   Equipo Leica GPS serie 300 (tres receptores)
   Coste total = 32 000 €
   Coste de amortización en 4 años = 40€/día
   + 5% seguro y mantenimiento = 42€/día

   Nivel digital NA-2000
   Coste total = 5 000 €
   Coste de amortización en 4 años = 6,25€/día
   + 5% seguro y mantenimiento = 6,50€/día

   Estación Total Leica TCR705
   Coste total = 12 000 €
   Coste de amortización en 4 años = 15€/día
   +5 % seguro y mantenimiento = 15,75€/día

3. Equipo informático:

   Ordenador, impresora y escáner: 2200 €
   Plotter HP Desinjet 550: 4000 €
   Software:
   Sistema operativo Windows xp: 100€
   AutoCad: 3500€
   Sky_Pro 4.0: 3000€
   MDT 4.0: 3000€

   Coste total del equipo informático: 15800€
   Coste de amortización en 2 años: 39,5 €
   + 5% seguro y mantenimiento 41,50€/día

4. Desplazamientos y dietas:

Alquiler de vehículo:	25€/día
Combustible:	20€/día
Comidas:	10€/día (sin desplazamiento)
Manutención y alojamiento:	90€ por persona y día. (Con desplazamiento)

5. Materiales utilizados:

Hitos:	10€ unidad
Estacas 40x4x4cm:	3€ paquete de 12 unidades
Papel DinA4:	3€ paquete de 500 hojas
Papel para el plotter:	30€ rollo

7.3 Tablas de costes de las actividades:

7.3.1 Actividades Previas

Actividad	Actividades Previas				
Subactiviadad	Planificación del Proyecto				
Duración	2 días				
Equipo Humano	1 I.Tec. en Topografía	***Coste unidad (€/dia)***	130,00	***Coste Total €***	260,00
Instrumental	Equipo informático	***Coste unidad (€/dia)***	41,50	***Coste Total €***	83,00
Dietas		***Coste unidad (€/dia)***	10,00	***Coste Total €***	20,00
		Coste total de la actividad		**€**	363,00

Actividad	Actividades Previas				
Subactiviadad	Recopilación de información previa y documentación				
Duración	3 días				
Equipo Humano	1 I.Tec. en Topografía	***Coste unidad (€/dia)***	130,00	***Coste Total €***	390,00
Instrumental	Equipo informático	***Coste unidad (€/dia)***	41,50	***Coste Total €***	124,50
Dietas		***Coste unidad (€/dia)***	10,00	***Coste Total €***	30,00
		Coste total de la actividad		**€**	544,50

Total Actividades Previas € **907,50**

7.3.2 Implantación de la red de coordenadas

Actividad	Implantación de la red de coordenadas				
Subactiviadad	Reconocimiento y planificación de la red				
Duración	1 día				
Equipo Humano	1 I.Tec. en Topografía	***Coste unidad (€/dia)***	160,00	***Coste Total €***	160,00
	1 Auxiliar de topografía	***Coste unidad (€/dia)***	100,00		100,00
Transporte	Vehículo	***Coste unidad (€/dia)***	45,00	***Coste Total €***	45,00
Materiales	Hitos	***Coste unidad (€)***	10,00	***Coste Total €***	80,00
	Estacas	***Coste unidad (€)***	0,25	***Coste Total €***	0,75
Dietas		***Coste unidad (€/dia)***	90,00	***Coste Total €***	180,00
		Coste total de la actividad		**€**	565,75

Actividad	Implantación de la red de coordenadas				
Subactiviadad	Observación de la red				
Duración	2 días				
Equipo Humano	1 I.Tec. en Topografía	***Coste unidad (€/dia)***	160,00	***Coste Total €***	320,00
	1 Auxiliar de topografía	***Coste unidad (€/dia)***	100,00	***Coste Total €***	200,00
Instrumental	Equipo GPS	***Coste unidad (€/dia)***	42,00	***Coste Total €***	200,00
Transporte	Vehículo	***Coste unidad (€/dia)***	45,00	***Coste Total €***	200,00
Dietas		***Coste unidad (€/dia)***	90,00	***Coste Total €***	360,00
		Coste total de la actividad		**€**	1280,00

Actividad	Implantación de la red de coordenadas				
Subactiviadad	Cálculo de la red				
Duración	1 días				
Equipo Humano	1 I.Tec. en Topografía	***Coste unidad (€/dia)***	130,00	***Coste Total €***	130,00
Instrumental	Equipo informático	***Coste unidad (€/dia)***	41,50	***Coste Total €***	41,50
Dietas		***Coste unidad (€/dia)***	10,00	***Coste Total €***	10,00
		Coste total de la actividad		**€**	181,50

Total Implantación de la red € **2027,25**

7.3.3 Realización del Levantamiento Topográfico

Actividad	Realización del levantamiento Topográfico				
Subactiviadad	Planificación y determinación de sus límites				
Duración	1 días				
Equipo Humano	1 I.Tec. en Topografía	***Coste unidad (€/dia)***	130,00	***Coste Total €***	130,00
Instrumental	Equipo informático	***Coste unidad (€/dia)***	41,50	***Coste Total €***	41,50
Dietas		***Coste unidad (€/dia)***	10,00	***Coste Total €***	10,00
		Coste total de la actividad		**€**	181,50

Actividad	Realización del levantamiento topográfico				
Subactiviadad	Observación en campo				
Duración	3 días				
Equipo Humano	1 I.Tec. en Topografía	***Coste unidad (€/dia)***	160,00	***Coste Total €***	480,00
	1 Auxiliar de topografía	***Coste unidad (€/dia)***	100,00	***Coste Total €***	300,00
Instrumental	Estación Total	***Coste unidad (€/dia)***	15,75	***Coste Total €***	15,75
	Equipo GPS	***Coste unidad (€/dia)***	42,00	***Coste Total €***	84,00
Transporte	Vehículo	***Coste unidad (€/dia)***	45,00	***Coste Total €***	135,00
Dietas		***Coste unidad (€/dia)***	90,00	***Coste Total €***	540,00
		Coste total de la actividad		**€**	1554,75

Actividad	Realización del levantamiento Topográfico				
Subactiviadad	Volcado de datos y homogenización de los mismos				
Duración	1 días				
Equipo Humano	1 I.Tec. en Topografía	***Coste unidad (€/dia)***	130,00	***Coste Total €***	130,00
Instrumental	Equipo informático	***Coste unidad (€/dia)***	41,50	***Coste Total €***	41,50
Dietas		***Coste unidad (€/dia)***	10,00	***Coste Total €***	10,00
		Coste total de la actividad		**€**	181,50

Total realización levantamiento topográfico € **1917,75**

7.3.4 Realización del levantamiento gravimétrico

Actividad	Realización del levantamiento gravimétrico				
Subactiviadad	Planificación del levantamiento				
Duración	1 días				
Equipo Humano	1 I.Tec. en Topografía	***Coste unidad (€/dia)***	130,00	***Coste Total €***	130,00
Instrumental	Equipo informático	***Coste unidad (€/dia)***	41,50	***Coste Total €***	130,00
Dietas		***Coste unidad (€/dia)***	10,00	***Coste Total €***	10,00
		Coste total de la actividad		**€**	270,00

Actividad	Realización del levantamiento gravimétrico				
Subactiviadad	Observación en campo				
Duración	3 días				
Equipo Humano	1 I.Tec. en Topografía	***Coste unidad (€/dia)***	160,00	***Coste Total €***	480,00
	1 Auxiliar de topografía	***Coste unidad (€/dia)***	100,00	***Coste Total €***	300,00
Instrumental	Estación Total	***Coste unidad (€/dia)***	15,75	***Coste Total €***	15,75
	Nivel digital	***Coste unidad (€/dia)***	6,50	***Coste Total €***	6,50
	Gravímetro	***Coste unidad (€/dia)***	66,00	***Coste Total €***	132,00
Transporte	Vehículo	***Coste unidad (€/dia)***	45,00	***Coste Total €***	135,00
Dietas		***Coste unidad (€/dia)***	90,00	***Coste Total €***	540,00
		Coste total de la actividad		**€**	1609,25

Actividad	Realización del levantamiento gravimétrico				
Subactiviadad	Cálculo en gabinete				
Duración	3 días				
Equipo Humano	1 I.Tec. en Topografía	***Coste unidad (€/dia)***	130,00	***Coste Total €***	390,00
Instrumental	Equipo informático	***Coste unidad (€/dia)***	41,50	***Coste Total €***	124,50
Dietas		***Coste unidad (€/dia)***	10,00	***Coste Total €***	30,00
		Coste total de la actividad		**€**	544,50

Actividad	Realización del levantamiento gravimétrico				
Subactiviadad	Análisis y conclusiones				
Duración	2 días				
Equipo Humano	1 I.Tec. en Topografía	***Coste unidad (€/dia)***	130,00	***Coste Total €***	260,00
Instrumental	Equipo informático	***Coste unidad (€/dia)***	41,50	***Coste Total €***	83,00
Dietas		***Coste unidad (€/dia)***	10,00	***Coste Total €***	20,00
		Coste total de la actividad		**€**	363,00

Total realización levantamiento gravimétrico € **2786,75**

7.3.5 Realización de la cartografía

Actividad	Realización de la cartografía				
Subactiviadad	Levantamiento topográfico				
Duración	3 días				
Equipo Humano	1 I.Tec. en Topografía	***Coste unidad (€/dia)***	130,00	***Coste Total €***	390,00
Instrumental	Equipo informático	***Coste unidad (€/dia)***	41,50	***Coste Total €***	124,50
Dietas		***Coste unidad (€/dia)***	10,00	***Coste Total €***	30,00
		Coste total de la actividad		**€**	544,50

Actividad	Realización de la cartografía				
Subactiviadad	Levantamiento gravimétrico				
Duración	4 días				
Equipo Humano	1 I.Tec. en Topografía	***Coste unidad (€/dia)***	130,00	***Coste Total €***	520,00
Instrumental	Equipo informático	***Coste unidad (€/dia)***	41,50	***Coste Total €***	166,00
Dietas		***Coste unidad (€/dia)***	10,00	***Coste Total €***	40,00
		Coste total de la actividad		**€**	726,00

Total realización de la cartografía € **1270,50**

7.3.6 Realización de la memoria del proyecto

Actividad	Realización de la memoria del proyecto				
Subactiviadad	Recopilación de documentación previa				
Duración	3 días				
Equipo Humano	1 I.Tec. en Topografía	***Coste unidad (€/dia)***	130,00	***Coste Total €***	390,00
Instrumental	Equipo informático	***Coste unidad (€/dia)***	41,50	***Coste Total €***	124,50
Dietas		***Coste unidad (€/dia)***	10,00	***Coste Total €***	30,00
		Coste total de la actividad		**€**	544,50

Actividad	Realización de la memoria del proyecto				
Subactiviadad	Redacción de memorias				
Duración	20 días				
Equipo Humano	1 I.Tec. en Topografía	***Coste unidad (€/dia)***	130,00	***Coste Total €***	2600,00
Instrumental	Equipo informático	***Coste unidad (€/dia)***	41,50	***Coste Total €***	830,00
Dietas		***Coste unidad (€/dia)***	10,00	***Coste Total €***	200,00
		Coste total de la actividad		**€**	3630,00

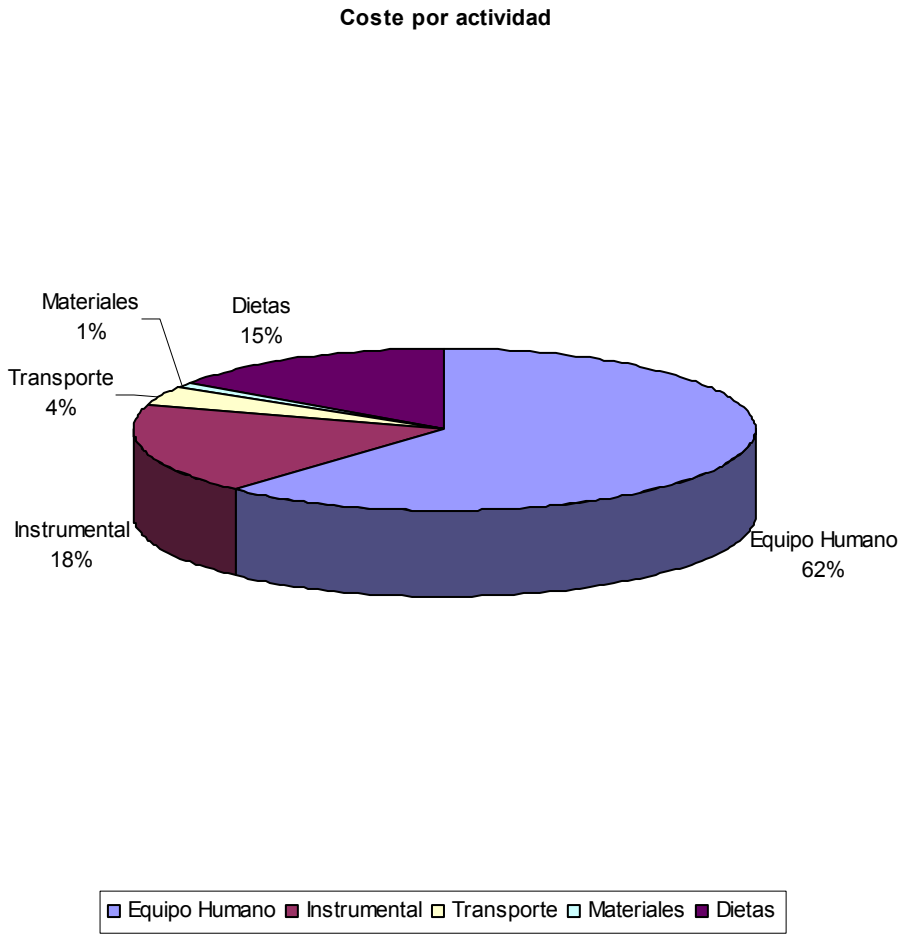
Actividad	Realización de la memoria del proyecto				
Subactiviadad	Impresión y encuadernación				
Duración	3 días				
Equipo Humano	1 I.Tec. en Topografía	***Coste unidad (€/dia)***	130,00	***Coste Total €***	390,00
Instrumental	Equipo informático	***Coste unidad (€/dia)***	41,50	***Coste Total €***	124,50
Materiales	Papel Plotter	***Coste unidad (€)***	30,00	***Coste Total €***	30,00
	DinA4	***Coste unidad (€)***	6,00	***Coste Total €***	6,00
	Encuadernación	***Coste unidad (€)***	60,00	***Coste Total €***	60,00
Dietas		***Coste unidad (€/dia)***	10,00	***Coste Total €***	30,00
		Coste total de la actividad		**€**	640,50

Total realización memoria del proyecto € **4815,00**

Total ejecución material del proyecto		13724,75 €
Beneficio empresarial	15%	2058,71 €
I.V.A	16%	2525,35 €

Presupuesto total de ejecución por contrata ***18308,82 €***

El siguiente diagrama circular, muestra el porcentaje de coste, que representa cada uno de los conceptos imputados al presupuesto:



8.Resultados y conclusiones

8. Resultados y Conclusiones

En la realización del presente proyecto, se establecían la consecución de los siguientes objetivos:

- ✓ Implantación de una red básica enlazada con vértices de la Red Geodésica Nacional por Técnicas Espaciales (REGENTE), que de cobertura a todo el yacimiento, de una extensión aproximada de 100 Has.

- ✓ Realización de un levantamiento topográfico a escala 1/500, de unas 10 hectáreas, localizado en la zona donde posteriormente se realizará el estudio gravimétrico.

- ✓ Realización de un levantamiento gravimétrico, para determinar anomalías de la fuerza de la gravedad, mediante las cuales se pueda poner de manifiesto la situación de las cavidades subterráneas, que constituyen en sí un defecto de masa.

Los dos primeros objetivos, la implantación de la red, y la realización del levantamiento, han sido realizados aplicando metodologías habituales en el campo de la topografía, siendo por tanto, su consecución la confirmación práctica de la validez de estos métodos. Los resultados obtenidos en el cálculo de la red, se adjuntan en el *anexo 2*, a este proyecto. Asimismo la cartografía elaborada se adjunta en el *capítulo 9 Cartografía*.

En cuanto al tercer objetivo del levantamiento gravimétrico, las conclusiones exigen una reflexión más profunda y compleja, que se desarrolla a continuación.

En primer lugar se debe considerar el tipo de levantamiento gravimétrico realizado, siendo éste un levantamiento de itinerario (de perfil o lineal), localizado en las zonas donde según la información previa disponible se sitúan las cavidades subterráneas. Este levantamiento se ha ejecutado, mediante la confección de perfiles transversales, por tanto para la interpretación de los resultados obtenidos, se deberán estudiar las variaciones en las anomalías dentro de cada uno de los perfiles.

La variación en los valores de las anomalías residuales, se debe a la distribución de masas más someras de la corteza terrestre, ya que la influencia de la distribución de las masas más profundas ha sido eliminada mediante la diferencia entre las anomalías de Bouguer y las anomalías regionales. Para interpretar los valores absolutos de las anomalías residuales obtenidos, sería necesario un estudio gravimétrico más amplio, así como la ayuda de toda la información geológica disponible de la zona. Lo realmente susceptible a interpretación en este estudio, son las incrementos de los valores de las anomalías residuales entre los puntos de cada perfil.

De esta forma hemos de interpretar estos incrementos en los valores de las anomalías, como consecuencia de un defecto de masa, constituido en este caso por la existencia de cavidades subterráneas.

Según los planteamientos teóricos establecidos en el capítulo *6.3.1 Diseño del levantamiento*, las variaciones de las anomalías serían las siguientes:

g_0	**R=3,09 m**	**R= 1,95 m**
z=5 m	0,21 mGal	0,09 mGal
z=10 m	0,11 mGal	0,04 mGal
z=20 m	0,05 mGal	0,02 mGal

Considerando dos secciones tipo A y tipo B, tal y como se demuestra en capítulo citado anteriormente.

Las variaciones en las anomalías residuales obtenidas, son valores que oscilan entre los 0,13 y los 0,61 miligales. Están magnitudes son del orden de las establecidas a priori, siendo mayores en algunos casos, lo que se debe interpretar como una deficiencia de masa mayor que la establecida inicialmente, que se correspondería con una sección mayor que la sección tipo B, probablemente por una altura de la cavidad, mayor de 2 m en estos tramos.

Por tanto la interpretación de estas variaciones en los perfiles gravimétricos debe ser la siguiente:

Las variaciones negativas se corresponden con los efectos producidos por un defecto de masa, por tanto en los puntos que se encuentren sobre el trazado de la galería, debería existir una variación negativa de las anomalías residuales, respecto a los puntos situados fuera del trazado de la galería. Este es un hecho que se pone de manifiesto de manera notable, en los perfiles obtenidos ya que en la zona central de los mismos en la mayoría de los casos se observa una depresión y en todos ellos un cambio en la tendencia general de la geometría del perfil.

Con los perfiles obtenidos, se pueden determinar por tanto, puntos que se encuentran sobre el trazado de la galería, y de esta forma establecer unos puntos de paso en planta de dicho trazado, tal y como se adjunta en el capítulo *9 Cartografía* junto con los perfiles gravimétricos obtenidos. Estos resultados son totalmente concordantes con la información previa disponible, ya que se ajustan notablemente al trazado teórico de la galería.

Para una mejor determinación en teoría bastaría con aumentar la proximidad de los puntos observados en cada perfil, para así acotar con mayor precisión el trazado de la galería. Esto conllevaría una observación más costosa, así como la mayor complejidad en el análisis de un conjunto de datos más denso del mismo modelo, por lo que se debe intentar llegar a un punto óptimo entre número de datos y precisión del método. En este caso y como primera aproximación se pueden considerar los resultados como satisfactorios, sirviendo como base para la realización de un posible estudio más detallado de la zona realizando un levantamiento de mayor tamaño, e intentando

localizar a la par que las galerías existentes, posibles lagunas o bolsas de agua subterráneas que abastezcan dichas cavidades.

A su vez podemos determinar las siguientes conclusiones de la aplicación de métodos gravimétricos para la prospección arqueológica:

- ✓ La aplicación del método esta supeditada a su precisión, a la magnitud de los objetos buscados y a la profundidad a la que se encuentren. Cuanto mayor sea el volumen de la masa que produce la anomalía, mayor sea el contraste de densidades, y menor la profundidad a la que se encuentra, más fácil será su localización. Por tanto la precisión del método y los instrumentos utilizados debe ser la adecuada en cada caso, pudiendo hacer inviable la utilización del método en ciertos casos, debido a la imposibilidad de aumentar las precisiones.

- ✓ Las interpretaciones cuantitativas de los resultados, se deben establecer de acuerdo con sucesos teóricos planteados en el diseño de la observación. De igual forma las interpretaciones cualitativas, deben referirse a modelos establecidos según situaciones teóricas planteadas. Por tanto toda la información previa adicional, referida a las dimensiones, características y situación de los objetos buscados será de gran ayuda para poder interpretar de manera adecuada los resultados obtenidos.

- ✓ Este método se debe considerar como un método complementario a los utilizados en prospección arqueológica, entre los que cabe destacar:

    - Métodos geoeléctricos
    - Métodos magnéticos
    - Métodos químicos

Nota: Se adjuntan a esta memoria, en formato digital los siguientes archivos:
*-Memoria y anejos del proyecto en formato *.pdf*
*-Cálculos realizados en formato *.xls*
*-Cartografía elaborada en formato *.dwg*

9.Cartografía

Perfiles gravimétricos

Perfiles gravimétricos en planta

10.Bibliografía

10. Bibliografía

A continuación se citan las publicaciones y proyectos fin de carrera anteriores consultados, para la realización del presente proyecto:

- Mironov, V.S:
  Curso de Prospección Gravimétrica.
  Editorial Reverté, 1977.

- Cantos Figuerola, José:
  Tratado de Geofísica Aplicada.
  Instituto Geológico y Minero de España, 1974.

- Heiskanen, Weikko A. y Moritz, Helmut:
  Geodesia Física.
  I.G.N. 1985.

- LaCoste&Romberg Gravity Meters, Inc:
  Instruction Manual Model G and D Gravity Meters. 1991.

- Levantamiento gravimétrico con enlace en la Red Gravimétrica Nacional de Orden Cero y altitudes ortométricas obtenidas mediante GPS e Ibergeo 95:
  Hugo Potti Manjavacas
  Santiago Prieto del Caño

- Levantamiento a escala 1:500 de la zona arqueológica de Mleiha ubicada en el emirato de Sharjah con receptores GPS. Obtención de un modelo tridimensional del yacimiento arqueológico ML2:
  Iván Fuentes Fernández
  Daniel Granado Rodríguez

A su vez han sido de inestimable ayuda, los apuntes de clase de todas las materias relacionadas con el proyecto, adquiridos en durante los cursos académicos cursados en esta escuela.

11.Anexos

11.1 Anexo 1. Radiolocalización en las ruinas de Clunia. GTE Grupo de Tecnologías en entornos hostiles. Universidad de Zaragoza.

Radiolocalización en las ruinas de Clunia (Peñalba de Castro, Burgos)

Natalia Ayuso, José Antonio Cuchí, José Luis Villarroel y Víctor Viñals.

GTE, Grupo de Tecnologías en Entornos hostiles
Universidad de Zaragoza

Rafael Larma

Escuaín S.L.

2 y 3 de julio de 2004

Introducción

En Junio de 2004, el profesor Francesc Tuset, arqueólogo director de las excavaciones de las ruinas de la ciudad romana Colonia Clunia Sulpicia, contactó con el GTE a los efectos de estudiar la posibilidad de realizar unas radiolocalizaciones en este yacimiento arqueológico.

Tres miembros del GTE viajaron, en un desplazamiento preliminar a Clunia, en la tarde del miércoles 23 de junio de 2004, al objeto de concretar las acciones a realizar. Tras girar una visita a la meseta donde se ubican las ruinas, se planteó el interés de radiolocalizar, en superficie, unos 20 pozos romanos, actualmente cegados, que conectan con una cavidad natural parcialmente acondicionada durante la época romana. Esta cueva subhorizontal tiene en la actualidad un solo acceso, conocido como Cueva de Román, situado en la ladera que domina a Peñalba de Castro, aguas arriba del manantial que abastece al pueblo.

Se realizó un análisis sobre la organización del trabajo, a partir de alguna información sobre las características de la cavidad. En una primera aproximación se estimaron 4-5 días de trabajo de campo para 4-6 personas expertas, barajándose diversas alternativas.

Por diversas razones se decidió realizar una primera campaña para radiolocalizar uno de los pozos, a los efectos de emprender una excavación hasta la cavidad, y cortocircuitar parte del actual recorrido subterráneo. Este trabajo se ha realizado el día 3 de julio de 2004.

Marco del trabajo.

Clunia se encuentra situada en la zona sudoriental de la provincia de Burgos, entre las localidades de Peñalba de Castro y Coruña del Conde, cerca del límite con la provincia de Soria. Se accede desde la carretera B-925, de Huerta del Rey a Coruña del Conde, por un camino asfaltado al que también se puede acceder desde la localidad de Peñalba de Castro.

Los restos de la ciudad romana se encuentran en la superficie de una meseta de un centenar de hectáreas, aproximadamente, situada a una cota ligeramente superior a los 1000 metros sobre el nivel del mar. La meseta domina, en un desnivel del orden de unos 60 metros, a los suaves valles en cuna de los modestos ríos Espeja, y Arandilla). Las laderas son bastante suaves, excepto en la zona superior donde hay cortados verticales de unos 20 metros de altura.

Geológicamente la meseta está conformada por materiales subhorizontales del Terciario continental de la cuenca el Duero. Se trata de alternancias de arcillas y arenas, sobremontadas por unos 20 metros de calizas pontienses.

La plataforma albergó a una importante ciudad romana fundada en el siglo I después de JC. Tuvo, en los siglos I y II, una importancia efímera como capital de un convento jurídico. Posteriormente decayó y se convirtió en campos de cultivo. Reconocida su importancia como yacimiento arqueológico, es excavada, desde inicios del siglo XX, por varios equipos.

Los trabajos arqueológicos descubren edificios importantes, termas y un teatro. Así mismo, miembros del Grupo Espeleológico Ribereño de Aranda de Duero, ponen de manifiesto la existencia de un interesante complejo subterráneo bajo la ciudad romana, cuya entrada era conocida de antiguo por los habitantes de las localidades cercanas. Esta cavidad alberga restos arqueológicos, inscripciones latinas, figuras de barro, etc.

Al subterráneo se accedía en la época romana mediante una serie de pozos, actualmente cegados y de imposible localización en superficie. En la actualidad, el acceso a la zona interior de las galerías, desde un túnel cerrado por una verja, es complicado por la existencia de zonas de encharcamiento con mucho barro.

Desarrollo de la actividad

La radiolocalización del pozo se realizó los días 2 y 3 de Julio de 2004. El Viernes día 2 el equipo del GTE formado por Natalia Ayuso, Rafael Larma, Victor Viñals, José Antonio Cuchí y José Luis Villarroel se desplazó por la tarde desde Huesca y Zaragoza hasta las excavaciones de Clunia en dos coches. Al llegar se realizó un planificación preliminar del trabajo a realizar. El equipo del GTE pernoctó en la casa de las excavaciones.

Al día siguiente, Sábado 3 de Julio, a las 9 h comenzó la jornada de trabajo con la preparación y verificación del material de radiolocalización. Una vez realizado esto, se procedió a instalar en el vértice geodésico denominado Piconisio (coord. UTM: 465740.09, 4625862.03, 1014.80), en las proximidades de las excavaciones, la estación base del GPS diferencial (fotografía 1). A las 9h 45m llegaron a la casa de las excavaciones los espeleólogos del Grupo Espeleológico Ribereño (Aranda de Duero) que debían guiar al equipo de radiolocalización interior hasta el pozo. Se obtuvo información del interior de la cueva para poder establecer la programación definitiva de la actividad.

La información más relevante fue:

- Localización, sobre la topografía disponible de la cavidad, en Palol 1994, del pozo a radiolocalizar.
- Tiempo de acceso hasta este pozo de 30 minutos.
- Necesidad de un equipo de interior reducido.

Una vez equipados los miembros del equipo de interior se procedió a penetrar en la cavidad. La planificación definitiva fue la siguiente:

Equipo de exterior:

José Antonio Cuchí (GTE)
Rafael Larma (Escuaín S.L. / GTE)
Chema Agustín (Excavaciones Clunia)
José Luis Villarroel (GTE)

Equipo interior :

Natalia Ayuso (GTE)
Víctor Viñals (GTE)
Emilio Delgado (Grupo Espeleológico Ribereño)
Fernando Ortiz (Grupo Espeleológico Ribereño)
Rosa Cuesta (Excavaciones Clunia / Grupo Espeleológico Ribereño)

Horario previsto

11h	Entrada en la cueva
11h 45m	Comienzo de emisión
12h 30m	Fin de emisión
13h 15m	Salida de la cueva

A partir de la 11h, el equipo de exterior realizó las siguientes actividades:

1. Se tomaron las coordenadas GPS de la boca de la Cueva Román.
2. Se tomaron las coordenadas GPS de diversos puntos dentro del recinto de las excavaciones para el posicionamiento de una poligonal.
3. Se tomaron las coordenadas GPS de dos depresiones en superficie, que podrían ser pozos hundidos.
4. Se calcularon las coordenadas UTM aproximadas del pozo a radiolocalizar mediante la topografía que aparece en Palol (1994): 469279, 4626074.
5. Se desplazó el equipo exterior y el material al punto anterior.
6. A las 11h 30m se comenzó la escucha (fotografía 2).
7. A partir de las 12h se hizo un barrido de la zona para tratar de localizar la señal.
8. A las 12h 15m se detectó finalmente la señal y se procedió a realizar la radiolocalización.
9. La radiolocalización se desarrolló durante 10 minutos, dando como resultado un punto (fotografía 3) con triángulo de incertidumbre inferior a 5 centímetros (gran precisión) con coordenadas UTM (469309, 4626055) y profundidad 21.5 metros (calculada a partir de un ángulo del campo con la horizontal de 52º).
10. Y finalmente, se desmontó la estación base del GPS diferencial.

Por otra parte el equipo de interior realizó las siguientes actividades:

1. A las 11h se inició el desplazamiento por la cavidad hasta la base del pozo a radiolocalizar. Este desplazamiento duró más que el inicialmente estimado.
2. Estacionamiento de la baliza. La baliza no se pudo situar en la base del pozo ya que éste presentaba una ladera de derrubios de fuerte inclinación. Se decidió

situar la baliza en un punto de la galería más propicio para colocar la antena en posición horizontal de forma precisa. Desde el punto elegido, el eje del pozo se encontraba a 2.17 metros en dirección 35º norte (véase figura 1).

3. Comienzo de emisión a las 12h 15m (30 minutos de retraso).
4. Tras 45 minutos de emisión se inicia la salida de la cavidad, accediendo al exterior a las 14h 30m (fotografía 4).

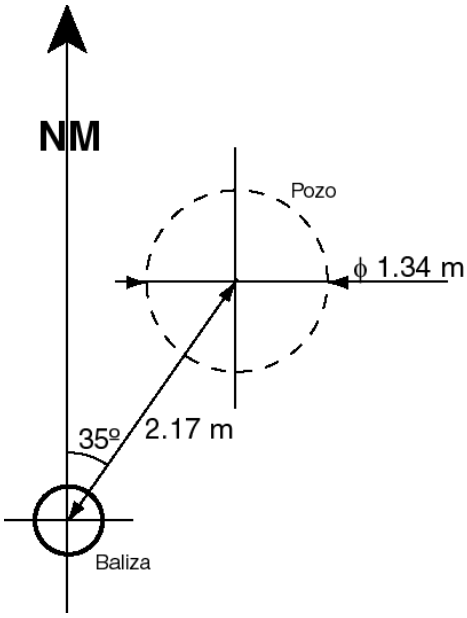


Figura 1. Esquema de la posición de la baliza con respecto al eje del pozo.

Instrumentación utilizada.

Interior

- **Emisor**: Equipo monofrecuencia, con antena en solenoide circular de 50 cm de diámetro sobre bastidor de plástico. Emite a 874 Hz, alimentado por una batería de 12 V. Está comprobado que permite radiolocalizaciones de hasta 100 metros de profundidad.

Exterior

- **Receptor**: Equipo con antena circular sobre marco de madera, de 1 metro de diámetro en la frecuencia de 874 Hz.
- **GPS** diferencial Leica.

Metodología de radiolocalización

El método se basa en la generación de un campo magnético a partir de una espira emisora. Las líneas de flujo magnético producidas están contenidas en planos con una simetría axial cuyo eje es el propio de la espira emisora (figura 2). Así, una espira receptora contenida en uno de estos planos no cortará ninguna línea de flujo y por lo tanto no se inducirá en ella corriente alguna. En este caso no se detecta ninguna señal.

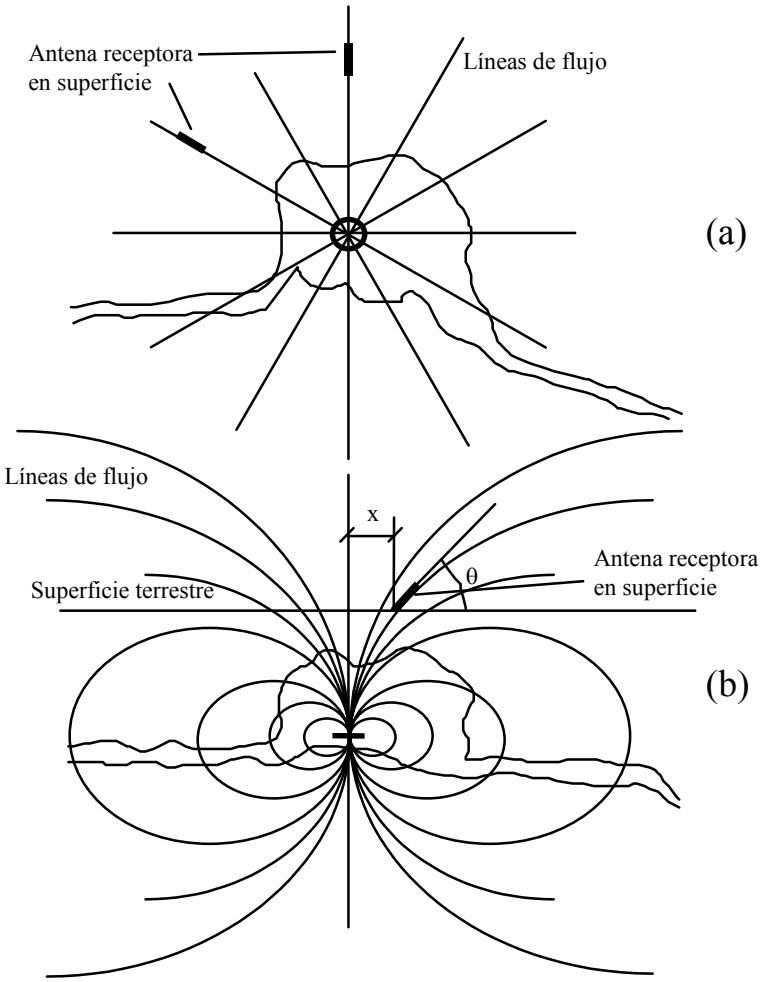


Figura 2. Líneas de flujo magnético producidas por un solenoide (dipolo magnético). La antena receptora no corta flujo magnético (no recibe señal) cuando el plano que determina pasa por el centro de la espira emisora. (a) vista en planta. (b) vista de perfil. Adaptación de Bedford (1993).

El método descrito plantea problemas cuando el terreno es anisótropo ya que el campo magnético puede ser distorsionado y sus líneas de flujo dejan de estar contenidas en planos. Por otra parte, el trabajo a grandes profundidades en rocas conductivas puede suponer el incumplimiento de la condición de campo cercano. En estos casos se trabaja en la zona de transición donde el campo tiene una geometría que imposibilita la medida de la profundidad. También se producen problemas cuando existen cuerpos metálicos en las proximidades.

En el presente caso, la metodología básica consistió, para los equipos de interior, en instalar la antena emisora en posición horizontal, con la ayuda de niveles de burbuja y emitir en los tiempos y frecuencia prefijados. Para el equipo de exterior, en ubicarse en tiempo adecuado en las zonas aproximadas de recepción, con ayuda de topografía de la cavidad, cartografía del terreno y GPS. Iniciada la emisión es necesario ubicar por radiolocalización el triángulo de incertidumbre y la profundidad de emisión.

La metodología de trabajo es sencilla (véase figura 2) y puede consultarse en trabajos tales como Bedford (1993) o Villarroel et al. (1999). Se instala la antena emisora en la cavidad. Un segundo solenoide, o antena receptora, móvil se desplaza por la superficie. Como las líneas de flujo magnético producidas por la antena emisora están contenidas en planos, cuando la antena receptora esté contenida en uno de estos planos no cortará ninguna línea de flujo y por lo tanto no se inducirá en ella tensión alguna. Esta situación se denomina "nulo". La intersección de diversas líneas de flujo nulo determina el punto azimutal. Una vez localizado éste, se calcula la profundidad del punto interior. Para ello pueden utilizarse diversos métodos, como por ejemplo el basado en la geometría del campo magnético próximo (Bedford, 1993) que establece la profundidad, "d", mediante la siguiente expresión (donde "x" y "θ" se corresponden con los de la Figura 2):

$$\frac{x}{d} = \frac{\sqrt{\left(8 + 9\tan^2\theta\right)} - 3\tan\theta}{2}$$

Resultados

A continuación se incluye una tabla con las coordenadas UTM tomadas con el GPS diferencial de todos los puntos de interés de la actividad. Las coordenadas del denominado eje del pozo radiolocalizado han sido calculadas teniendo en cuenta posición relativa medida de la baliza con respecto al eje del pozo.

Punto	UTM x	UTM y	UTM z
C-0 (poligonal)	469399.1437	4625781.2951	1020.8554
C-4 (poligonal)	469435.8486	4625869.2006	1024.5082
C-8 (poligonal)	469303.6402	4625688.7066	1022.4159
Boca Cueva Román	469370.8675	4626334.2730	995.9560
Vértice Piconisio	465740.0904	4625862.0297	1014.8000
POZO-X	469116.2339	4626042.9680	1011.1411
POZO-Y	469328.4317	4626163.7544	1008.3626
POZO-Y1	469330.7781	4626165.9535	1008.2688
POZO-Y2	469327.9411	4626167.4315	1008.1328
Punto radiolocalizado	469309.4443	4626055.5569	1012.7421
Eje del pozo radiolocalizado	469310.689	4626057.3345	-

En la figura 3 se muestra la situación de los tres pozos (X, Y y radiolocalizado) sobre un plano de la zona de trabajo con la topografía de la Cueva de Román superpuesta (Palol, 1994). De la observación de esa figura se desprenden las siguientes conclusiones:

1. El Pozo Y, cuyo hundimiento se situó con GPS diferencial en superficie, prácticamente coincide con uno situado en la topografía de la cueva.
2. El Pozo X, cuyo hundimiento se situó con GPS diferencial en superficie, está en la prolongación de una de las galerías de la cueva.
3. El punto radiolocalizado se encuentra a mucha distancia, unos 38 metros, de la posición teórica del pozo de interés, pero próximo al trazado de la galería principal. Es posible que la situación del pozo sobre la topografía sea incorrecta.

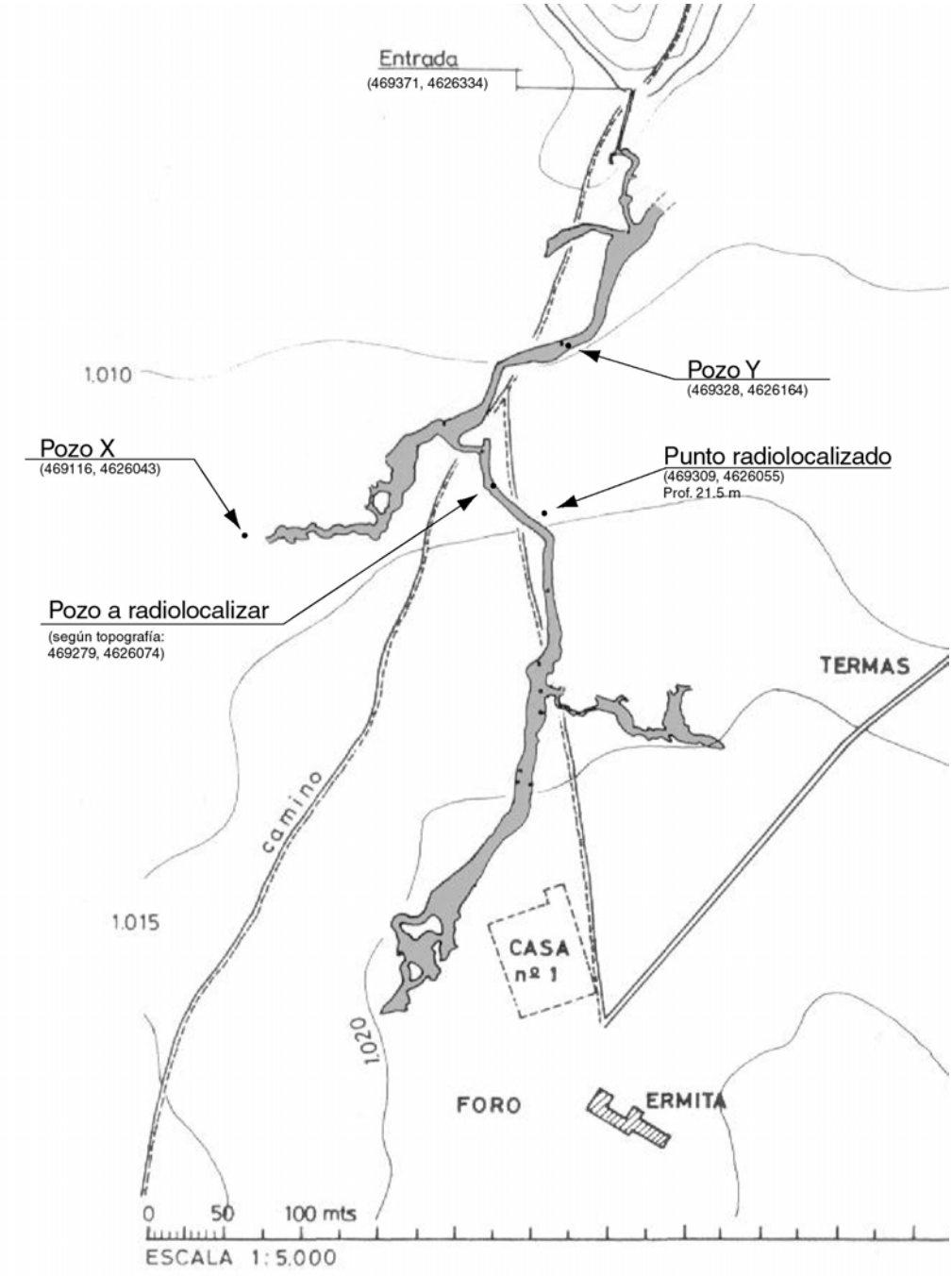


Figura 3. Situación de los pozos X e Y, así como del punto radiolocalizado con respecto a la Cueva de Román según la topografía aparecida en (Palol, 1994).

11.2 Anexo 2. Informe del ajuste de la red de coordenadas.

```
*************************************************************
                **                                      **
            **          M O V E 3  Versión 3.1.5          **
                **                                      **
              **              Diseño y Ajuste             **
                **                  de                  **
          **          Redes Geodésicas de 3D 2D y 1D        **
                **                                      **
            **              www.MOVE3.com                 **
        **      (c) 1993-2002 Grontmij Geo Informatie bv      **
          **        Bajo licencia de Leica Geosystems AG      **
                **                                      **
        ** Red_Clunia_Oscar              31-10-2005 11:23:20 **
*************************************************************
```

3D Red con ajuste mínimo on WGS 84 ellipsoid

ESTACIONES

Número de estaciones (parcialmente) conocidas 1
Número de estaciones desconocidas 11
Total 12

OBSERVACIONES

Direcciones 0
Distancias 0
Ángulos cenitales 0
Ángulos azimutales 0
Diferencias de altura 0
Diferencias de coordenadas GPS 72 (24 líneas base)
Coordenadas conocidas 3
Parámetros de transformación GPS 0
Total 75

INCÓGNITAS

Coordenadas 36
Orientaciones 0
Factores de escala 0
Coeficientes de refracción vertical 0
Offsets de azimut 0
Parámetros de transformación GPS 0
Deflexiones de la vertical 0
Parámetros adicionales de transformación 0
Total 36

Grados de libertad 39

AJUSTE

Número de iteraciones 1
Corrección máx. de coord. en la última iteración 0.0000 m

PRUEBAS

Alfa (multi dimensional) 0.5205
Alfa 0 (unidimensional) 0.0500
Beta 0.80
Valor crítico de Prueba W 1.96
Valor crítico de Prueba T (tridimensional) 1.89
Valor crítico de Prueba T (bidimensional) 2.42
Valor crítico de Prueba T 0.97

Prueba F 11.019 rechazado

Resultados basados en el factor de varianza a posteriori

CONSTANTES DEL ELIPSOIDE

Elipsoide WGS 84
Semi-eje mayor 6378137.0000 m
Achatamiento 298.257223563

COORDENADAS (RED CON AJUSTE MÍNIMO)

Estación		Coordenada	Corr	Prec(95.0%)
1000	Latitud	41 46 44.52133 N	-0.2201	0.0094 m
	Longitud	3 22 12.71010 W	0.1716	0.0097 m
	Altura	1074.3340	3.4909	0.0236 m
2000	Latitud	41 46 49.28560 N	-0.2194	0.0070 m
	Longitud	3 22 20.16430 W	0.1700	0.0081 m
	Altura	1075.4929	3.4928	0.0181 m
3000	Latitud	41 47 03.00832 N	-0.2185	0.0101 m
	Longitud	3 22 25.79372 W	0.1666	0.0102 m
	Altura	1063.0693	3.4878	0.0225 m
4000	Latitud	41 47 06.32497 N	-0.2209	0.0097 m
	Longitud	3 22 10.20473 W	0.1702	0.0103 m
	Altura	1062.7694	3.4895	0.0254 m
5000	Latitud	41 47 04.49268 N	-0.2225	0.0099 m
	Longitud	3 21 56.39414 W	0.1719	0.0097 m
	Altura	1059.3841	3.4890	0.0251 m
6000	Latitud	41 46 54.00578 N	-0.2186	0.0111 m
	Longitud	3 21 49.24250 W	0.1699	0.0100 m
	Altura	1066.6676	3.4919	0.0239 m
7000	Latitud	41 46 45.02945 N	-0.2178	0.0104 m
	Longitud	3 21 58.58952 W	0.1700	0.0096 m
	Altura	1070.1372	3.4904	0.0226 m

aparca	Latitud	41 46 53.07505 N	-0.2205	0.0183 m
	Longitud	3 22 10.33542 W	0.1709	0.0155 m
	Altura	1073.9498	3.4896	0.0364 m
estaca1	Latitud	41 47 10.53806 N	-0.2211	0.0182 m
	Longitud	3 22 12.84618 W	0.1707	0.0131 m
	Altura	1055.4613	3.4907	0.0368 m
estaca2	Latitud	41 47 10.40672 N	-0.2209	0.0179 m
	Longitud	3 22 11.41732 W	0.1709	0.0132 m
	Altura	1056.2444	3.4900	0.0381 m
mirador	Latitud	41 46 55.91698 N	-0.2205	0.0070 m
	Longitud	3 22 08.83870 W	0.1709	0.0081 m
	Altura	1077.6364	3.4896	0.0182 m
regente	Latitud	41 46 55.15320 N*	0.0000	fijo m
	Longitud	3 24 48.86310 W*	0.0000	fijo m
	Altura	1069.1440*	0.0000	fijo m

REGIONES DE CONFIANZA ABSOLUTA (ELIPSES DE ERROR) - 95.0%

Estación	A	B	A/B	Phi	Alt
1000	0.0121	0.0118 m	1.0	84 grad	0.0236 m
2000	0.0104	0.0084 m	1.2	75 grad	0.0181 m
3000	0.0127	0.0126 m	1.0	72 grad	0.0225 m
4000	0.0130	0.0120 m	1.1	74 grad	0.0254 m
5000	0.0133	0.0111 m	1.2	47 grad	0.0251 m
6000	0.0142	0.0119 m	1.2	29 grad	0.0239 m
7000	0.0131	0.0120 m	1.1	17 grad	0.0226 m
aparca	0.0229	0.0194 m	1.2	1 grad	0.0364 m
estaca1	0.0234	0.0153 m	1.5	20 grad	0.0368 m
estaca2	0.0232	0.0153 m	1.5	22 grad	0.0381 m
mirador	0.0104	0.0084 m	1.2	75 grad	0.0182 m
regente	0.0000	0.0000 m	0.0	0 grad	0.0000 m

OBSERVACIONES AJUSTADAS

	Estación	Pto a medir	Obs. Ajus.	Resid	Resid(ENA)	Desv. Est.
DX	7000	6000	-174.1444	0.0036	0.0029	0.0083 m
DY			226.4995	0.0027	-0.0075	0.0035 m
DZ			204.2398	-0.0070	-0.0022	0.0062 m
DX	regente	2000	328.4139	-0.0024	-0.0027	0.0075 m
DY			3421.0051	-0.0026	0.0001	0.0041 m
DZ			-130.7860	-0.0019	-0.0029	0.0065 m
DX	regente	mirador	209.2832	0.0025	0.0029	0.0075 m
DY			3690.0583	0.0027	-0.0001	0.0041 m
DZ			23.2330	0.0020	0.0030	0.0065 m
DX	estaca1	estaca2	5.2187	-0.0021	0.0004	0.0144 m
DY			32.7490	0.0006	0.0006	0.0061 m
DZ			-2.5001	-0.0011	-0.0023	0.0154 m

DX	1000	2000	-107.0434	-0.0035	-0.0039	0.0075	m
DY			-166.1640	-0.0037	0.0002	0.0034	m
DZ			110.4026	-0.0026	-0.0041	0.0066	m
DX	1000	7000	5.6094	0.0014	0.0022	0.0080	m
DY			326.3829	0.0022	-0.0018	0.0035	m
DZ			8.8963	-0.0013	0.0001	0.0064	m
DX	3000	2000	298.5557	0.0037	0.0182	0.0074	m
DY			112.6476	0.0180	-0.0075	0.0038	m
DZ			-307.4827	-0.0076	-0.0031	0.0058	m
DX	3000	4000	-47.1258	-0.0044	-0.0052	0.0088	m
DY			363.4345	-0.0050	0.0022	0.0040	m
DZ			76.1136	-0.0007	-0.0035	0.0067	m
DX	5000	4000	-53.8261	0.0011	0.0007	0.0092	m
DY			-316.3442	0.0007	-0.0008	0.0038	m
DZ			44.4153	-0.0001	0.0007	0.0085	m
DX	5000	6000	230.3639	-0.0056	-0.0082	0.0096	m
DY			151.9153	-0.0079	0.0105	0.0038	m
DZ			-236.4474	0.0095	0.0025	0.0077	m
DX	mirador	1000	226.1741	-0.0008	-0.0006	0.0066	m
DY			-102.8892	-0.0006	-0.0002	0.0030	m
DZ			-264.4216	-0.0010	-0.0013	0.0057	m
DX	mirador	2000	119.1307	-0.0033	-0.0057	0.0047	m
DY			-269.0532	-0.0055	0.0001	0.0024	m
DZ			-154.0190	-0.0025	-0.0039	0.0040	m
DX	mirador	2000	119.1307	-0.0036	-0.0037	0.0047	m
DY			-269.0532	-0.0035	0.0013	0.0024	m
DZ			-154.0190	-0.0013	-0.0034	0.0040	m
DX	mirador	2000	119.1307	0.0071	0.0231	0.0047	m
DY			-269.0532	0.0227	-0.0101	0.0024	m
DZ			-154.0190	-0.0085	-0.0014	0.0040	m
DX	mirador	3000	-179.4249	0.0030	0.0045	0.0065	m
DY			-381.7008	0.0044	-0.0022	0.0033	m
DZ			153.4636	-0.0005	0.0017	0.0050	m
DX	mirador	4000	-226.5508	0.0007	0.0017	0.0075	m
DY			-18.2663	0.0017	0.0000	0.0032	m
DZ			229.5772	0.0006	0.0009	0.0063	m
DX	mirador	5000	-172.7247	0.0017	0.0002	0.0070	m
DY			298.0779	0.0001	-0.0004	0.0028	m
DZ			185.1619	0.0009	0.0019	0.0064	m
DX	mirador	5000	-172.7247	-0.0038	-0.0027	0.0070	m
DY			298.0779	-0.0025	0.0049	0.0028	m
DZ			185.1619	0.0032	-0.0006	0.0064	m
DX	mirador	6000	57.6392	0.0032	0.0059	0.0073	m
DY			449.9932	0.0057	-0.0086	0.0030	m
DZ			-51.2855	-0.0090	-0.0039	0.0054	m
DX	mirador	6000	57.6392	-0.0096	-0.0113	0.0073	m
DY			449.9932	-0.0107	0.0150	0.0030	m
DZ			-51.2855	0.0121	0.0014	0.0054	m
DX	mirador	7000	231.7836	0.0011	0.0008	0.0064	m

DY			223.4937	0.0007	-0.0026	0.0028 m
DZ			-255.5253	-0.0025	-0.0009	0.0048 m
DX	mirador	aparca	53.5542	-0.0000	-0.0000	0.0149 m
DY			-37.7817	-0.0000	0.0000	0.0068 m
DZ			-67.8498	-0.0000	-0.0000	0.0105 m
DX	mirador	estaca1	-322.0558	-0.0011	0.0002	0.0124 m
DY			-73.7526	0.0003	0.0003	0.0054 m
DZ			321.6455	-0.0005	-0.0011	0.0136 m
DX	mirador	estaca2	-316.8371	0.0012	-0.0003	0.0130 m
DY			-41.0035	-0.0003	-0.0004	0.0055 m
DZ			319.1454	0.0006	0.0014	0.0138 m

RESIDUALES DE LINEAS BASE GPS

	Estación	Pto a medir	Ajust. vector	Resid	Resid ppm
DV	7000	6000	351.2010	0.0084 m	23.8 ppm
DV	regente	2000	3439.2203	0.0040 m	1.2 ppm
DV	regente	mirador	3696.0613	0.0042 m	1.1 ppm
DV	estaca1	estaca2	33.2564	0.0024 m	71.5 ppm
DV	1000	2000	226.4012	0.0057 m	25.0 ppm
DV	1000	7000	326.5524	0.0029 m	8.8 ppm
DV	3000	2000	443.1372	0.0199 m	44.8 ppm
DV	3000	4000	374.2976	0.0067 m	17.8 ppm
DV	5000	4000	323.9500	0.0013 m	4.0 ppm
DV	5000	6000	363.3912	0.0136 m	37.3 ppm
DV	mirador	1000	362.8495	0.0014 m	4.0 ppm
DV	mirador	2000	332.1199	0.0069 m	20.9 ppm
DV	mirador	2000	332.1199	0.0052 m	15.6 ppm
DV	mirador	2000	332.1199	0.0253 m	76.0 ppm
DV	mirador	3000	448.8206	0.0053 m	11.8 ppm
DV	mirador	4000	323.0551	0.0019 m	5.9 ppm
DV	mirador	5000	391.1127	0.0020 m	5.0 ppm
DV	mirador	5000	391.1127	0.0056 m	14.3 ppm
DV	mirador	6000	456.5592	0.0111 m	24.3 ppm
DV	mirador	6000	456.5592	0.0188 m	41.2 ppm
DV	mirador	7000	411.0550	0.0028 m	6.9 ppm
DV	mirador	aparca	94.3350	0.0000 m	0.0 ppm
DV	mirador	estaca1	461.1022	0.0012 m	2.6 ppm
DV	mirador	estaca2	451.5759	0.0014 m	3.2 ppm

PRUEBA DE OBSERVACIONES

	Estación	Pto a medir	MDB	Red	BNR	Prueba W	Prueba T
DX	7000	6000	0.0405 m	59	2.3	1.03	0.75
DY			0.0196 m	58	2.4	0.72	
DZ			0.0305 m	58	2.3	-1.25	
DX	regente	2000	0.0282 m	43	3.2	-0.24	0.20

DY			0.0225 m	44	3.2	-0.69		
DZ			0.0241 m	43	3.2	0.06		
DX	regente	mirador	0.0282 m	46	3.1	0.24	0.20	
DY			0.0225 m	46	3.0	0.69		
DZ			0.0241 m	45	3.1	-0.06		
DX	estaca1	estaca2	0.0584 m	47	3.1	-0.11	0.01	
DY			0.0315 m	46	3.0	0.05		
DZ			0.0658 m	45	3.1	0.01		
DX	1000	2000	0.0308 m	66	2.1	-0.17	0.26	
DY			0.0199 m	67	2.0	-0.85		
DZ			0.0282 m	77	2.0	-0.16		
DX	1000	7000	0.0384 m	63	2.1	0.22	0.09	
DY			0.0193 m	60	2.3	0.45		
DZ			0.0291 m	57	2.4	-0.12		
DX	3000	2000	0.0396 m	72	1.6	1.05	3.18**	
DY			0.0232 m	72	1.8	2.91**		
DZ			0.0313 m	73	1.6	-0.31		
DX	3000	4000	0.0369 m	65	2.4	-0.20	0.33	
DY			0.0228 m	59	2.4	-0.92		
DZ			0.0277 m	45	2.9	0.11		
DX	5000	4000	0.0345 m	57	2.3	0.18	0.02	
DY			0.0222 m	65	2.1	0.15		
DZ			0.0348 m	83	2.0	-0.17		
DX	5000	6000	0.0493 m	82	1.5	-1.47	1.41	
DY			0.0245 m	77	1.6	-1.53		
DZ			0.0359 m	68	1.8	1.63		
DX	mirador	1000	0.0276 m	41	3.3	0.01	0.05	
DY			0.0160 m	41	3.4	-0.31		
DZ			0.0232 m	42	3.3	-0.23		
DX	mirador	2000	0.0184 m	49	3.1	-0.61	1.48	
DY			0.0137 m	56	2.6	-2.04**		
DZ			0.0160 m	47	3.2	0.33		
DX	mirador	2000	0.0277 m	88	1.1	-0.28	0.17	
DY			0.0187 m	85	1.2	-0.64		
DZ			0.0260 m	92	1.0	0.04		
DX	mirador	2000	0.0391 m	92	0.8	1.21	3.40**	
DY			0.0227 m	91	1.0	3.00**		
DZ			0.0313 m	90	0.9	-0.28		
DX	mirador	3000	0.0311 m	40	3.4	0.65	1.02	
DY			0.0187 m	40	3.5	1.58		
DZ			0.0236 m	37	3.6	-0.14		
DX	mirador	4000	0.0287 m	39	3.5	0.01	0.13	
DY			0.0183 m	40	3.4	0.62		
DZ			0.0242 m	42	3.5	0.02		
DX	mirador	5000	0.0268 m	41	2.9	0.24	0.02	
DY			0.0152 m	57	2.5	0.06		
DZ			0.0273 m	84	2.2	-0.13		
DX	mirador	5000	0.0319 m	84	1.6	-1.06	0.61	
DY			0.0161 m	67	2.0	-0.96		

DZ			0.0255 m	44	2.6	1.16	
DX	mirador	6000	0.0338 m	49	2.7	1.74	2.49**
DY			0.0165 m	53	2.7	2.01**	
DZ			0.0260 m	58	2.4	-1.92	
DX	mirador	6000	0.0453 m	86	1.3	-2.13**	2.74**
DY			0.0222 m	84	1.3	-2.14**	
DZ			0.0319 m	81	1.4	2.21**	
DX	mirador	7000	0.0319 m	38	3.5	0.63	0.31
DY			0.0155 m	37	3.7	0.21	
DZ			0.0238 m	35	3.7	-0.87	
DX	mirador	aparca				obs. libres	
DY					obs. libres		
DZ					obs. libres		
DX	mirador	estaca1	0.0584 m	25	4.6	-0.11	0.01
DY			0.0315 m	26	4.6	0.05	
DZ			0.0658 m	28	4.4	0.01	
DX	mirador	estaca2	0.0584 m	28	4.6	0.11	0.01
DY			0.0315 m	28	4.5	-0.05	
DZ			0.0658 m	27	4.6	-0.01	

ERRORES ESTIMADOS PARA OBSERVACIONES RECHAZADAS POR LAS PRUEBAS W (máx 10)

Registro	Estación	Pto a medir	Prueba W	Fact	Err est
14	DY	mirador	2000	3.00	1.5	0.0243 m
7	DY	3000	2000	2.91	1.5	0.0241 m
20	DZ	mirador	6000	2.21	1.1	0.0253 m
20	DY			-2.14	1.1	-0.0170 m
20	DX			-2.13	1.1	-0.0345 m
12	DY	mirador	2000	-2.04	1.0	-0.0100 m
19	DY	mirador	6000	2.01	1.0	0.0118 m

ERRORES ESTIMADOS PARA OBSERVACIONES RECHAZADAS POR LAS PRUEBAS T (máx 10)

Registro	Estación	Pto a medir	Prueba T	Fact	Err est
14	DX	mirador	2000	3.40	1.3	0.0087 m
	DY					0.0250 m
	DZ					-0.0075 m
7	DX	3000	2000	3.18	1.3	0.0082 m
	DY					0.0249 m
	DZ					-0.0073 m
20	DX	mirador	6000	2.74	1.2	-0.0114 m
	DY					-0.0132 m
	DZ					0.0164 m
19	DX	mirador	6000	2.49	1.1	0.0061 m
	DY					0.0106 m
	DZ					-0.0144 m

11.3 Anexo 3. Reseñas de las bases de la red de coordenadas.

Red Clvnia Svlpicia ***Estación:*** Mirador
Tipo de señal: Hito

Coordenadas UTM ***Uso:*** 30
x: 469434.174 m
y: 4625868.499 m
h ortométrica: 1024.268 m

Coordenadas ETRS-89
x: 41º 46´ 55.9170´´ N
y: 3º 22´ 8.8387´´ W
h elipsoidal: 1077.636 m

Descripción Literal

Situado en el Alto del Castro, al Suroeste del yacimiento arqueológico de Clunia, en terreno erial. Desde Aranda del Duero por la carretera a Salas de los Infantes(C-111), tomando el desvío a Peñalba de Castro. Sin abandonarlo se toma un carril a la izquierda con acceso al recinto cerrado del yacimiento. Avanzar en dirección al aparcamiento 700m hasta un mirador que encontramos a la derecha, cercano a los conjuntos termales. La señal se encuentra en la cima del mirador.

Croquis de detalle

Fotografía

Mapa de situación

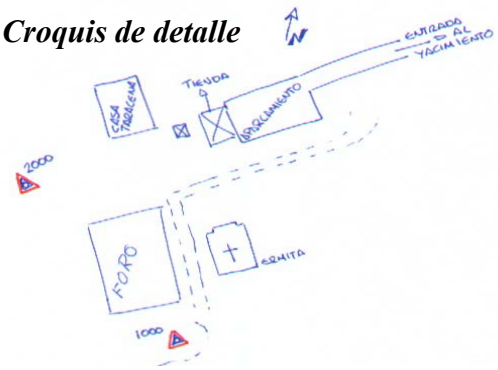
Red Clvnia Svlpicia ***Estación:*** 1000
Tipo de señal: Hito

Coordenadas UTM	***Uso:*** 30	***Coordenadas ETRS-89***
x: 469343.303 m		x: 41º 46´ 44.5213´´ N
y: 4625517.439 m		y: 3º 22´ 12.7101´´ W
h ortométrica: 1020.973 m		h elipsoidal: 1074.334 m

Descripción Literal

Situado en el Alto del Castro, al Sureste del yacimiento arqueológico de Clunia, en terreno erial. Desde Aranda del Duero por la carretera a Salas de los Infantes(C-111), tomando el desvío a Peñalba de Castro. Sin abandonarlo se toma un carril a la izquierda con acceso al recinto cerrado del yacimiento. Seguir hasta el aparcamiento y según croquis, avanzar hacia el Foro, a unos 300m de su esquina Sureste se encuentra la señal.

Croquis de detalle



Fotografía

Mapa de situación

Red Clvnia Svlpicia ***Estación:*** 2000
Tipo de señal: Hito

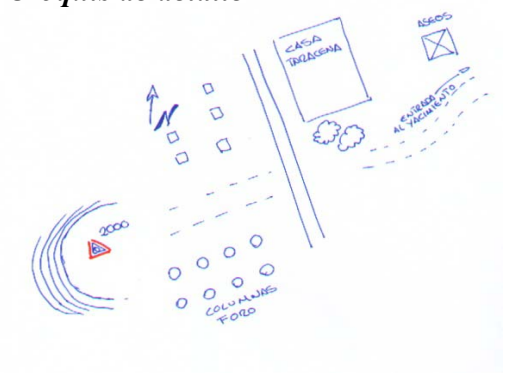
Coordenadas UTM ***Uso:*** 30
x: 469171.862 m
y: 4625665.109 m
h ortométrica: 1022.132 m

Coordenadas ETRS-89
x: 41º 46´ 49.2856´´ N
y: 3º 22´ 20.1643´´ W
h elipsoidal: 1075.493 m

Descripción Literal

Situado en el Alto del Castro, al Suroeste del yacimiento arqueológico de Clunia, en terreno erial. Desde Aranda del Duero por la carretera a Salas de los Infantes(C-111), tomando el desvío a Peñalba de Castro. Sin abandonarlo se toma un carril a la izquierda con acceso al recinto cerrado del yacimiento. Seguir hasta el aparcamiento, y según croquis avanzar en dirección Oeste, dejando a la derecha "casa Taracena", a 400m se accede hasta la señal.

Croquis de detalle



Mapa de situación

Fotografía

Red Clvnia Svlpicia ***Estación:*** 3000
Tipo de señal: Hito

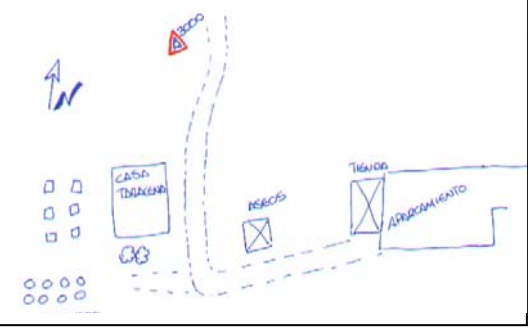
Coordenadas UTM ***Uso:*** 30
x: 469043.747 m
y: 4626088.880 m
h ortométrica: 1009.702 m

Coordenadas ETRS-89
x: 41º 47´ 3.0083´´ N
y: 3º 22´ 25.7937´´ W
h elipsoidal: 1063.069 m

Descripción Literal

Situado en el Alto del Castro, al Suroeste del yacimiento arqueológico de Clunia, en terreno erial. Desde Aranda del Duero por la carretera a Salas de los Infantes(C-111), tomando el desvío a Peñalba de Castro. Sin abandonarlo se toma un carril a la izquierda con acceso al recinto cerrado del yacimiento. Seguir hasta el aparcamiento y avanzar en dirección Oeste hasta "Casa Taracena" desde la que sale un camino hacia el Norte, recorriendo 700m hasta la señal, que se encuentra a Oeste del camino.

Croquis de detalle



Mapa de situación

Fotografía

Red Clvnia Svlpicia ***Estación:*** 4000
Tipo de señal: Hito

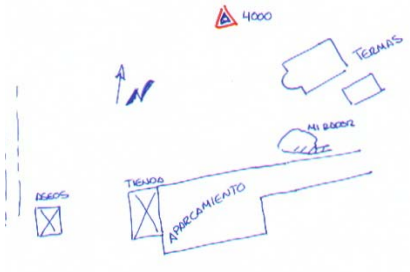
Coordenadas UTM ***Uso:*** 30
x: 469404.016 m
y: 4626189.618 m
h ortométrica:1009.396 m

Coordenadas ETRS-89
x: 41º 47´ 6.3249´´ N
y: 3º 22´ 10.2047´´ W
h elipsoidal: 1062.7694 m

Descripción Literal

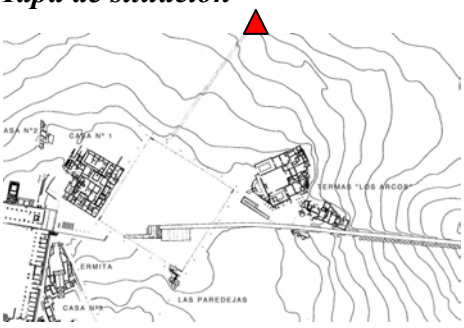
Situado en el Alto del Castro, al Suroeste del yacimiento arqueológico de Clunia, en terreno erial. Desde Aranda del Duero por la carretera a Salas de los Infantes(C-111), tomando el desvío a Peñalba de Castro. Sin abandonarlo se toma un carril a la izquierda con acceso al recinto cerrado del yacimiento. Seguir hasta el aparcamiento y desde el mirador avanzar en dirección Norte, dejando atrás las termas, recorremos 325m hasta la señal.

Croquis de detalle



Fotografía

Mapa de situación



Red Clvnia Svlpicia ***Estación:*** 5000
Tipo de señal: Ferralla

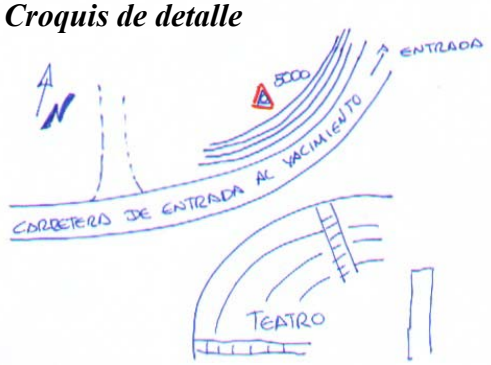
Coordenadas UTM ***Uso:*** 30
x: 469722.553 m
y: 4626131.752 m
h ortométrica: 1006.007 m

Coordenadas ETRS-89
x: 41º 47´ 4.4927´´ N
y: 3º 21´ 56.3941´´ W
h ortométrica: 1059.384 m

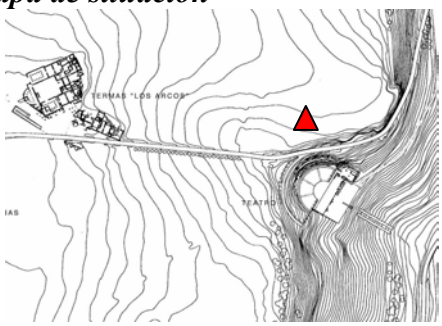
Descripción Literal

Situado en el Alto del Castro, al Suroeste del yacimiento arqueológico de Clunia, en terreno erial. Desde Aranda del Duero por la carretera a Salas de los Infantes(C-111), tomando el desvío a Peñalba de Castro. Sin abandonarlo se toma un carril a la izquierda con acceso al recinto cerrado del yacimiento. Recorrer 600m en dirección al aparcamiento, dejando atrás el Teatro, donde sale una senda a la derecha, situándose la señal próxima a la cabeza del talud del acceso al yacimiento, según se indica en el croquis.

Croquis de detalle



Mapa de situación



Fotografía

Red Clvnia Svlpicia ***Estación:*** 6000
Tipo de señal: Hito

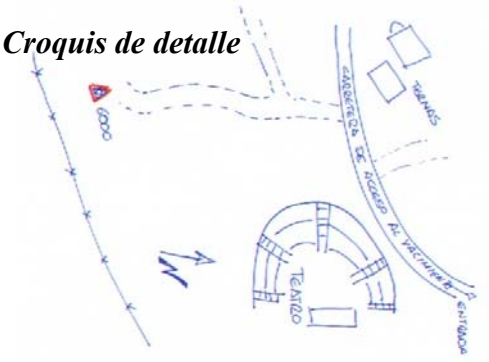
Coordenadas UTM ***Uso:*** 30
x: 469886.265 m
y: 4625807.639 m
h ortométrica: 1013.294 m

Coordenadas ETRS-89
x: 41º 46´ 54.0059´´ N
y: 3º 21´ 49.2425´´ W
h ortométrica: 1066.668 m

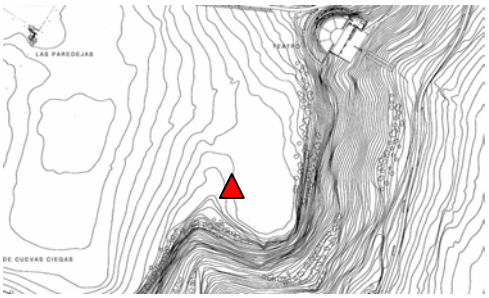
Descripción Literal

Situado en el Alto del Castro, al Suroeste del yacimiento arqueológico de Clunia, en terreno erial. Desde Aranda del Duero por la carretera a Salas de los Infantes(C-111), tomando el desvío a Peñalba de Castro. Sin abandonarlo se toma un carril a la izquierda con acceso al recinto cerrado del yacimiento. Recorrer 550m en dirección al aparcamiento, donde sale una senda a la izquierda; avanzar según croquis 275m hasta la señal.

Croquis de detalle



Mapa de situación



Fotografía

Red Clvnia Svlpicia ***Estación:*** 7000
Tipo de señal: Hito

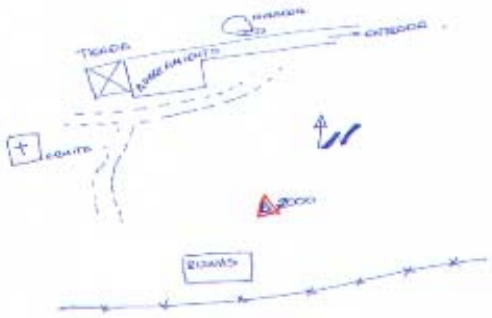
Coordenadas UTM ***Uso:*** 30
x: 469669.331 m
y: 4625531.720 m
h ortométrica: 1016.772 m

Coordenadas ETRS-89
x: 41º 46´ 45.0294´´ N
y: 3º 21´ 58.5895´´ W
h ortométrica: 1070.137 m

Descripción Literal

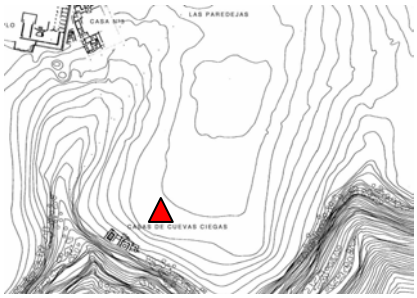
Situado en el Alto del Castro, al Suroeste del yacimiento arqueológico de Clunia, en terreno erial. Desde Aranda del Duero por la carretera a Salas de los Infantes(C-111), tomando el desvío a Peñalba de Castro. Sin abandonarlo se toma un carril a la izquierda con acceso al recinto cerrado del yacimiento. Seguir hasta el aparcamiento y avanzar en dirección Sur , a la derecha de la Ermita Ntr.Señora de Castro, recorremos 425m hasta la señal, situada al Noreste de un conjunto arqueológico próximo a la valla del yacimiento.

Croquis de detalle



Fotografía

Mapa de situación



Red Clvnia Svlpicia ***Estación:*** Estaca 1
Tipo de señal: Estaca

Coordenadas UTM ***Uso:*** 30
x: 469343.603 m
y: 4626319.811 m
h ortométrica: 1002.086 m

Coordenadas ETRS-89
x: 41º 47´ 10.5381´´ N
y: 3º 22´ 12.8462´´ W
h ortométrica: 1055.461 m

Descripción Literal

Situado en el Alto del Castro, al Suroeste del yacimiento arqueológico de Clunia, en terreno erial. Desde Aranda del Duero por la carretera a Salas de los Infantes(C-111), tomando el desvío a Peñalba de Castro. Sin abandonarlo se toma un carril a la izquierda con acceso al recinto cerrado del yacimiento. Seguir hasta el aparcamiento y avanzar en dirección Oeste hasta "Casa Taracena", antes de la cual sale un camino en dirección Noreste, recorriendo unos 800 m, se llega a una puerta de color verde, situándose la señal, el la cabeza del talud que se encuentra a la izquierda.

Croquis de detalle

Mapa de situación

Fotografía

Red Clvnia Svlpicia ***Estación:*** Estaca 2
Tipo de señal: Estaca

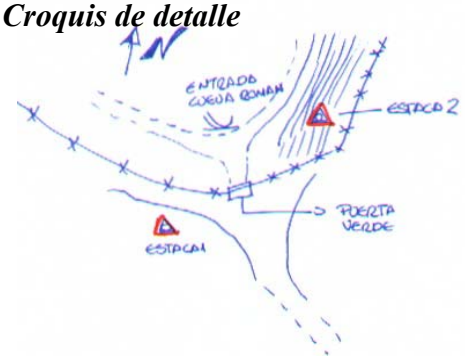
Coordenadas UTM ***Uso:*** 30
x: 469376.566 m
y: 4626315.619 m
h ortométrica: 1002.869 m

Coordenadas ETRS-89
x: 41º 47´ 10.4067´´ N
y: 3º 22´ 11.4173´´ W
h ortométrica: 1056.244 m

Descripción Literal

Situado en el Alto del Castro, al Suroeste del yacimiento arqueológico de Clunia, en terreno erial. Desde Aranda del Duero por la carretera a Salas de los Infantes(C-111), tomando el desvío a Peñalba de Castro. Sin abandonarlo se toma un carril a la izquierda con acceso al recinto cerrado del yacimiento. Seguir hasta el aparcamiento y avanzar en dirección Oeste hasta "Casa Taracena", antes de la cual sale un camino en dirección Noreste, recorriendo unos 800 m, se llega a una puerta de color verde, situándose la señal, a la derecha en el exterior del yacimiento a unos cinco metros de la valla.

Croquis de detalle



Mapa de situación

Fotografía

Red Clvnia Svlpicia ***Estación:*** Aparca
Tipo de señal: Clavo

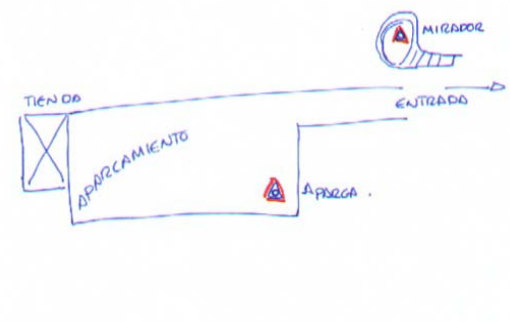
Coordenadas UTM ***Uso:*** 30
x: 469399.250 m
y: 4625781.002 m
h ortométrica: 1020.584 m

Coordenadas ETRS-89
x: 41º 46´ 53.0750´´ N
y: 3º 22´ 10.3354´´ W
h ortométrica: 1073.950 m

Descripción Literal

Situado en el Alto del Castro, al Suroeste del yacimiento arqueológico de Clunia, en terreno erial. Desde Aranda del Duero por la carretera a Salas de los Infantes(C-111), tomando el desvío a Peñalba de Castro. Sin abandonarlo se toma un carril a la izquierda con acceso al recinto cerrado del yacimiento. Seguir hasta el aparcamiento, situándose la señal a la entrada del mismo en la esquina Sureste.

Croquis de detalle



Fotografía

Mapa de situación

REGENTE

Estación: Piconisio
Tipo de señal: Vértice

Coordenadas UTM ***Uso:*** 30
x: 465740.209 m
y: 4625861.689 m
h ortométrica: 1015.828 m

Coordenadas ETRS-89
x: 41º 46´ 55.1532´´ N
y: 3º 24´ 48.8631´´ W
h ortométrica: 1069.144 m

Descripción Literal

Situado en la cima del monte La Muela, en el lugar de Piconisio, en terreno de erial y pasto. Se accede desde el lado oeste de Coruña del Conde (C-111), por un camino que sale hacia el norte. Sin abandonarlo, según croquis, a 2,8 Km. se toma un carril a la derecha, que sube a la muela y en 300m más conduce a señal.

Croquis de detalle

Mapa de situación

Fotografía

11.4 Anexo 4. Ajuste, cálculo y resultados del levantamiento gravimétrico.

1. Anillos gravimétricos observados

Pto	Hora	h,h	Lectura	Media	Hmedia	Cierre	*1,02367	Cierre	Corr Deriva
Anillo nº10				Lectura			mgal	mgal	mgal
46	9,50,58	9,8494	3506,9875		ΔLectura				0,0000
46	9,52,13	9,8703	3506,9891	**3506,9883**	**9,8598**		**3589,9987**		**3589,9987**
47	9,58,55	9,9819	3507,0971		ΔLectura				-0,0311
47	10,02,11	10,0364	3507,0951	**3507,0961**	**10,0092**		**3590,1091**		**3590,0780**
48	10,10,42	10,1783	3506,9941		ΔLectura				-0,0683
48	10,11,54	10,1983	3506,9929	**3506,9935**	**10,1883**		**3590,0040**		**3589,9357**
49	10,19,56	10,3222	3507,1069		ΔLectura				-0,1046
49	10,24,12	10,4033	3507,0992	**3507,1031**	**10,3628**		**3590,1162**		**3590,0116**
42	10,29,29	10,4914	3506,9900		ΔLectura				-0,1338
42	10,30,55	10,5153	3507,1022	**3507,0461**	**10,5033**		**3590,0579**		**3589,9241**
43	10,36,48	10,6133	3506,8800		ΔLectura				-0,1587
43	10,37,59	10,6331	3506,9910	**3506,9355**	**10,6232**		**3589,9447**		**3589,7859**
44	10,42,14	10,7039	3506,6582		ΔLectura				-0,1777
44	10,43,30	10,7250	3506,5487	**3506,6035**	**10,7144**		**3589,6048**		**3589,4270**
45	10,48,04	10,8011	3506,2141		ΔLectura				-0,1974
45	10,49,03	10,8175	3506,2215	**3506,2178**	**10,8093**		**3589,2100**		**3589,0125**
46	10,58,10	10,9694	3507,2161		ΔLectura				-0,2321
46	10,58,58	10,9828	3507,2140	**3507,2151**	**10,9761**	0,2267	**3590,2308**	0,2321	**3589,9987**
	Hfinal			Hinicial		Δt	Cd		
	10,9761			9,8598		**1,1163**	**0,20794**		

Pto	Hora	h,h	Lectura	Media		Cierre	*1,02367	Cierre	Corr Deriva
Anillo nº9				Lectura			mgal	mgal	mgal
45	11,14,27	11,2408	3506,0355		ΔLectura				0,0000
45	11,15,39	11,2608	3506,0276	**3506,0315**	**11,2508**		**3589,0193**		**3589,0193**
44	11,18,54	11,3150	3506,4251		ΔLectura				-0,0003
44	11,19,53	11,3314	3506,4033	**3506,4142**	**11,3232**		**3589,4110**		**3589,4107**
43	11,22,31	11,3753	3506,7801		ΔLectura				-0,0005
43	11,23,37	11,3936	3506,7993	**3506,7897**	**11,3844**		**3589,7954**		**3589,7949**
42	11,27,19	11,4553	3506,9210		ΔLectura				-0,0009
42	11,28,42	11,4783	3506,9303	**3506,9257**	**11,4668**		**3589,9346**		**3589,9337**
41	11,33,12	11,5533	3507,1566		ΔLectura				-0,0012
41	11,34,10	11,5694	3507,1631	**3507,1598**	**11,5614**		**3590,1743**		**3590,1731**
40	11,37,50	11,6306	3507,0384		ΔLectura				-0,0016
40	11,38,48	11,6467	3507,0296	**3507,0340**	**11,6386**		**3590,0455**		**3590,0439**
39	11,42,59	11,7164	3506,8612		ΔLectura				-0,0019
39	11,43,57	11,7325	3506,8528	**3506,8570**	**11,7244**		**3589,8643**		**3589,8624**
38	11,48,14	11,8039	3506,6985		ΔLectura				-0,0023
38	11,49,19	11,8219	3506,7158	**3506,7071**	**11,8129**		**3589,7109**		**3589,7086**
45	11,53,23	11,8897	3506,0355		ΔLectura				-0,0026
45	11,54,14	11,9039	3506,0326	**3506,0341**	**11,8968**	0,0025	**3589,0219**	0,0026	**3589,0193**
	Hfinal			Hinicial		Δt	Cd		
	11,8968			11,2508		**0,6460**	**0,004025**		

Pto	Hora	h,h	Lectura	Media		Cierre	*1,02367	Cierre	Corr Deriva
Anillo nº8				Lectura			mgal	mgal	mgal
19	13,25,16	13,4211	3507,5603		ΔLectura				0,0000
19	13,28,35	13,4764	3507,5590	**3507,5597**	**13,4488**		**3590,5836**		**3590,5836**
27	13,31,42	13,5283	3506,6055		ΔLectura				-0,0008
27	13,35,18	13,5883	3506,5820	**3506,5937**	**13,5583**		**3589,5948**		**3589,5940**
38	13,44,39	13,7442	3506,7125		ΔLectura				-0,0024
38	13,48,54	13,8150	3506,7414	**3506,7270**	**13,7796**		**3589,7312**		**3589,7288**
39	13,54,10	13,9028	3506,8805		ΔLectura				-0,0035
39	13,58,12	13,9700	3506,8743	**3506,8774**	**13,9364**		**3589,8852**		**3589,8817**
40	14,05,10	14,0861	3507,2251		ΔLectura				-0,0049
40	14,08,54	14,1483	3507,2038	**3507,2144**	**14,1172**		**3590,2302**		**3590,2253**
41	14,13,18	14,2217	3507,1705		ΔLectura				-0,0059
41	14,18,44	14,3122	3507,1878	**3507,1792**	**14,2670**		**3590,1941**		**3590,1882**
19	14,24,12	14,4033	3507,5687		ΔLectura				-0,0071
19	14,26,55	14,4486	3507,5645	**3507,5666**	**14,4260**	0,0069	**3590,5907**	0,0071	**3590,5836**
	Hfinal			Hinicial		Δt	Cd		
	14,4260			13,4488		**0,9772**	**0,007266**		

Pto	Hora	h,h	Lectura	Media		Cierre	*1,02367	Cierre	Corr Deriva
Anillo nº7				Lectura			mgal	mgal	mgal
37	12,02,22	12,0394	3505,6591		ΔLectura				0,0000
37	12,03,40	12,0611	3505,7660	**3505,7126**	**12,0503**		**3588,6928**		**3588,6928**
36	12,06,23	12,1064	3505,6551		ΔLectura				-0,0004
36	12,07,35	12,1239	3505,4395	**3505,5473**	**12,1151**		**3588,5236**		**3588,5232**
35	12,10,55	12,1819	3505,7758		ΔLectura				-0,0009
35	12,12,10	12,2028	3505,7650	**3505,7704**	**12,1924**		**3588,7520**		**3588,7511**
34	12,15,04	12,2511	3505,4425		ΔLectura				-0,0013
34	12,16,01	12,2669	3505,4428	**3505,4427**	**12,2590**		**3588,4165**		**3588,4151**
33	12,18,47	12,3131	3505,3309		ΔLectura				-0,0018
33	12,20,54	12,3483	3505,2157	**3505,2733**	**12,3307**		**3588,2431**		**3588,2413**
32	12,30,23	12,5064	3506,2222		ΔLectura				-0,0030
32	12,31,10	12,5194	3506,1095	**3506,1659**	**12,5129**		**3589,1568**		**3589,1538**
31	12,36,35	12,6097	3506,4371		ΔLectura				-0,0036
31	12,37,28	12,6244	3506,4389	**3506,4380**	**12,6171**		**3589,4354**		**3589,4318**
30	12,40,20	12,6722	3506,4450		ΔLectura				-0,0040
30	12,40,51	12,6808	3506,4441	**3506,4446**	**12,6765**		**3589,4421**		**3589,4381**
29	12,43,28	12,7244	3506,2235		ΔLectura				-0,0044
29	12,44,11	12,7364	3506,3308	**3506,2772**	**12,7304**		**3589,2707**		**3589,2664**
28	12,46,46	12,7794	3506,3351		ΔLectura				-0,0047
28	12,47,24	12,7908	3506,3340	**3506,3346**	**12,7851**		**3589,3295**		**3589,3248**
37	12,52,10	12,8694	3505,6610		ΔLectura				-0,0053
37	12,53,32	12,8922	3505,7745	**3505,7178**	**12,8808**	0,0052	**3588,6981**	0,0053	**3588,6928**
	Hfinal			Hinicial		Δt	Cd		
	12,8808			12,0503		**0,8306**	**0,006409**		

Pto	Hora	h,h	Lectura	Media		Cierre	*1,02367	Cierre	Corr Deriva
Anillo nº6				Lectura			**mgal**	**mgal**	**mgal**
28	12,02,15	12,0375	3506,3405		ΔLectura				0,0000
28	12,04,28	12,0744	3506,3368	**3506,3387**	**12,0560**		**3589,3337**		**3589,3337**
29	12,07,55	12,1319	3506,2884		ΔLectura				-0,0007
29	12,10,38	12,1772	3506,2744	**3506,2814**	**12,1546**		**3589,2751**		**3589,2744**
30	12,14,58	12,2494	3506,4405		ΔLectura				-0,0014
30	12,17,52	12,2978	3506,4285	**3506,4345**	**12,2736**		**3589,4318**		**3589,4304**
31	12,22,13	12,3703	3506,4401		ΔLectura				-0,0023
31	12,26,44	12,4455	3506,4461	**3506,4431**	**12,4079**		**3589,4406**		**3589,4383**
32	12,31,51	12,5308	3506,1581		ΔLectura				-0,0033
32	12,33,52	12,5644	3506,1550	**3506,1566**	**12,5476**		**3589,1473**		**3589,1440**
23	12,38,19	12,6386	3507,3812		ΔLectura				-0,0040
23	12,41,25	12,6903	3507,3898	**3507,3855**	**12,6645**		**3590,4053**		**3590,4013**
24	12,44,33	12,7425	3506,6059		ΔLectura				-0,0047
24	12,47,55	12,7956	3506,6304	**3506,6181**	**12,7691**		**3589,6198**		**3589,6151**
25	12,50,14	12,8372	3507,0681		ΔLectura				-0,0053
25	12,53,18	12,8883	3507,0722	**3507,0701**	**12,8628**		**3590,0825**		**3590,0772**
26	12,56,52	12,9477	3506,8882		ΔLectura				-0,0060
26	12,59,15	12,9875	3506,8727	**3506,8804**	**12,9676**		**3589,8883**		**3589,8823**
27	13,02,50	13,0472	3506,6091		ΔLectura				-0,0060
27	13,04,55	13,0819	3506,6039	**3506,6065**	**12,9596**		**3589,6079**		**3589,6019**
28	13,09,10	13,1528	3506,3381		ΔLectura				-0,0075
28	13,13,25	13,2236	3506,3539	**3506,3460**	**13,1882**	0,0073	**3589,3412**	0,0075	**3589,3337**
	Hfinal			Hinicial		Δt	Cd		
	13,1882			12,0560		**1,1323**	**0,006624**		

Pto	Hora	h,h	Lectura	Media		Cierre	*1,02367	Cierre	Corr Deriva
Anillo nº5				Lectura			**mgal**	**mgal**	**mgal**
27	13,05,59	13,0997	3506,6582		ΔLectura				0,0000
27	13,07,14	13,1206	3506,5532	**3506,6057**	**13,1101**		**3589,6071**		**3589,6071**
26	13,10,43	13,1786	3506,8822		ΔLectura				0,0004
26	13,12,09	13,2025	3506,8767	**3506,8795**	**13,1906**		**3589,8873**		**3589,8876**
25	13,16,27	13,2742	3507,0000		ΔLectura				0,0008
25	13,18,11	13,3031	3507,1120	**3507,0560**	**13,2886**		**3590,0680**		**3590,0688**
24	13,22,14	13,3706	3506,5521		ΔLectura				0,0012
24	13,22,51	13,3808	3506,6611	**3506,6066**	**13,3757**		**3589,6080**		**3589,6092**
23	13,25,27	13,4242	3507,3358		ΔLectura				0,0014
23	13,26,38	13,4439	3507,4371	**3507,3865**	**13,4340**		**3590,4063**		**3590,4077**
22	13,31,47	13,5297	3507,2151		ΔLectura				0,0019
22	13,32,35	13,5431	3507,2230	**3507,2191**	**13,5364**		**3590,2349**		**3590,2368**
21	13,34,55	13,5819	3507,2201		ΔLectura				0,0022
21	13,36,30	13,6083	3507,3340	**3507,2771**	**13,5951**		**3590,2943**		**3590,2965**
20	13,40,31	13,6753	3507,4399		ΔLectura				0,0026
20	13,41,13	13,6869	3507,4361	**3507,4380**	**13,6811**		**3590,4591**		**3590,4616**
19	13,44,02	13,7339	3507,5519		ΔLectura				0,0028
19	13,45,00	13,7500	3507,5530	**3507,5525**	**13,7419**		**3590,5762**		**3590,5790**
27	13,49,29	13,8247	3506,5492		ΔLectura				0,0032
27	13,50,17	13,8381	3506,6559	**3506,6026**	**13,8314**	-0,0032	**3589,6038**	-0,0032	**3589,6071**
	Hfinal			Hinicial		Δt	Cd		
	13,8314			13,1101		**0,7212**	**-0,004471**		

Pto	Hora	h,h	Lectura	Media		Cierre	*1,02367	Cierre	Corr Deriva
Anillo nº4				Lectura			**mgal**	**mgal**	**mgal**
19	10,36,45	10,6125	3507,5503		ΔLectura				0,0000
19	10,39,13	10,6536	3507,5434	**3507,5469**	**10,6331**		**3590,5705**		**3590,5705**
20	10,45,26	10,7572	3507,4360		ΔLectura				-0,0018
20	10,48,36	10,8100	3507,4422	**3507,4391**	**10,7836**		**3590,4602**		**3590,4584**
21	10,55,20	10,9222	3507,2948		ΔLectura				-0,0038
21	10,59,15	10,9875	3507,2882	**3507,2915**	**10,9549**		**3590,3091**		**3590,3053**
22	11,03,26	11,0572	3507,2381		ΔLectura				-0,0052
22	11,05,55	11,0986	3507,2287	**3507,2334**	**11,0779**		**3590,2496**		**3590,2444**
14	11,09,28	11,1577	3507,6572		ΔLectura				-0,0065
14	11,12,42	11,2116	3507,6514	**3507,6543**	**11,1847**		**3590,6805**		**3590,6740**
15	11,17,57	11,2992	3507,7869		ΔLectura				-0,0080
15	11,20,15	11,3375	3507,7949	**3507,7909**	**11,3184**		**3590,8203**		**3590,8123**
16	11,24,29	11,4081	3507,4956		ΔLectura				-0,0093
16	11,27,03	11,4508	3507,4920	**3507,4938**	**11,4295**		**3590,5162**		**3590,5069**
17	11,33,51	11,5642	3507,8492		ΔLectura				-0,0112
17	11,37,02	11,6172	3507,8430	**3507,8461**	**11,5907**		**3590,8768**		**3590,8656**
18	11,42,11	11,7030	3508,0203		ΔLectura				-0,0120
18	11,44,48	11,7467	3508,0126	**3508,0165**	**11,6555**		**3591,0512**		**3591,0392**
19	11,48,15	11,8042	3507,5630		ΔLectura				-0,0141
19	11,52,10	11,8694	3507,5583	**3507,5606**	**11,8368**	0,0138	**3590,5846**	0,0141	**3590,5705**
	Hfinal			Hinicial		Δt	Cd		
	11,8368			10,6331		**1,2038**	**0,011713**		

Pto	Hora	h,h	Lectura	Media		Cierre	*1,02367	Cierre	Corr Deriva
Anillonº3				Lectura			**mgal**	**mgal**	**mgal**
18	13,57,21	13,9558	3508,0055		ΔLectura				0,0000
18	13,58,15	13,9708	3508,0012	**3508,0034**	**13,9633**		**3591,0378**		**3591,0378**
17	14,01,35	14,0264	3507,8779		ΔLectura				-0,0376
17	14,02,07	14,0353	3507,8757	**3507,8768**	**14,0308**		**3590,9082**		**3590,8706**
16	14,04,32	14,0756	3507,5539		ΔLectura				-0,0667
16	14,05,25	14,0903	3507,5550	**3507,5545**	**14,0829**		**3590,5783**		**3590,5116**
15	14,07,51	14,1308	3507,8812		ΔLectura				-0,0964
15	14,08,29	14,1414	3507,8791	**3507,8802**	**14,1361**		**3590,9117**		**3590,8153**
14	14,11,16	14,1878	3507,7670		ΔLectura				-0,1287
14	14,12,01	14,2003	3507,7728	**3507,7699**	**14,1940**		**3590,7988**		**3590,6701**
13	14,18,45	14,3125	3508,0000		ΔLectura				-0,1985
13	14,19,33	14,3258	3508,0002	**3508,0001**	**14,3192**		**3591,0345**		**3590,8360**
12	14,22,54	14,3817	3507,9959		ΔLectura				-0,2381
12	14,23,56	14,3989	3508,0000	**3507,9980**	**14,3903**		**3591,0323**		**3590,7941**
11	14,29,22	14,4894	3508,2172		ΔLectura				-0,3003
11	14,30,50	14,5139	3508,2185	**3508,2179**	**14,5017**		**3591,2574**		**3590,9571**
10	14,35,19	14,5886	3508,4371		ΔLectura				-0,3547
10	14,36,35	14,6097	3508,4389	**3508,4380**	**14,5992**		**3591,4827**		**3591,1281**
18	14,39,33	14,6592	3508,3300		ΔLectura				-0,3918
18	14,40,20	14,6722	3508,4421	**3508,3861**	**14,6657**	0,3827	**3591,4295**	0,3918	**3591,0378**
	Hfinal			Hinicial		Δt	Cd		
	14,6657			13,9633		**0,7024**	**0,557774**		

Pto	Hora	h,h	Lectura	Media		Cierre	*1,02367	Cierre	Corr Deriva
Anillo nº2				Lectura			mgal	mgal	mgal
10	9,30,25	9,5064	3508,0912		ΔLectura				0,0000
10	9,33,50	9,5639	3508,0882	**3508,0897**	**9,5352**		**3591,1262**		**3591,1262**
11	9,38,46	9,6461	3507,9302		ΔLectura				-0,0021
11	9,43,52	9,7311	3507,9159	**3507,9231**	**9,6886**		**3590,9556**		**3590,9535**
12	9,48,30	9,8083	3507,7688		ΔLectura				-0,0040
12	9,51,23	9,8564	3507,7663	**3507,7675**	**9,8324**		**3590,7964**		**3590,7924**
13	9,55,37	9,9269	3507,8154		ΔLectura				-0,0056
13	9,58,25	9,9736	3507,8064	**3507,8109**	**9,9503**		**3590,8408**		**3590,8352**
6	10,03,12	10,0533	3508,2263		ΔLectura				-0,0073
6	10,05,56	10,0989	3508,2226	**3508,2244**	**10,0761**		**3591,2641**		**3591,2568**
7	10,08,24	10,1400	3508,0133		ΔLectura				-0,0084
7	10,10,34	10,1761	3508,0104	**3508,0119**	**10,1581**		**3591,0465**		**3591,0381**
8	10,13,54	10,2317	3508,5608		ΔLectura				-0,0096
8	10,15,35	10,2597	3508,5744	**3508,5676**	**10,2457**		**3591,6154**		**3591,6058**
9	10,18,22	10,3061	3508,8919		ΔLectura				-0,0108
9	10,21,44	10,3622	3508,9006	**3508,8962**	**10,3342**		**3591,9518**		**3591,9410**
10	10,25,13	10,4203	3508,1032		ΔLectura				-0,0123
10	10,28,20	10,4722	3508,1003	**3508,1017**	**10,4463**	0,0120	**3591,1385**	0,0123	**3591,1262**
	Hfinal			Hinicial		Δt	Cd		
	10,4463			9,5352		**0,9111**	**0,0135**		

Pto	Hora	h,h	Lectura	Media		Cierre	*1,02367	Cierre	Corr Deriva
Anillo nº1				Lectura			mgal	mgal	mgal
9	14,53,55	14,8986	3508,8850		ΔLectura				0,0000
9	14,55,07	14,9186	3508,8831	**3508,8841**	**14,9086**		**3591,9393**		**3591,9393**
8	14,57,57	14,9658	3508,5570		ΔLectura				0,0003
8	14,58,58	14,9828	3508,5555	**3508,5563**	**14,9743**		**3591,6038**		**3591,6041**
7	15,02,17	15,0381	3508,0011		ΔLectura				0,0006
7	15,02,45	15,0458	3508,0018	**3508,0015**	**15,0419**		**3591,0358**		**3591,0365**
6	15,04,50	15,0806	3508,2172		ΔLectura				0,0008
6	15,05,27	15,0908	3508,2181	**3508,2177**	**15,0857**		**3591,2572**		**3591,2580**
5	15,08,58	15,1494	3508,9960		ΔLectura				0,0012
5	15,09,53	15,1647	3508,9989	**3508,9975**	**15,1571**		**3592,0554**		**3592,0566**
3	15,14,51	15,2475	3509,2210		ΔLectura				0,0016
3	15,15,37	15,2603	3509,2258	**3509,2234**	**15,2539**		**3592,2867**		**3592,2883**
4	15,20,02	15,3339	3509,5538		ΔLectura				0,0020
4	15,20,59	15,3497	3509,5570	**3509,5554**	**15,3418**		**3592,6266**		**3592,6286**
1	15,24,29	15,4081	3509,6600		ΔLectura				0,0024
1	15,25,08	15,4189	3509,6615	**3509,6608**	**15,4135**		**3592,7344**		**3592,7368**
9	15,29,42	15,4950	3508,8785		ΔLectura				0,0028
9	15,30,54	15,5150	3508,8841	**3508,8813**	**15,5050**	-0,0028	**3591,9365**	-0,0028	**3591,9393**
	Hfinal			Hinicial		Δt	Cd		
	15,5050			14,9086		**0,5964**	**-0,00472**		

2. Ajuste por Mínimos Cuadrados

El ajuste de la observación gravimétrica, se ha realizado mediante el método paramétrico, según se indica en el correspondiente capítulo *6.3.3.1 Ajuste de la red por mínimos cuadrados.*

El sistema matricial planteado es:

$$V = AX - L$$

De forma que la solución, se determina mediante el siguiente cálculo:

$$A^t PA = N$$

$$A^t PL = T$$

$$X = N^{-1}T$$

Mientras que para el cálculo de las precisiones obtenidas, se utilizan las siguientes expresiones:

$$Q_{xx} = N^{-1} \qquad \sigma_0^2 = \frac{V^t PV}{r} = 0{,}000759 \qquad \Sigma_{xx} = \sigma_0^2 Q_{xx}$$

El cálculo matricial correspondiente, se ha calculado mediante una hoja de cálculo Excel, que se adjunta en formato digital a la memoria, siendo los valores más significativos del cálculo los que a continuación se muestran*:

(Nota: La matrices A, N, t , Qxx, ∑xx, no se muestran en este anexo por su tamaño, pudiendo ser consultadas en el archivo digital adjunto)*

A x - L = V

-0,44846	-0,44846	0,00000
0,340273	0,34027	0,00000
-0,57203	-0,57203	0,00000
-0,7992	-0,79859	-0,00060
-0,7992	-0,79980	0,00060
-0,22012	-0,22152	0,00141
0,567665	0,56761	0,00005
0,335227	0,33525	-0,00002
-0,22012	-0,21871	-0,00141
0,567665	0,56772	-0,00005
0,335227	0,33521	0,00002
-0,81388	-0,81481	0,00094
-0,81388	-0,81294	-0,00094

-0,17182	-0,17267	0,00085
-0,16206	-0,16114	-0,00092
0,042337	0,04281	-0,00047
0,042337	0,04186	0,00047
-0,16206	-0,16298	0,00092
-0,17182	-0,17098	-0,00085
0,170418	0,16720	0,00322
0,358871	0,35903	-0,00016
-0,30457	-0,30374	-0,00083
0,141699	0,14516	-0,00347
-0,1639	-0,16585	0,00195
-0,1639	-0,16195	-0,00195
0,170418	0,17364	-0,00322
0,358871	0,35871	0,00016
-0,30457	-0,30540	0,00083
0,141699	0,13823	0,00347
-0,0626	-0,06094	-0,00166
-0,16143	-0,15311	-0,00833
-0,11706	-0,11206	-0,00499
-0,46445	-0,46872	0,00427
-0,46445	-0,46018	-0,00427
-0,0626	-0,05964	-0,00296
-0,16143	-0,16514	0,00371
-0,11706	-0,11743	0,00037
-0,28278	-0,28059	-0,00219
-0,19034	-0,18117	-0,00917
0,458555	0,45965	-0,00109
-0,79469	-0,79857	0,00388
0,165363	0,17090	-0,00554
0,165363	0,16444	0,00092
-0,28278	-0,28035	-0,00243
-0,19034	-0,19489	0,00455
0,458555	0,46208	-0,00352
-0,79469	-0,78619	-0,00850
-0,28607	-0,29423	0,00815
0,000793	0,00791	-0,00712
0,16381	0,15591	0,00790
-0,05883	-0,05925	0,00042
-0,27268	-0,26821	-0,00446
-0,27268	-0,27714	0,00446
-0,28607	-0,27792	-0,00815
0,000793	-0,00632	0,00712
0,16381	0,17171	-0,00790
-0,05883	-0,05841	-0,00042
0,169577	0,16958	0,00000
-0,22789	-0,22789	0,00000
0,335935	0,33594	0,00000
0,173818	0,17382	0,00000
-0,90762	-0,91251	0,00489
-0,90762	-0,90272	-0,00489

-0,403	-0,39544	-0,00755
-0,403	-0,41055	0,00755
0,045961	-0,03719	0,08315
0,262616	0,34369	-0,08107
0,153308	0,15286	0,00045
0,045961	0,12911	-0,08315
0,262616	0,18155	0,08107
0,153308	0,15376	-0,00045
-0,69942	-0,68934	-0,01008
-0,69942	-0,70950	0,01008
-0,40296	-0,39141	-0,01155
-0,37152	-0,38415	0,01263
-0,13851	-0,13887	0,00036
-0,40296	-0,41450	0,01155
-0,37152	-0,35888	-0,01263
-0,13851	-0,13814	-0,00036
0,082696	0,08753	-0,00483
0,082696	0,07787	0,00483
0,075869	0,07587	0,00000
-0,14228	-0,14228	0,00000
0,0793	0,07930	0,00000
-0,98498	-0,98960	0,00462

Siendo el resultado final, el valor de los parámetros ajustados, que en este caso son los incrementos de los valores observados entre cada punto, así como la precisión obtenida en el cálculo:

Parámetro	Puntos	X (ΔMgal)	σ (mGal)
1	1 3	-0,44846	0.027
2	3 4	0,340273	0.027
3	4 5	-0,57203	0.027
4	5 6	-0,7992	0.019
5	6 7	-0,22012	0.019
6	7 8	0,567665	0.019
7	8 9	0,335227	0.019
8	9 10	-0,81388	0.019
9	10 11	-0,17182	0.019
10	11 12	-0,16206	0.019
11	12 13	0,042337	0.019
12	13 14	-0,1639	0.019
13	14 15	0,141699	0.019
14	15 16	-0,30457	0.019
15	16 17	0,358871	0.019
16	17 18	0,170418	0.019
17	18 19	-0,46445	0.019
18	19 20	-0,11706	0.018
19	20 21	-0,16143	0.018
20	21 22	-0,0626	0.018
21	22 23	0,165363	0.018
22	23 24	-0,79469	0.018
23	24 25	0,458555	0.018

24	25 26	-0,19034	0.018
25	26 27	-0,28278	0.018
26	27 28	-0,27268	0.019
27	28 29	-0,05883	0.019
28	29 30	0,16381	0.019
29	30 31	0,000793	0.019
30	31 32	-0,28607	0.019
31	32 33	-0,90762	0.019
32	33 34	0,173818	0.027
33	34 35	0,335935	0.027
34	35 36	-0,22789	0.027
35	36 37	0,169577	0.027
36	19 41	-0,403	0.019
37	40 41	0,045961	0.019
38	39 40	0,262616	0.019
39	38 39	0,153308	0.019
40	38 45	-0,69942	0.019
41	44 45	-0,40296	0.019
42	43 44	-0,37152	0.019
43	42 43	-0,13851	0.019
44	42 49	0,082696	0.019
45	48 49	0,075869	0.027
46	47 48	-0,14228	0.027
47	46 47	0,0793	0.027

3. Observaciones y cálculo de la nivelación geométrica

El listado de observaciones, y el cálculo de los desniveles es el siguiente:

Punto	**Δz**		**Anillo**	**Z**	Pto
Estaca1					
1	Estaca1-1	-0,0597		**1002,0778**	Estaca1
3	1_3	-0,5390	-0,5390	**1002,0181**	1
4	3_4	0,9567		**1002,4358**	4
Estaca2		-0,5987		**1002,8517**	Estaca2
3	3_5	2,4639	2,4639	**1001,4791**	3
5					
5	5_6	1,7715	1,7715	**1003,9430**	5
6					
6	6_7	-0,2423	-0,2423	**1005,7145**	6
7	7_8	-0,2124	-0,2124	**1005,4722**	7
8	8_9	-0,2472	-0,2472	**1005,2598**	8
9			-0,7019		
9	9_1	-2,9968	-2,9968	**1002,0158**	1
1			**-0,0023 Cierre**		
9	9_10	1,1083	1,1083	**1005,0126**	9
10	10_11	0,7506	0,7506	**1006,1209**	10
11	11_12	0,1727	0,1727	**1006,8715**	11

12	12_SA1	0,3878	0,3878		1007,0451	12
SA1						
SA1	SA1_13	0,7792	0,7792			
13	13_6	-2,4943	-2,4943	0,7043	1008,2175	13
6			0,0024	Cierre		
13	13_SA2	0,0591	0,0591	2,0903	1008,2175	13
SA2						
SA2	SA2_14	0,6188	0,6188			
14	14_15	-0,9000	-0,9		1008,8792	14
15	15_16	-0,3254	-0,3254		1007,9792	15
16	16_17	-0,2613	-0,2613		1007,6538	16
17	17_18	-1,2524	-1,2524		1007,3925	17
18	18_10	-0,0315	-0,0315	-2,0927	1006,1401	18
10			-0,0024	Cierre	1006,1086	10
18	18_19	3,2597	3,2597	-2,7391		
19	19_20	0,4144	0,4144		1009,3998	19
20	20_21	0,0132	0,0132		1009,8142	20
21	21_22	0,1501	0,1501		1009,8274	21
22	22_14	-1,0983	-1,0983	2,7391	1009,9775	22
14			0	Cierre	1008,8792	14
22	22_23	0,9507	0,9507	0,5777		
23	23_24	0,8189	0,8189		1010,9282	23
24	24_25	0,1174	0,1174		1011,7471	24
25	25_26	0,1123	0,1133		1011,8645	25
26	26_27	0,5369	0,5369		1011,9768	26
27	27_19	-3,1175	-3,1175	-0,5803	1012,5137	27
19			-0,0026	Cierre	1009,3962	19
27	27_28	1,5665	1,5665	1,5865		
28	28_29	-0,2331	-0,2331		1014,0802	28
29	29_30	-0,0067	-0,0067		1013,8471	29
30	30_31	-0,0138	-0,0138		1013,8404	30
31	31_32	0,2673	0,2673		1013,8266	31
32	32_23	-3,1675	-3,1675	-1,5873	1014,0939	32
23			-0,0008	Cierre	1010,9264	23
32	32_33	2,2029	2,2029	0,0137		
33	33_34	-0,0815	-0,0815		1016,2968	33
34	34_35	0,0627	0,0627		1016,2153	34
35	35_36	-0,0090	-0,009		1016,2780	35
36	36_37	0,1783	0,1783		1016,2690	36
37	37_28	-2,3695	-2,3695	-0,0161	1016,4473	37
28			-0,0024	Cierre	1014,0778	28
46	46_47	-0,6666	-0,6666			
47	47_48	-0,1143	-0,1143		1011,6867	47
48	48_49	-0,6186	-0,6186		1011,5724	48
49	49_42	0,4946	0,4946		1010,9538	49
42	42_43	0,9542	0,9542		1011,4484	42
43	43_44	0,1750	0,175		1012,4026	43
44	44_SA3	0,6695	0,6695		1012,5776	44
SA3						
SA3	SA3_45	0,4417	0,4417			
45	45_46	-1,3328	-1,3328			

46			0,0027	Cierre	1012,3533	46
45	45_27	-1,1724	-1,1724	2,2404	1013,6861	45
27	27_38	-1,3650	-1,365			
38					1011,1487	38
38	38_39	-0,8789	-0,8789			
39	39_40	-0,0621	-0,0621		1010,2698	39
40	40_41	-0,5509	-0,5509		1010,2077	40
41	41_42	1,7864	1,7864	-2,2429	1009,6568	41
42			-0,0025	Cierre	1011,4432	42
19	42_19	-2,0530	-2,053		1009,3902	19
4000	4000_13	-1,1784		Fijo	1009,3959	4000
13	4000_12	-2,3508			1008,2175	13
12	4000_11	-2,5244			1007,0451	12
11	4000_14	-0,5167			1006,8715	11
14					1008,8792	14

Como se puede observar en la tabla anterior el error de cierre en cada anillo, partiendo y llegando a un punto de altitud conocida, se encuentra dentro de la tolerancia establecida a priori. No se contempla la aplicación de una corrección a cada anillo, ya que el error de cierre; siempre inferior a 3mm, produciría un error despreciable en el cálculo gravimétrico según la precisión del mismo. Un error en la determinación de la altitud de un punto de 1m produciría un error en el cálculo gravimétrico de 0,2 mGal , por lo para 0.003 m el valor correspondiente sería 0.006 mGal, valor insignificante considerando que la precisión de la observación gravimétrica se sitúa en 0,02 mGal.

4. Cálculo de anomalías residuales

Basándonos en los apartados anteriores, se llegan a determinar las anomalías residuales, como la diferencia entre las anomalías de Bouguer y las anomalías regionales:

$$\Delta_{BouguerSimple} = g_{observada} + \delta_F - \delta_{BouguerSimple} - \gamma_{30}$$

$$\gamma_{30} = 978{,}049(1 + 0{,}0052884\sin^2\varphi - 0{,}0000059\sin^2 2\varphi)$$

$$\Delta_{Residual} = \Delta_{Bouguer} - \Delta_{Regional}$$

Pto	Coord. X	Coord. Y	Lectura	Cota	Lectura Ch	1930γ gal	Bouguer	Regional	Residual
1	469338,736	4626321,891	981592,7368	1002,017	981789,8335	980,3400544	1,450	1,449	0,389
3	469363,313	4626311,909	981592,2883	1001,479	981789,2793	980,3400465	1,449	1,449	-0,158
4	469366,114	4626310,771	981592,6286	1002,436	981789,8077	980,3400456	1,450	1,449	0,372
5	469387,889	4626301,927	981592,0566	1003,943	981789,5322	980,3400385	1,449	1,449	0,103
6	469385,913	4626260,044	981591,2574	1005,715	981789,0814	980,3400047	1,449	1,449	-0,314
7	469362,944	4626256,407	981591,0373	1005,472	981788,8137	980,3400016	1,449	1,449	-0,578
8	469356,867	4626255,445	981591,6049	1005,260	981789,3395	980,3400009	1,449	1,449	-0,052
9	469335,486	4626252,059	981591,9402	1005,013	981789,6262	980,339998	1,450	1,449	0,238
10	469321,177	4626212,547	981591,1263	1006,121	981789,0303	980,3399661	1,449	1,449	0,010
11	469342,357	4626205,256	981590,9545	1006,872	981789,0061	980,3399603	1,449	1,449	-0,009
12	469345,885	4626204,042	981590,7924	1007,045	981788,8782	980,3399593	1,449	1,449	-0,136
13	469368,703	4626196,188	981590,8348	1008,218	981789,1511	980,339953	1,449	1,449	0,144
14	469313,836	4626136,631	981590,6709	1008,879	981789,1174	980,3399048	1,449	1,449	0,158
15	469307,025	4626152,767	981590,8126	1007,979	981789,0821	980,3399178	1,449	1,449	0,110
16	469304,312	4626159,195	981590,508	1007,654	981788,7135	980,3399229	1,449	1,449	-0,264
17	469301,78	4626165,194	981590,8669	1007,393	981789,021	980,3399278	1,449	1,449	0,039
18	469294,251	4626183,035	981591,0373	1006,140	981788,945	980,3399422	1,449	1,449	-0,052
19	469244,166	4626130,547	981590,5728	1009,395	981789,1209	980,3398996	1,449	1,449	-0,036
20	469267,056	4626120,434	981590,4558	1009,814	981789,0862	980,3398915	1,449	1,449	-0,063
21	469271,642	4626118,408	981590,2943	1009,827	981788,9274	980,3398899	1,449	1,449	-0,220
22	469289,962	4626110,315	981590,2317	1009,978	981788,8943	980,3398834	1,449	1,449	-0,246
23	469302,241	4626087,147	981590,3971	1010,927	981789,2465	980,3398648	1,449	1,449	0,124
24	469286,814	4626070,927	981589,6024	1011,747	981788,6131	980,3398516	1,449	1,449	-0,496
25	469284,483	4626068,477	981590,061	1011,865	981789,0947	980,3398496	1,449	1,449	-0,012
26	469282,035	4626065,903	981589,8706	1011,977	981788,9265	980,3398475	1,449	1,449	-0,178
27	469266,684	4626049,959	981589,5878	1012,514	981788,7493	980,3398346	1,449	1,449	-0,343
28	469301,663	4626024,566	981589,3152	1014,079	981788,7845	980,3398142	1,449	1,449	0,181
29	469323,13	4626028,686	981589,2563	1013,847	981788,6801	980,3398176	1,449	1,449	0,073
30	469325,549	4626029,151	981589,4201	1013,840	981788,8426	980,339818	1,449	1,449	0,235
31	469327,485	4626029,522	981589,4209	1013,827	981788,8406	980,3398183	1,449	1,449	0,233
32	469350,675	4626033,973	981589,1349	1014,094	981788,6071	980,339822	1,449	1,449	-0,005
33	469362,768	4625975,199	981588,2272	1016,297	981788,1328	980,3397746	1,448	1,449	-0,431
34	469343,005	4625971,406	981588,4011	1016,215	981788,2906	980,3397714	1,449	1,449	-0,271
35	469337,683	4625970,385	981588,737	1016,278	981788,6389	980,3397706	1,449	1,449	0,079
36	469334,125	4625969,702	981588,5091	1016,269	981788,4092	980,33977	1,449	1,449	-0,150
37	469312,597	4625965,57	981588,6787	1016,447	981788,6139	980,3397666	1,449	1,449	0,058
38	469242,825	4626083,384	981590,5139	1011,149	981789,4069	980,3398615	1,450	1,449	0,288
39	469224,591	4626100,767	981590,6672	1010,270	981789,3873	980,3398755	1,450	1,449	0,254
Pto	Coord. X	Coord. Y	Lectura	Cota	Lectura Ch	1930γ gal	Bouguer	Regional	Residual
40	469220,618	4626104,639	981590,9299	1010,208	981789,6377	980,3398786	1,450	1,449	0,502
41	469202,708	4626122,053	981590,9758	1009,657	981789,5753	980,3398926	1,450	1,449	0,425
42	469184,072	4626069,622	981592,1263	1011,446	981791,0777	980,3398502	1,451	1,451	0,093
43	469200,095	4626047,522	981591,9878	1012,403	981791,1274	980,3398324	1,451	1,451	0,161
44	469203,654	4626042,605	981591,6163	1012,578	981790,7903	980,3398284	1,451	1,451	-0,173
45	469219,677	4626020,501	981591,2133	1013,686	981790,6054	980,3398106	1,451	1,451	-0,340
46	469135,241	4626018,379	981592,0307	1012,353	981791,1606	980,3398086	1,451	1,451	0,218
47	469134,822	4626041,035	981592,11	1011,687	981791,1088	980,3398269	1,451	1,451	0,147
48	469134,708	4626046,034	981591,9678	1011,572	981790,9441	980,339831	1,451	1,451	-0,021
49	469134,295	4626068,339	981592,0436	1010,954	981790,8982	980,339849	1,451	1,451	-0,085

En el anterior cuadro, se muestran los valores de los cálculos realizados, siendo el significado de cada columna el siguiente:

1. Coordenada X, Coordenada Y: el valor de las coordenadas planimétricas de cada punto, siendo estas coordenadas en el sistema ED-50 y proyección UTM. Para el cálculo de las coordenadas geográficas, se han transformado las coordenadas UTM, mediante el software topográfico TopCal 21.

2. Lectura: Valor de la lectura obtenida en la observación gravimétrica realizada, y corregida adecuadamente de la influencia de la deriva instrumental.

3. Cota: Valor de las cotas ortométricas de cada punto, basándose en la nivelación geométrica realizada anteriormente, partiendo de un punto de cota ortométrica conocida.

4. Lectura Ch: Valor de las lecturas observadas, aplicando las reducciones de Faye o Aire libre y Bouguer simple.

5. $1930\gamma mgal$: Valor de la gravedad normal, según la fórmula de Cassinis-Silva, o fórmula de 1930, expresado en gales.

6. Bouguer: Valor de la anomalía de Bouguer, expresado en miligales.

7. Regional: Valor de las anomalías regionales, obtenidas como valor medio de las anomalías de Bouguer, de los puntos correspondientes a dos perfiles gravimétricos consecutivos.

8. Residual: Valor de las anomalías residuales, expresado en miligales.

12. Propuesta e información del proyecto

Ficha del proyecto

- ✓ **Resumen del proyecto**:

Proyecto de implantación de una red básica mediante técnicas GPS para dar cobertura al yacimiento arqueológico "Clvnia Svlpicia" (Peñalba de Castro, Burgos). Obtención de cartografía a escala 1/500 de unas 10 Ha. y realización de un levantamiento gravimétrico de la misma zona, para calcular anomalías residuales de la fuerza de la gravedad, que pongan de manifiesto la existencia de cavidades subterráneas.

- ✓ **Codificación UNESCO**:

Código: **2507.02**

Área o campo:	25	Ciencias de la Tierra y del Espacio
Disciplina:	2507	Geofísica
Subdisciplina:	2507.02	Gravedad (Terrestre) y prospección gravimétrica

- ✓ **Palabras clave**:

  - Red
  - Levantamiento
  - Prospección Gravimétrica
  - Arqueología
  - Clunia Sulpicia