



UNIVERSIDAD DE OVIEDO

**Escuela de
Ingeniería de Minas, Energía y Materiales de Oviedo**

Máster en Ingeniería de Minas



Trabajo Fin de Máster

**Estudio preliminar del potencial de la prospección gravimétrica en
la detección de fallas. Aplicación a la Falla de Ventaniella, sector
Pola de Siero – Nava (Asturias, España)**

Autor: Adrián Suárez González

Tutor: José Paulino Fernández Álvarez

Oviedo, julio de 2016

AGRADECIMIENTOS

Me gustaría dedicar estas breves líneas para mostrar mi agradecimiento a todas aquellas personas que, de alguna manera, forman parte de este trabajo.

En primer lugar, quiero agradecer a D. José Paulino Fernández Álvarez, tutor de este Trabajo Fin de Máster, su completa disposición durante todo este tiempo.

De igual forma me gustaría agradecer la ayuda que siempre he encontrado dentro de la Unidad de Modelización Hidro-Geofísica y de Ensayos No Destructivos de la Universidad de Oviedo, con cuyos medios y equipos se ha llevado a cabo este trabajo. A Andrés, por sus consejos con el gravímetro. A David, por sus lecciones de geología. A David (físico), por sus clases de *Matlab*. A Lorena y Ramón. Y a todos los “*minions*” que mantienen a flote el grupo.

A mis amigos, que me han sufrido durante estos años y que espero no perder nunca. A mi familia, que siempre ha estado y estará ahí.

Y a todas aquellas personas que no he citado expresamente, pero sin cuya ayuda y consejos nunca habría llegado hasta aquí.

RESUMEN

La prospección gravimétrica, junto con otros tipos de prospecciones (sísmica, magnética, eléctrica, etc.), se presenta como un método geofísico no intrusivo muy interesante a la hora de obtener información del interior de la Tierra.

El presente Trabajo Fin de Máster pretende, tras una revisión de los fundamentos teóricos y del estado de la cuestión, evaluar –a nivel de estudio preliminar y en base a los resultados de una campaña de campo– la viabilidad de la prospección gravimétrica en la detección de fallas.

Para ello, se aplica la metodología a un caso real: la Falla de Ventaniella. Se trata de una estructura de enorme relevancia cartográfica en el Norte de la Península Ibérica. Su trazado, de más de 200 km, atraviesa Asturias en dirección NO-SE. El estudio de la Falla de Ventaniella desde diferentes puntos de vista, incluyendo el empleo de la geofísica, es uno de los objetivos del proyecto *Geocantábrica*, en el que se contextualiza este Trabajo Fin de Máster.

La zona de estudio seleccionada se ubica en su sector central. El propósito es comprobar, en su caso, que el trazado en el Mapa Geológico Nacional escala 1:50.000 –con un marcado carácter interpretativo, y por tanto, aproximado– es correlacionable con los datos aportados por la gravimetría. En caso afirmativo, los resultados de este Trabajo serían de aplicación práctica en el proyecto *Geocantábrica*.

Asimismo, se plantean dos determinaciones auxiliares, de interés práctico en una campaña de campo ejecutada en base a un gravímetro SCINTREX modelo CG-5:

- Estudio de la evolución con el tiempo de la deriva instrumental a largo plazo.
Se trata de una desviación sistemática que contamina las medidas tomadas por el equipo. Se debe a sus características constructivas y es dependiente del tiempo. Su conocimiento en detalle para cada equipo permite una corrección precisa de las medidas desviadas.
- Determinación del tiempo de estabilización necesario tras transporte al sitio de medición.
Se trata de un parámetro imprescindible para poder planificar una campaña de campo. El objetivo es cuantificar cuánto tiempo se ha de esperar para tomar medidas con una precisión requerida tras la llegada al punto de medición. El interés de dicha cuantificación radica en el hecho de que transportar el equipo con un cierto grado de inclinación provoca que las medidas tomadas presenten una desviación típica muy elevada durante períodos de tiempo que pueden llegar a varias horas. Esto haría inviable por completo cualquier campaña de campo.

Los resultados obtenidos han permitido establecer las siguientes conclusiones:

- La prospección gravimétrica es una técnica viable para detectar fallas, comprobándose su posible aplicación en estudios de detalle para el caso particular de la Falla de Ventaniella.
- La deriva instrumental a largo plazo, cuando el período de tiempo considerado es lo suficientemente largo, no sigue una tendencia de ascenso lineal (consideración habitual), sino cuadrática.
- Manteniendo unas condiciones de horizontalidad durante el transporte del equipo al sitio de medición, para el caso planteado es suficiente con esperar 10 minutos para comenzar la campaña de campo.

Índice de contenidos

1	OBJETIVOS	1
1.1	Objetivos principales.....	1
1.2	Objetivos secundarios	1
2	INTRODUCCIÓN Y ESTADO DE LA CUESTIÓN.....	3
3	FUNDAMENTO TEÓRICO	8
3.1	Medida de la aceleración gravitatoria: generalidades	8
3.2	Correcciones temporales.....	11
3.2.1	Corrección por marea	12
3.2.2	Corrección por deriva instrumental a largo y a corto plazo	13
3.3	Correcciones no temporales	15
3.3.1	Corrección por aire libre	16
3.3.2	Corrección por latitud	17
3.3.3	Corrección de Bouguer	19
3.3.4	Corrección por terreno	20
4	EQUIPO EMPLEADO: DESCRIPCIÓN Y CARACTERIZACIÓN	25
4.1	Características y funcionalidades	25
4.2	Caracterización de la deriva instrumental a largo plazo	27
5	CAMPAÑA DE CAMPO	33
5.1	Selección del emplazamiento y contexto geológico	33
5.2	Planteamiento de la logística. Esquema y patrón de estacionamiento	40
5.3	Determinación del tiempo de estabilización tras transporte al emplazamiento 43	
5.4	Ejecución de la campaña de campo	49
6	PROCESADO DE DATOS, DISCUSIÓN Y RESULTADOS.....	54
6.1	Análisis crítico de los datos brutos: selección de los datos a tratar	54
6.2	Correcciones	59

6.2.1	Correcciones temporales	59
6.2.2	Corrección por aire libre	61
6.2.3	Corrección por latitud	63
6.2.4	Corrección de Bouguer	65
6.2.5	Corrección por terreno	66
6.3	Curva gravimétrica experimental obtenida.....	69
7	CONCLUSIONES.....	70
8	REFERENCIAS	71
9	ANEXOS	75
9.1	Desviación estándar de la media muestral para datos agrupados, conocidas la varianza muestral y la media de cada grupo.....	75
9.1.1	Deducción.....	75
9.1.2	Código de MATLAB®.....	77
9.2	Tablas de datos	79

Índice de figuras

Figura 2.1. Modelo digital de elevaciones de la Cordillera Cantábrica y principales estructuras tectónicas responsables del relieve (Alonso, Pulgar y Pedreira, 2007)	5
Figura 2.2. Mapa geológico simplificado de la región central de la Cordillera Cantábrica y corte geológico (1), donde se puede apreciar la falla de Ventaniella (adaptado de Alonso et al., 2007)	5
Figura 3.1. Variación debida a las mareas [mGal] del 5 al 15 de Enero de 1986 (tomado de Milsom, 2003).....	12
Figura 3.2. Corrección por terreno basada en la hipótesis de Hammer. (a) Un anillo cilíndrico de radio interno R_i , radio externo R_o y espesor z . Cada sección del anillo es denominada <i>sector</i> . (b) Un sector representando un elemento topográfico sobre el nivel del punto de medida de g (tomado de Burger, 1992).	22
Figura 3.3. Plantilla de Hammer con las zonas B a F.	23
Figura 4.1. Gravímetro Scintrex CG-5 Autograv S/N 081240489. Es el equipo empleado en este Trabajo. La fotografía se corresponde con su base en el laboratorio de la Unidad de Modelización Hidro-Geofísica y de ensayos No Destructivos de la Universidad de Oviedo (Mieres, España).	25
Figura 4.2. Consola del gravímetro SCINTREX CG-5. Obsérvense las teclas numéricas y alfanuméricas, así como las teclas de función y de dirección que permiten acceder a las distintas funcionalidades implementadas.	26
Figura 4.3. Histórico de lecturas del gravímetro CG-5 en la base del laboratorio (febrero 2014 a mayo 2016). Se trata de datos en bruto, sin aplicar las correcciones temporales.	28
Figura 4.4. Ajuste lineal para el histórico de lecturas del gravímetro CG-5 en la base del laboratorio (febrero 2014 a mayo 2016).....	29
Figura 4.5. Ajuste cuadrático para el histórico de lecturas del gravímetro CG-5 en la base del laboratorio (febrero 2014 a mayo 2016).	30
Figura 4.6. Residuos del ajuste lineal para el histórico de lecturas del gravímetro CG-5 en la base del laboratorio (febrero 2014 a mayo 2016).....	31
Figura 4.7. Residuos del ajuste cuadrático para el histórico de lecturas del gravímetro CG-5 en la base del laboratorio (febrero 2014 a mayo 2016).	32
Figura 5.1. Ubicación de El Solanu (Asturias, España)	34
Figura 5.2. Perfil geológico A-A'. Área de El Solanu (Asturias, España)	36

Figura 5.3. Columna estratigráfica del Cretácico asturiano (adaptado de González Fernández et al., 2004). Las formaciones de interés aparecen destacadas en negrita y cursiva (Ma=millones de años).....	39
Figura 5.4. Campaña gravimétrica de prospección de yacimientos de petróleo y gas en Siberia (Federación Rusa). El transporte del CG-5 se realiza mediante vehículo con orugas debido a la dificultad del terreno y a la ausencia de carreteras (Niimorgeofizika-Group, 2009).....	44
Figura 5.5. Evolución de la desviación estándar de la media muestral con el tiempo de estacionamiento. Obsérvese el descenso a medida que aumenta el tamaño de muestra para el cálculo de la media. Con líneas a trazos (azul) se indica el tiempo de estabilización hallado (aprox.10 minutos).....	47
Figura 5.6. Evolución de la desviación estándar de la media muestral con el tiempo de estacionamiento. Obsérvese la línea azul a trazos y compárese con la Figura 5.5 la diferencia temporal en alcanzar el rango de precisión que garantiza el fabricante (de 10 minutos a 4,5 horas)	48
Figura 5.7. Emplazamiento de la estación base. Obsérvese que se trata de un emplazamiento tranquilo, alejado lo máximo posible de la traza central del camino pavimentado y en el que la referencia espacial de la ubicación es evidente. Así se evita cualquier problema que pudiese surgir en posibles ocupaciones en días distintos a los planteados (p. ej., borrado de las marcas de pintura del pavimento), caso de que fuese necesario repetir mediciones.	49
Figura 5.8. Marcaje de los puntos de estacionamiento del gravímetro (destacado en círculo rojo)	50
Figura 5.9. Vista inferior del CG-5 (izquierda) y trípode (derecha). Obsérvese las indicaciones sobre la disposición correcta de los punzones del trípode sobre la base del gravímetro (A, B y C)	51
Figura 5.10. Pantalla de nivelación del CG-5. En la parte superior se indica el sentido de giro de las ruedas del trípode para conseguir la nivelación (F=rueda frontal, L=rueda izquierda, R=rueda derecha). A medida que se giran las ruedas, las líneas horizontal y vertical se mueven hasta que coinciden perpendicularmente en el punto central, momento en el que el CG-5 está nivelado (emoticono ☺). Es conveniente además que, llegados a este punto, la inclinación en segundos de arco (indicada en la parte inferior de la pantalla) sea como máximo de $X=Y=\pm 3$	51
Figura 5.11. Perfil topográfico con la situación de las estaciones. Obsérvese que el espaciado final entre estaciones es menor o igual a 20 metros.....	53

Figura 6.1. Evolución de la desviación estándar de la media muestral para las mediciones realizadas en cada estación: Jornada 1 (líneas negras) y Jornada 2 (líneas rojas). Obsérvese que la diferencia de precisión entre las dos jornadas hace desaconsejable su empleo conjunto sin antes deducir algún tipo de expresión que permita correlacionar las medidas, lo que se escapa a los propósitos de este Trabajo. Con línea a trazos azul se marca la precisión máxima del CG-5 (5 μ Gal).	58
Figura 6.2. Mapa topográfico sobre el que se ha situado la posición de cada estación con el objeto de conocer su cota.....	61
Figura 6.3. Perfil topográfico del conjunto de estaciones obtenido a partir del mapa de la Figura 6.4. mediante el software <i>Surfer</i> [®]	62
Figura 6.5. Curvas gravimétricas: corregidas las derivas temporales (izquierda) y corregido hasta aire libre (derecha).....	63
Figura 6.6. Curvas gravimétricas: corregido hasta latitud (rojo) frente a la curva previa (negro).....	64
Figura 6.7. Comparativa entre curvas gravimétricas: corregido hasta latitud (izquierda) y corregido hasta Bouguer (derecha).	66
Figura 6.8. Plantilla de Hammer (zonas B a F) situada sobre el mapa topográfico de la zona para estimar la cota media de cada sector. Los puntos en rojo representan las distintas estaciones del perfil. En este caso, la plantilla se encuentra situada sobre E1.	67
Figura 6.9. Comparativa de la curva gravimétrica de Bouguer (línea a trazos negra) con respecto a la misma curva con las correcciones por terreno añadidas (línea a trazos roja).	68
Figura 6.10. Curva experimental obtenida tras realizar todas las correcciones. Se observa un salto claro en los valores de aceleración gravitatoria entre los 100 y los 150 m de la estación 1, indicativo de la presencia de la Falla de Ventaniella en esta zona..	69

Índice de tablas

Tabla 3.1. Propiedades de cada uno de los sectores de la plantilla de Hammer considerados en este Trabajo.	23
Tabla 4.1. Descripción de las características de los datos tratados y homogeneizados del histórico de mediciones gravimétricas en el laboratorio (febrero 2014 a mayo 2016).	28
Tabla 4.2. Parámetros del ajuste lineal al histórico de mediciones en el laboratorio (febrero 2014 a mayo 2016).	29
Tabla 4.3. Parámetros del ajuste cuadrático al histórico de mediciones en el laboratorio (febrero 2014 a mayo 2016).	30
Tabla 4.4. Tasa lineal de deriva obtenida por Bonvalot et al. (1998) para distintos equipos SCINTREX CG-3M.	31
Tabla 4.5. Tasa lineal de deriva obtenida por Miranda et al. (2013) para un equipo SCINTREX CG-5.	31
Tabla 5.1. Planificación logística preliminar de la campaña de campo de las Jornadas 1 y 2.	41
Tabla 5.2. Parámetros empleados en el registro de mediciones tomadas para determinar el tiempo de estabilización.	45
Tabla 5.3. Estaciones, denominación, tiempos de ocupación y tiempos muertos para la campaña de campo planteada (Jornada 1 + Jornada 2).	52
Tabla 5.4. Tiempos útiles en la campaña de campo realizada. Se observa que en torno a 1/3 del tiempo no se emplea en realizar medidas.	53
Tabla 6.1. Descripción de los principales parámetros que aparecen en la cabecera de los datos descargados del CG-5.	54
Tabla 6.2. Descripción de las distintas columnas de datos registrados en la memoria interna del CG-5.	54
Tabla 6.3. Medidas aceptadas y rechazadas según los criterios “DUR”, “REJ” y “SD” (Jornadas 1 y 2).	55
Tabla 6.4. Valores medios y errores estándar de la media para cada estación (Jornada 1 y Jornada 2).	57
Tabla 6.5. Determinación del tiempo transcurrido entre cada ocupación de las bases y de la tasa lineal de deriva a corto plazo en la expresión (3.4).	59

Tabla 6.6. Determinación del tiempo transcurrido entre la medida registrada en cada estación y la ocupación inmediatamente anterior de la estación base, así como de la corrección por deriva a corto plazo.....	60
Tabla 6.7. Valores previos a la corrección por deriva a corto plazo y tras aplicar la corrección [mGal].....	60
Tabla 6.8. Coordenadas UTM y cotas de cada estación [m]	62
Tabla 6.9. Latitud de cada estación, gravedad normal, corrección por latitud y valor final tras aplicar dicha corrección.	64
Tabla 6.10. Valores empleados en la expresión (3.9), así como la corrección obtenida.	65
Tabla 6.11. Correcciones por terreno [mGal] para cada estación. Se puede observar la contribución de cada zona de la plantilla de Hammer (B a F) a la corrección final.....	68
Tabla 9.1. Parámetros conocidos para la deducción a realizar.	75
Tabla 9.2. Extracto de las 10 primeras mediciones registradas por el CG5 en las pruebas de estabilización. Se trata de promedios y errores estándar de esos promedios de las series brutas a 6 Hz para ciclos de medición de 2 s	79
Tabla 9.3. Elevaciones medias [m] para cada sector de la plantilla de Hammer (Estación Base).....	79
Tabla 9.4. Elevaciones medias [m] para cada sector de la plantilla de Hammer (Estación 1).....	79
Tabla 9.5. Elevaciones medias [m] para cada sector de la plantilla de Hammer (Estación 2).....	79
Tabla 9.6. Elevaciones medias [m] para cada sector de la plantilla de Hammer (Estación 3).....	80
Tabla 9.7. Elevaciones medias [m] para cada sector de la plantilla de Hammer (Estación 4).....	80
Tabla 9.8. Elevaciones medias [m] para cada sector de la plantilla de Hammer (Estación 5).....	80
Tabla 9.9. Elevaciones medias [m] para cada sector de la plantilla de Hammer (Estación 6).....	80
Tabla 9.10. Elevaciones medias [m] para cada sector de la plantilla de Hammer (Estación 7).....	80
Tabla 9.11. Elevaciones medias [m] para cada sector de la plantilla de Hammer (Estación 8).....	81

Tabla 9.12. Elevaciones medias [m] para cada sector de la plantilla de Hammer (Estación 9).....	81
Tabla 9.13. Elevaciones medias [m] para cada sector de la plantilla de Hammer (Estación 10).....	81
Tabla 9.14. Elevaciones medias [m] para cada sector de la plantilla de Hammer (Estación 11).....	81
Tabla 9.15. Elevaciones medias [m] para cada sector de la plantilla de Hammer (Estación 12).....	81
Tabla 9.16. Correcciones [mGal] para cada sector de la plantilla de Hammer (Estación Base).....	82
Tabla 9.17. Correcciones [mGal] para cada sector de la plantilla de Hammer (Estación 1).....	82
Tabla 9.18. Correcciones [mGal] para cada sector de la plantilla de Hammer (Estación 2).....	82
Tabla 9.19. Correcciones [mGal] para cada sector de la plantilla de Hammer (Estación 3).....	82
Tabla 9.20. Correcciones [mGal] para cada sector de la plantilla de Hammer (Estación 4).....	82
Tabla 9.21. Correcciones [mGal] para cada sector de la plantilla de Hammer (Estación 5).....	83
Tabla 9.22. Correcciones [mGal] para cada sector de la plantilla de Hammer (Estación 6).....	83
Tabla 9.23. Correcciones [mGal] para cada sector de la plantilla de Hammer (Estación 7).....	83
Tabla 9.24. Correcciones [mGal] para cada sector de la plantilla de Hammer (Estación 8).....	83
Tabla 9.25. Correcciones [mGal] para cada sector de la plantilla de Hammer (Estación 9).....	83
Tabla 9.26. Correcciones [mGal] para cada sector de la plantilla de Hammer (Estación 10).....	84
Tabla 9.27. Correcciones [mGal] para cada sector de la plantilla de Hammer (Estación 11).....	84
Tabla 9.28. Correcciones [mGal] para cada sector de la plantilla de Hammer (Estación 12).....	84

1 OBJETIVOS

Los objetivos que se pretenden abordar con el presente Trabajo Fin de Máster (en adelante, el presente/este Trabajo) pueden dividirse en principales y secundarios. A continuación se describe cada uno de ellos.

1.1 Objetivos principales

Comprenden los elementos esenciales a los que se quiere dar respuesta con este Trabajo. A saber:

- Evaluar, a nivel de estudio preliminar y en base a los resultados de una campaña de campo, la viabilidad de la prospección gravimétrica en la detección de fallas.
- Aplicar la metodología planteada a un caso real. Se ha escogido una ubicación sobre la Cobertera Mesozoico-Terciaria asturiana, donde se pretende (a) detectar la presencia de la Falla de Ventaniella y (b) comprobar, en su caso, que su trazado en el Mapa Geológico Nacional escala 1:50000 (con un marcado carácter interpretativo, y por tanto, aproximado) es correlacionable con los datos aportados por la gravimetría.

1.2 Objetivos secundarios

Dentro de los objetivos secundarios, se pueden distinguir dos niveles, según su grado de relevancia.

El primer nivel incluye dos determinaciones auxiliares, de interés práctico en una campaña de campo ejecutada en base a un gravímetro SCINTREX modelo CG-5, que suponen una contribución propia a la bibliografía existente:

- Estudio de la evolución con el tiempo de la deriva instrumental a largo plazo del gravímetro CG-5. Comparación de los resultados obtenidos con la consideración más habitual en gravimetría (tendencia de ascenso lineal con el tiempo).
- Determinación del tiempo de estabilización necesario tras transporte a la zona seleccionada para realizar mediciones.

En el segundo nivel entran todo el conjunto de tareas auxiliares que ha sido necesario llevar a cabo para culminar con éxito este Trabajo, a saber:

- Conocer los fundamentos teóricos de la prospección gravimétrica.
- Manejar y operar con el gravímetro relativo *CG-5 Autograv*, de la casa *SCINTREX*.
- Realizar cortes geológicos a partir de mapas reales.
- Diseñar y ejecutar una campaña de campo en base a un perfil.
- Tratar, corregir e interpretar los datos obtenidos en la campaña de campo.
- Aplicar software específico para la gestión y presentación de los datos obtenidos y corregidos de la campaña de campo: *Surfer*[®] en la elaboración de mapas topográficos y *MATLAB*[®] en la elaboración de gráficos y de distintos códigos empleados para la interpretación de los datos.

2 INTRODUCCIÓN Y ESTADO DE LA CUESTIÓN

La **prospección gravimétrica**, junto con otros tipos de prospecciones (sísmica, magnética, eléctrica, etc.), se presenta como un método geofísico no intrusivo muy interesante a la hora de obtener información del interior de la Tierra.

Permite cuantificar la variación espacial de la aceleración gravitatoria terrestre (g), ya que es sensible a la densidad de los materiales del subsuelo. Es decir, diferencias en la densidad de las rocas producen pequeños cambios en el valor de g que pueden detectarse mediante el uso de un equipo denominado gravímetro. En el apartado 3.1 se hace una descripción más detallada de estos conceptos.

Dentro de la geofísica, la gravimetría se adscribe a los denominados métodos pasivos o de campo natural, a diferencia de los métodos activos o de campo artificial, donde es el propio equipo de medición el que crea el campo, detectándose y midiéndose la distorsión o anomalía que crea la estructura a estudiar sobre éste (Richarte, Peláez, Sánchez Gómez y Gil, 2007).

Entre sus principales aplicaciones cabe destacar:

- Detección de cavidades (p. ej. antiguos refugios antiaéreos, túneles o galerías colapsadas, antiguas labores mineras, cuevas naturales, sumideros y otras cavidades de disolución).
- Detección de tanques y depósitos enterrados.
- Detección de discontinuidades entre materiales.
- Exploración de combustibles fósiles (petróleo, gas y carbón).
- Exploración de depósitos minerales no metálicos (areniscas y gravas).
- Exploración de acuíferos.
- Aplicaciones muy concretas de tipo arqueológico.

Otra de las aplicaciones de la prospección gravimétrica es la **detección de fallas**. En este sentido, se han realizado varios trabajos con distinto alcance en los objetivos.

Barbosa et al. (2005; 2007) presentan una metodología que permite detectar las fallas en profundidad asociadas al paleorrelieve sobre el que se dispone la cuenca

sedimentaria de Almada (Brasil). La imagen interpretativa de estas fallas profundas es compatible con datos previos de campañas sísmicas ejecutadas en la misma zona.

Saibi et al. (2006) tratan de localizar estructuras tectónicas profundas en la península de Shimabara (Japón) en base a técnicas de interpretación integradas de datos gravimétricos. De esta forma, identifican la posición supuesta de un sistema de fallas.

Nishihima y Naritomi (2015) aplican la prospección gravimétrica para detectar el paleorrelieve y las fallas de naturaleza más somera que determinan el flujo hidrogeológico en el campo geotérmico de Beppu (Japón). Se trata de un paso previo a su objetivo final, que es la ejecución de un modelo del sistema hidrotermal de dicho campo por medio de simulación numérica computacional.

Lien et al. (2014) desarrollan un método basado en datos hidrogeológicos y gravimétricos obtenidos empleando un gravímetro superconductor¹ que permite evaluar si una falla local es activa o no. Presentan como caso de estudio la Falla de Hsinchu (Taiwán).

La mayor parte de los estudios anteriormente citados, se refiere a una interpretación de los datos gravimétricos a escala regional, realizando modelos complejos y haciendo uso de las últimas técnicas de simulación computacional. Frente a estas investigaciones, este Trabajo pretende abordar el caso particular de una falla a escala local, realizando una interpretación de los datos en base a las técnicas de tratamiento y procesado tradicionales, con un enfoque más bien didáctico y metodológico.

La falla objetivo de las investigaciones es la **Falla de Ventaniella** (Figura 2.1 y Figura 2.2). Generada durante la Orogénesis Alpina, esta importante estructura con dirección NO-SE se extiende desde la plataforma continental cantábrica hasta la Cuenca del Duero, superando los 200 km de trazado cartográfico. Sin embargo, a pesar de su relevancia cartográfica, es de escasa importancia en cuanto a la generación de relieve en la Zona Cantábrica (Julivert, 1960).

¹ Gravímetro superconductor: consultar apartado 3.1.

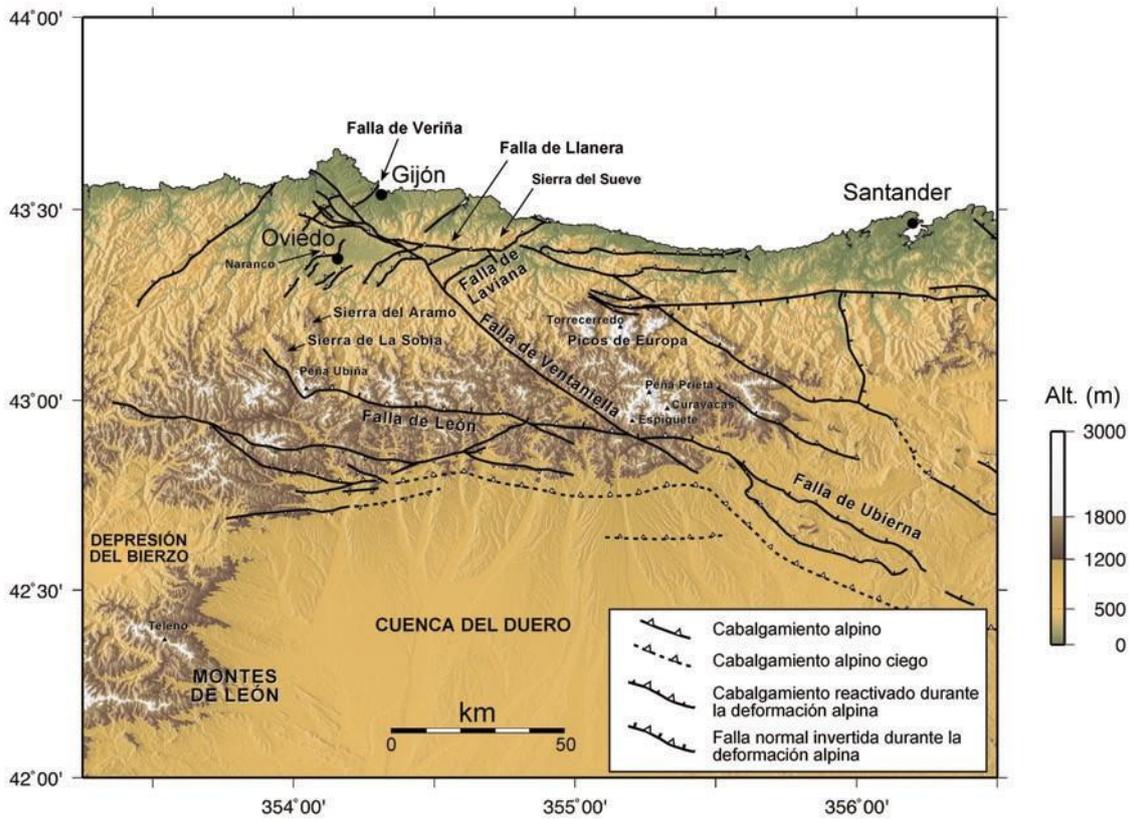


Figura 2.1. Modelo digital de elevaciones de la Cordillera Cantábrica y principales estructuras tectónicas responsables del relieve (Alonso, Pulgar y Pedreira, 2007)

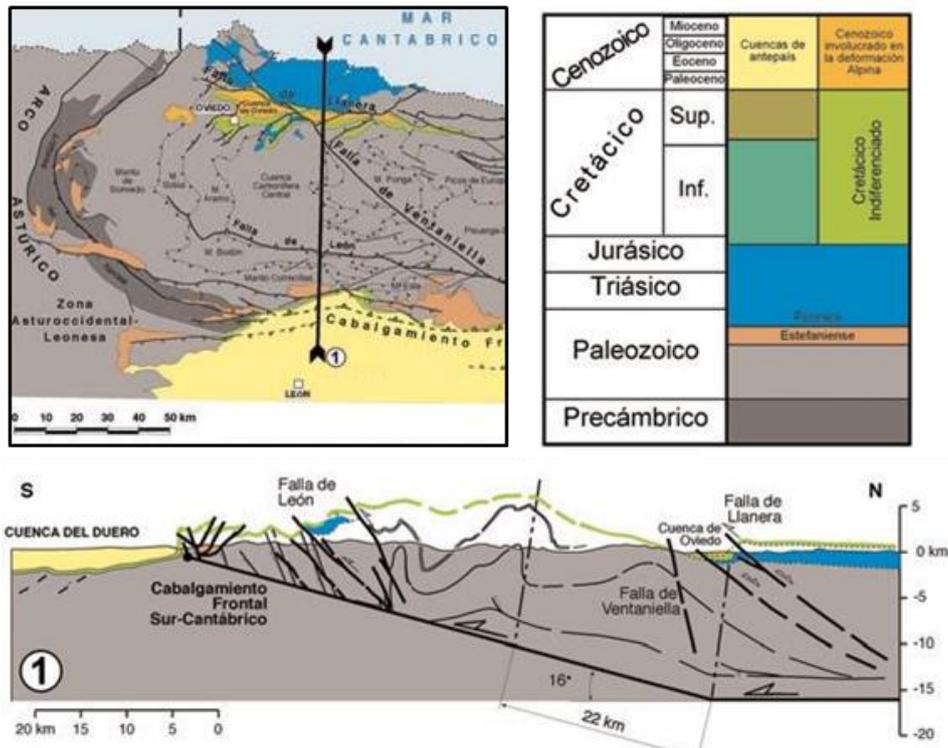


Figura 2.2. Mapa geológico simplificado de la región central de la Cordillera Cantábrica y corte geológico (1), donde se puede apreciar la falla de Ventaniella (adaptado de Alonso et al., 2007)

Presenta una ligera actividad sísmica, sobre todo concentrada en las áreas del cañón de Avilés (Asturias) y del embalse de Riaño (León) (López-Fernández et al., 2002; 2004; López-Fernández, 2007). A juzgar por la distribución espacial de dicha actividad, puede inferirse que la falla presenta un fuerte buzamiento al O, próximo a la vertical, y parece alcanzar una profundidad de hasta 18 km en algunos segmentos (López-Fernández et al., 2004).

Los desplazamientos aparentes de las diversas unidades estratigráficas en relación con esta falla, ya sean paleozoicas o mesozoicas, se explican mediante un desplazamiento inverso oblicuo, de carácter dextrógiro. Asimismo, la topografía algo más elevada de su labio nororiental puede relacionarse con una ligera elevación del bloque norte (Alonso et al., 2007).

El papel de la Falla de Ventaniella en el desarrollo de la cadena montañosa Cántabro-Pirenaica durante la Orogénesis Alpina no es, a día de hoy, completamente conocido. La ya referida actividad sísmica asociada a dicha estructura, junto con su supuesto papel como frontera de distintos dominios geodinámicos, proporciona buenos argumentos para estudiar esta falla con más detalle (Fernández-Viejo, Olona, López-Fernández y Llana-Fúnez, 2016).

El estudio de la Falla de Ventaniella desde diferentes puntos de vista (incluyendo el empleo de la geofísica, junto con la caracterización geológica de la zona de falla y un mejor cartografiado de su traza principal y estructuras asociadas) es uno de los objetivos con el que nace el Proyecto GEOCANTÁBRICA² (*Procesos geológicos modeladores del relieve de la Cordillera Cantábrica*), en el que distintos investigadores de la Universidad de Oviedo³ y varios colaboradores internacionales pretenden examinar la relación entre el desencadenamiento de inestabilidades de ladera y la evolución del relieve Cantábrico.

De todas las zonas donde se aprecia la falla, es de especial interés la región central asturiana situada entre las localidades de Pola de Siero y Nava, ya que los materiales geológicos presentan afloramientos escasos y por tanto el trazado en el Mapa Geológico Nacional (Beroiz et al., 1973) tiene un marcado carácter interpretativo. Se trata, además, de una de las regiones identificadas por Fernández-Viejo et al. (2016) para llevar a cabo

² Referencia FC-15-GRUPIN14-044, financiado por el Principado de Asturias (2015-2017)

³ En el Proyecto GEOCANTÁBRICA participan investigadores de la Unidad de Modelización Hidro-Geofísica y de Ensayos No Destructivos de la Universidad de Oviedo, donde se ha llevado a cabo el presente Trabajo Fin de Máster.

una caracterización geofísica superficial de la falla en el marco del Proyecto GEOCANTÁBRICA.

El estudio gravimétrico planteado se centra, por tanto, en esta área. Su importancia radica en que puede servir como base para evaluar la viabilidad de la gravimetría en la caracterización geofísica superficial de la Falla de Ventaniella. De este modo, se contaría con una alternativa adicional a los métodos resistivo y electromagnético en el dominio del tiempo, que son los que se pretende emplear en el Proyecto GEOCANTÁBRICA.

Por tanto, además de los referidos **enfoques metodológico** y **didáctico** que se pretende dar a los contenidos del presente Trabajo, los objetivos a cumplir también tienen un valor **práctico**, de ser viable la aplicación de la gravimetría para el propósito planteado.

Las características del estudio, así como la selección del emplazamiento, se analizan en detalle en el apartado 5 de este Trabajo.

3 FUNDAMENTO TEÓRICO

3.1 Medida de la aceleración gravitatoria: generalidades

La aceleración gravitatoria (g) ha jugado históricamente un papel central en el estudio de los procesos dinámicos en el interior terrestre y es también muy importante en la exploración geofísica. Las mediciones de alta precisión del campo gravitatorio terrestre son relativamente baratas y rápidas (Van Der Hilst, 2004). Sin embargo, su estudio no es sencillo, ya que son necesarias distintas correcciones para aislar la señal medida de diversos factores –temporales y no temporales– que la afectan y modifican. Dichos factores se tratan en detalle en los apartados 3.2 y 3.3.

Para contextualizar el concepto de aceleración gravitatoria, es preciso hacer referencia a la Ley de Gravitación Universal. Formulada por Newton en 1687, establece que la fuerza de atracción gravitatoria F_g entre dos masas puntuales m_1 y m_2 , separadas entre sí una distancia r , es directamente proporcional a sus masas e inversamente proporcional al cuadrado de la distancia que las separa. En forma escalar, la expresión correspondiente se recoge en la ecuación (3.1).

$$F_g = G \cdot \frac{m_1 \cdot m_2}{r^2} \quad (3.1)$$

La constante de proporcionalidad G recibe el nombre de Constante de Gravitación Universal, y fue determinada por primera vez por Cavendish en 1798. El valor actual, determinado en 1942, es de (Burger, 1992):

$$G = 6,6732 \cdot 10^{-11} \text{ N} \cdot \text{m}^2/\text{kg}^2$$

El valor de G es el mismo para dos pares de partículas cualesquiera. No debe confundirse con el parámetro que nos ocupa, la **aceleración gravitatoria** (g), que es la fuerza ejercida por unidad de masa debido al campo gravitatorio terrestre. En tal caso las partículas serían un objeto cualquiera de masa m situado sobre la superficie de la Tierra, de masa M y radio R . Su valor puede deducirse fácilmente a partir de la Segunda Ley de Newton:

$$F_g = m \cdot a = m \cdot g = G \cdot \frac{M \cdot m}{R^2}$$

Y por tanto:

$$g = \frac{F_g}{m} = G \cdot \frac{M}{R^2} \quad (3.2)$$

La ecuación (3.2) asume que la densidad varía únicamente con la distancia al centro de la Tierra (i.e. simetría esférica) y que R es muy grande comparado con el tamaño del objeto de masa m .

La unidad del Sistema Internacional para la aceleración gravitatoria es el m/s^2 . Su valor fue determinado por primera vez por Galileo, y su magnitud sobre la superficie de la Tierra varía en función de la latitud: de unos $9,83 m/s^2$ en el Ecuador a unos $9,78 m/s^2$ en los Polos.

En honor a Galileo, otra unidad frecuente usada en gravimetría es el *Gal*. La equivalencia es (3.3):

$$1 \text{ Gal} = 1 \text{ cm/s}^2 = 0,01 \text{ m/s}^2 \quad (3.3)$$

Las anomalías gravimétricas que busca esta técnica geofísica suelen expresarse generalmente en *miliGal* ($1 \text{ mGal} = 10^{-3} \text{ Gal}$) o *microGal* ($1 \mu\text{Gal} = 10^{-6} \text{ Gal}$). Con los modernos equipos de medición, conocidos como **gravímetros**, se pueden alcanzar precisiones del orden de los μGal ⁴. También es utilizada con frecuencia la *unidad gravimétrica* ($1 \text{ u. g.} = 0,1 \text{ mGal}$). En lo que sigue, las unidades empleadas para referirse a cualquier anomalía gravimétrica serán el *miliGal* o el *microGal*.

Los gravímetros diseñados para determinar directamente el valor de g realizan mediciones absolutas, por lo que reciben el nombre de **gravímetros absolutos**. Estos dispositivos son complejos, difíciles de transportar y requieren un tiempo considerable para instalarse y ser empleados. De manejabilidad y complejidad inferiores son los instrumentos que determinan la diferencia de g entre dos puntos de observación. Tales aparatos son los **gravímetros relativos**: lo que permiten obtener son diferencias relativas en la aceleración gravitatoria. Se trata de los equipos empleados en las campañas de exploración geofísica, como la que se plantea en el presente Trabajo.

⁴ El aparato empleado en el presente Trabajo, tiene una precisión de unos $5 \mu\text{Gal}$ (consultar apartado 4.1).

El principio constructivo en el que se basa un gravímetro de tipo relativo es bastante sencillo. Se trata de una masa suspendida de un resorte. Al mover este conjunto de una posición a otra, el resorte se alargará o acortará una pequeña cantidad debido a variaciones en la aceleración gravitatoria. Pequeños cambios de g de un emplazamiento a otro resultan únicamente en desplazamientos del resorte muy pequeños, del orden de $1\ \mu\text{m}$ por cada incremento de $1\ \text{mGal}$ (Burger, 1992).

El material de fabricación del resorte puede ser, bien un metal de bajo coeficiente de expansión térmica, o bien cuarzo fundido. Incluso puede ser un campo magnético superconductor que produzca una suspensión de bajo coeficiente de fricción (Niebauer, 2015). Los gravímetros relativos se distinguen también de los absolutos ya que indican indirectamente el valor de g mediante la medición de la longitud del resorte. La elongación de dicho resorte es proporcional a una constante de fuerza K –la constante elástica del muelle– que debe ser calibrada. Asimismo, también es proporcional a la masa suspendida.

Los principios constructivos de los gravímetros relativos han ido evolucionando a lo largo de los años. Aquellos basados en resortes estáticos fueron reemplazando –de 1930 en adelante– a los primitivos equipos basados en péndulos. Uno de los primeros en emplear esta tecnología fue el modelo diseñado por Lacost y Romberg (L&R), con una suspensión del resorte característica, formando un ángulo nominal de unos 45° con respecto a la masa de prueba, que se situaba en el extremo de una barra (Niebauer, 2015).

Sin embargo, en la actualidad los equipos más modernos se basan en resortes de cuarzo situados en la dirección vertical. El primero de estos equipos fue el desarrollado por Hugill (1990). Se trata del CG-3, de la casa SCINTREX Ltd. Seigel (1995) realizó una descripción más detallada de este gravímetro. A diferencia de la disposición del resorte a 45° con respecto a la barra sobre la que se suspendía la masa de prueba en el equipo L&R, el CG-3 emplea un resorte vertical de cuarzo fundido. En este caso se necesita una mayor precisión en la medida de la posición vertical (unas 10000 veces superior) que en la suspensión del L&R ya que el sistema no es estático (Niebauer, 2015). Los sensores empleados a tal efecto son, generalmente, condensadores de tres placas. Entre las placas exteriores se mantiene una tensión, mientras que la placa central se sitúa en la masa de prueba suspendida. Lo que se mide entonces es la diferencia de potencial entre cada placa externa y la placa central. Asimismo, se aplica una corriente continua que

ejerce una fuerza que permite mantener fija la posición de la masa cuando el valor de g cambia. El resorte de cuarzo hace levitar la masa, mientras el transductor capacitivo compensa cualquier cambio en la fuerza de atracción gravitatoria sobre la masa. El mismo condensador es usado tanto como sensor de posición como transductor de fuerza (Niebauer, 2015).

Existen varias ventajas de trabajar con equipos basados en resortes de cuarzo fundido con respecto a los de metal. El cuarzo fundido es un material muy duro, con una resistencia a la tensión por unidad de masa similar a la del metal que se emplea en los resortes de alta calidad. Sin embargo, presenta un coeficiente de expansión térmica muy pequeño, de aproximadamente un orden de magnitud inferior al de los muelles metálicos (Niebauer, 2015), lo que es una ventaja no desdeñable.

La tecnología actual para gravímetros de cuarzo fundido está representada por la evolución del CG-3 de la casa SCINTREX. Se trata del modelo CG-5, que presenta un diseño de cuarzo monolítico mucho más resistente a las taras que afectan a los gravímetros de resorte metálico de la misma precisión. Este equipo es el empleado en el presente Trabajo, por lo que su descripción y funcionamiento se aborda con detalle en el apartado 4.

3.2 Correcciones temporales

Cuando se estaciona un gravímetro en una ubicación determinada y se toman medidas separadas un intervalo de tiempo lo suficientemente grande (del orden de horas), los valores obtenidos varían. Dicha variación es debida a dos causas. Una es la deriva instrumental, que es causada por pequeños cambios en las constantes físicas de los componentes del gravímetro. La otra es debida a los efectos de las mareas, que están gobernadas por la posición de la Luna y el Sol con respecto a la de la Tierra (Burger, 1992).

Por ello, esta afección debe ser correctamente cuantificada y descontada de las mediciones realizadas, lo que exige aplicar lo que se conoce de manera genérica como “correcciones temporales”. En los apartados 3.2.1 y 3.2.2 se describen más detalladamente las características de dichas correcciones.

3.2.1 Corrección por marea

Las mareas terrestres son variaciones de fondo en la aceleración gravitatoria debidas a cambios en las posiciones relativas de la Tierra, la Luna y el Sol. Siguen ciclos de 12 y 24 horas superpuestos a un ciclo relacionado con el mes lunar (Figura 3.1). Las oscilaciones tienen una mayor amplitud en los momentos de luna nueva y luna llena, cuando la Tierra, la Luna y el Sol se encuentran alineados. En estos casos, se pueden dar cambios de más de 0,05 mGal/hora, y los cambios totales pueden superar los $\pm 0,15$ mGal sobre un valor medio (Burger, 1992; Milsom, 2003).

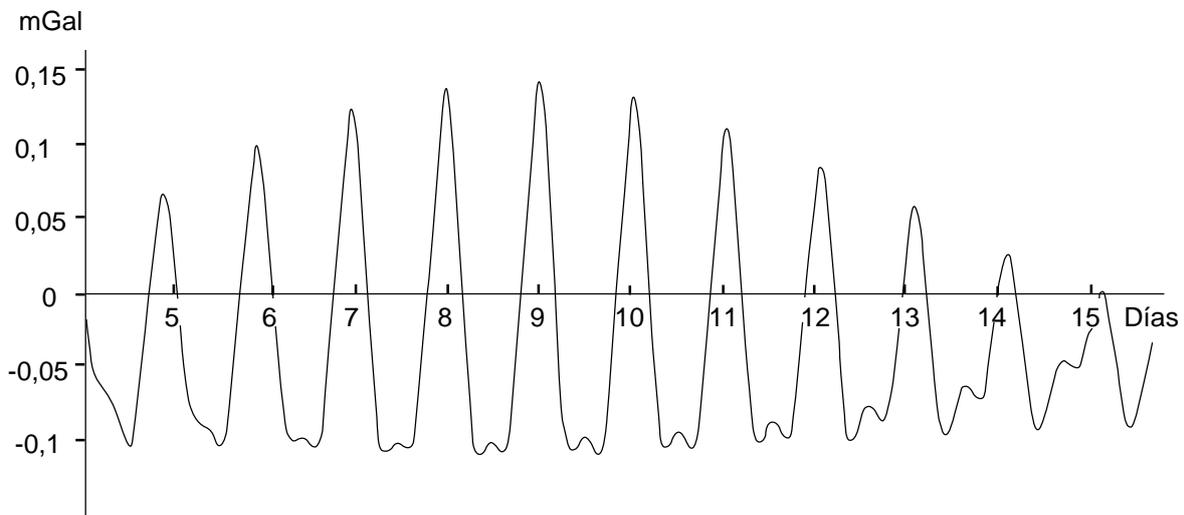


Figura 3.1. Variación debida a las mareas [mGal] del 5 al 15 de Enero de 1986 (tomado de Milsom, 2003)

Estas oscilaciones son predecibles, y las correcciones a aplicar a los valores de aceleración gravitatoria medidos en campo se pueden calcular de forma sencilla y precisa mediante distintos softwares de amplia difusión (Van Camp y Vauterin, 2005).

Sin embargo, en este Trabajo se ha empleado la corrección automática incorporada en el microprocesador interno del gravímetro CG-5. Se trata de un código que permite corregir en tiempo real la lectura de la aceleración gravitatoria. Está basado en la fórmula propuesta por Longman (1959), que permite predecir la marea terrestre para un modelo de Tierra rígida. Los datos de los que parte el equipo son las coordenadas del sitio de medición (latitud y longitud), y la fecha y hora, que registra gracias a su reloj interno⁵(1959)

⁵ La fórmula de Longman tiene como referencia horaria el estándar de tiempo UTC, por lo que deberá introducirse en el CG-5 la diferencia entre la hora local y la hora UTC.

El código interno aplica un factor gravimétrico de 1,16 a la fórmula de Longman para tener en cuenta la deformación elástica de la Tierra (16% de amplificación de la deformación de marea gravimétrica de Tierra rígida). En realidad, este factor es dependiente de la latitud, de modo que los errores presentan amplitudes de hasta ± 3 μGal (Scintrex Ltd., 2012). Además, esta fórmula no toma en cuenta el efecto de gravedad de las mareas oceánicas (atracción y efecto de carga) que actúan sobre la Tierra sólida subyacente y la deforman.

Por las limitaciones citadas en el párrafo anterior, se puede concluir que los modelos simples de marea como el de Longman no son aceptables en estudios de microgravimetría (Bonvalot, Diament y Gabalda, 1998; Miranda, Herrada y Pacino, 2013). Sin embargo, en este Trabajo se pretende identificar una falla a partir del efecto gravitatorio que provoca el contacto entre dos materiales geológicos de densidades distintas. Como este efecto se estima del orden de varios cientos de μGal , las amplitudes del entorno de los ± 3 μGal de error en los que se incurre al aplicar la corrección automática del gravímetro son despreciables. Por tanto, los datos brutos tomados en campo se corregirán por marea mediante el software interno incorporado al CG-5.

3.2.2 Corrección por deriva instrumental a largo y a corto plazo

Por **deriva instrumental a largo plazo** se entienden los cambios aparentes con el tiempo de las mediciones de aceleración gravitatoria, durante días o períodos superiores, que son debidos a fuentes instrumentales, más que a causas externas (Seigel, 1995).

Todos los gravímetros relativos basados en resortes balanceados (como es el caso que nos ocupa, para más información consultar el apartado 4.1) presentan deriva a largo plazo relacionada con la relajación de tensiones en el resorte y el envejecimiento de componentes críticos, mecánicos o electrónicos. La deriva a largo plazo de un gravímetro es específica de cada instrumento, e incluso varía entre distintos equipos de un mismo modelo.

Generalmente se considera que la deriva a largo plazo sigue una tendencia de ascenso lineal. Sin embargo, la constante de proporcionalidad –expresada con frecuencia en mGal/día – es mucho más grande en gravímetros nuevos que en equipos de cierta edad. Véase como ejemplo el modelo CG-3 de la casa SCINTREX (versión previa al gravímetro empleado en el presente Trabajo), en el que Liard, Gagnon, Hearty, Salib y Flint (1993) encontraron un descenso de la tasa de deriva durante el primer año

desde unos 0,9 mGal/día hasta 0,4 mGal/día, permaneciendo más o menos estable durante el segundo año del equipo.

Sin embargo, choques térmicos externos, vibración extrema en el transporte, choques mecánicos, cambios graduales en el voltaje de las baterías o desconexiones recientes del equipo pueden inducir derivas adicionales del orden de varias horas de duración (Seigel, 1995). Es decir, la compensación de la deriva instrumental a largo plazo no elimina completamente el efecto de la deriva instrumental total: existe una componente a corto plazo.

La **deriva instrumental a corto plazo**, que generalmente se asume también lineal, se determina por medio de una serie de medidas repetidas sobre una estación base al menos al inicio y al fin de cada día de campaña. La lectura al inicio del día establece la referencia para compensar todas las mediciones realizadas posteriormente, mientras que la diferencia entre la lectura al final y al principio del día determina la tasa de deriva residual para esa jornada. Esta deriva deberá ser linealmente distribuida a todas las medidas realizadas en ese día, de acuerdo con el instante de tiempo en que fueron tomadas (Seigel, 1995).

Para ello, una de las expresiones que se pueden emplear es la (3.4) (Colorado School of Mines y Imperial College London, 2013):

$$\Delta g_d = g_b + (t - t_b) \frac{g_e - g_b}{t_e - t_b} - g_1 \quad (3.4)$$

Donde:

Δg_d es la corrección por deriva instrumental a corto plazo

g_b es la lectura observada en la primera ocupación de la estación base en cada ciclo o “loop” realizado.

g_e es la lectura observada en la última ocupación de la estación base en cada ciclo o “loop” realizado.

g_1 es la primera lectura observada en la estación base al inicio de la jornada de campo.

$(t - t_b)$ es el tiempo transcurrido entre el instante considerado y la primera ocupación de la base en cada ciclo o “loop”.

$(t_e - t_b)$ es el tiempo transcurrido entre la primera y la última ocupación de la base en cada ciclo o “loop”.

Se debe prestar especial atención a estas lecturas realizadas en la estación base, para evitar cualquier error en su toma, que sería propagado al valor final de aceleración gravitatoria para todas las estaciones medidas ese día. Algunas de las recomendaciones son, entre otras (Seigel, 1995):

- Tomar varias medidas repetidas en la estación base para asegurarse que se ha disipado cualquier efecto de relajación elástica del resorte interno del gravímetro.
- Si en el curso de la campaña el instrumento ha sido manipulado de forma poco cuidadosa (sufriendo golpes o vibraciones), repetir la última medida tomada antes de se produjeran estos sucesos, para asegurarse (o corregir) cualquier tara que pudiese ser erróneamente interpretada como una deriva extraordinaria, evitando distribuir el error al resto de lecturas. En este punto, también es recomendable volver a tomar una medida en la estación base antes de retomar la campaña. De esta manera, si resultase oportuno, se podría asignar dos tasas distintas de deriva a corto plazo para ese día de campaña, una antes del suceso y otra después.

3.3 Correcciones no temporales

La magnitud de g se ve influenciada por varios factores que no dependen del tiempo: latitud, elevación, topografía del terreno circundante y variaciones de densidad en el subsuelo. La exploración gravimétrica estudia las anomalías debidas a este último factor. Éstas son generalmente mucho más pequeñas que los cambios debidos a latitud y elevación, aunque más grandes –en la mayoría de las ocasiones– que las anomalías debidas a los efectos topográficos (Telford, Geldart y Sheriff, 1990).

Por tanto, como para el caso de las mareas y la deriva instrumental, es necesario aplicar una serie de correcciones a las medidas de g tomadas, de manera que se elimine la influencia de los factores anteriormente referenciados. En los apartados 3.3.1, 3.3.2,

3.3.3 y 3.3.4 se describen los principios generales de dichas correcciones, que serán posteriormente aplicadas a las medidas tomadas en campo (apartado 6).

3.3.1 Corrección por aire libre

De acuerdo con la expresión (3.2), la aceleración gravitatoria es inversamente proporcional al cuadrado de la distancia. Por ello, es necesario corregir las medidas tomadas en estaciones a distinta cota para reducir estas lecturas de campo a una misma superficie de referencia o *datum* (Telford et al., 1990). En gravimetría se emplea el *elipsoide de referencia*. Se trata de un elipsoide que aproxima la superficie media del nivel del mar (geoides), eliminando el terreno existente por encima.

Como la corrección que tiene en cuenta este efecto no considera el material existente entre la estación donde se toma la medida y el elipsoide de referencia, recibe el nombre de *corrección por aire libre*. Se obtiene calculando el gradiente vertical de g , es decir, la primera derivada de la ecuación (3.2):

$$\frac{dg}{dR} = -2 \cdot \frac{G \cdot M}{R^3} = -g \cdot \frac{2}{R} \quad (3.5)$$

Donde el signo menos se introduce para hacer referencia al descenso de la aceleración gravitatoria con la distancia al centro de la Tierra. Para una latitud de 45°, sustituyendo por valores precisos para g y R , se tiene un gradiente de (Burger, 1992):

$$\frac{\Delta g}{\Delta R} \equiv \frac{\Delta g}{\Delta h} = -0,3086 \text{ mGal/m}$$

Por lo que la corrección por aire libre ($\Delta g_{\text{aire libre}}$) será (3.6):

$$\Delta g_{\text{aire libre}} [\text{mGal}] = 0,3086 \cdot \Delta h \quad (3.6)$$

Donde Δh representa la cota del punto (m) respecto a la superficie de referencia (el elipsoide). Esta corrección se suma a la lectura de campo cuando la estación se sitúa por encima de este plano de referencia y se resta en el caso contrario.

La precisión con la que debe determinarse Δh en cada campaña depende de la anomalía gravimétrica que se quiera detectar. Por ejemplo, para aplicaciones de microgravimetría –en las que se necesitan precisiones del orden de varios μGal – es esencial una exactitud en cota inferior a los 3 cm (Telford et al., 1990). Para el caso de

estudio descrito en este Trabajo, la anomalía buscada es del orden de varios cientos de μGal , lo que supone, al menos, 2 órdenes de magnitud más. Por ello, se ha estimado suficiente la aproximación en cota obtenida al situar cada estación sobre un mapa topográfico de escala lo más grande posible de entre las opciones disponibles en abierto (ver Figura 6.2, página 61).

Por otra parte, es necesario tener presente que la expresión (3.6) asume una Tierra esférica y no tiene en cuenta efectos como su rotación. Sin embargo, supone una aproximación con la suficiente precisión para los objetivos de este Trabajo.

En el apartado 6.2.2 se recogen las correcciones por aire libre aplicadas a las medidas tomadas en campo.

3.3.2 Corrección por latitud

La latitud del punto donde se realiza la medición de g es también un factor clave que afecta al valor de las lecturas tomadas con un gravímetro. Esencialmente, los efectos se pueden resumir en los siguientes puntos (Burger, 1992):

- Efecto de la rotación terrestre: la rotación de la Tierra produce una fuerza centrífuga que actúa en sentido contrario a la aceleración gravitatoria y, por tanto, disminuye el valor medido de g . El efecto de esta fuerza centrífuga es más grande en el ecuador y disminuye hasta cero en los polos. Como consecuencia directa de esta fuerza, g es unos 3,4 Gal superior en los polos que en el ecuador.
- Factor distancia al centro de la Tierra: las fuerzas centrífugas rotacionales son también responsables de su forma característica achatada en los polos (geoide). Como ya se ha indicado anteriormente, en gravimetría esta superficie se aproxima por un elipsoide de revolución conocido como *elipsoide de referencia*. De acuerdo con lo anterior, como el radio terrestre es superior en el ecuador que en los polos, las medidas tomadas más cerca de los polos verán aumentado el valor de g al estar más próximas al centro de masas (el centro terrestre). Del ecuador a los polos, se estima un incremento de unos 6,6 Gal.
- Factor de masa: como el radio terrestre es superior en el ecuador que en los polos, existe más masa situada entre la superficie y el centro terrestre,

por lo que el efecto del factor distancia es contrarrestado parcialmente haciendo disminuir la aceleración medida. Este factor de masa causa un descenso de unos 4,8 Gal del ecuador a los polos.

Por tanto, considerando los tres puntos anteriormente citados, el efecto de la latitud sobre las mediciones de la aceleración gravitatoria es tal que produce un incremento neto en los valores medidos de unos 5,2 Gal desde el ecuador hasta los polos.

Una de las expresiones que permiten cuantificar este incremento para cualquier latitud considerada es la propuesta por Tsuboi (1979):

$$g_n \left[\frac{cm}{s^2} \right] = g_e \cdot (1 + A \cdot \sin^2 \phi - B \cdot \sin^4 2\phi) \quad (3.7)$$

Donde:

g_n es la aceleración gravitatoria normal o estándar.

g_e es la aceleración gravitatoria en el ecuador y a nivel del mar.

ϕ es la latitud del punto de medición.

A y B son constantes que tienen en cuenta la velocidad angular de rotación terrestre, su tamaño y su elipticidad.

La ecuación (3.7) permite corregir cualquier lectura en función de la posición donde se tomó sobre el elipsoide de referencia.

Los valores actuales para g_e , A y B fueron adoptados por la Asociación Internacional de Geodesia en 1967. Si se sustituyen estos valores en (3.7), se obtiene la fórmula para el sistema geodético de referencia de 1967 (GRS67, *Geodetic Reference System Formula of 1967*):

$$g_n \left[\frac{cm}{s^2} \right] = 978,03185 \cdot (1 + 0,005278895 \cdot \sin^2 \phi - 0,000023462 \cdot \sin^4 2\phi) \quad (3.8)$$

La expresión (3.8) permite cuantificar en cada una de las estaciones del perfil el efecto introducido por su diferente latitud. El razonamiento a seguir es simple: se calcula

g_n para cada una de las estaciones, se toma una de ellas como referencia⁶ y se calculan los remanentes para el resto de puntos. Estos remanentes serán las correcciones por latitud a realizar.

En el apartado 6.2.3 se recogen las correcciones por latitud aplicadas a las medidas tomadas en campo.

3.3.3 Corrección de Bouguer

La *corrección de Bouguer* ($\Delta g_{Bouguer}$) tiene en cuenta la atracción ejercida por el material existente entre la estación y el elipsoide de referencia –que fue ignorada en el cálculo de la corrección por aire libre. Si la estación estuviese situada en una placa horizontal plana de extensión infinita y espesor y densidad constante, la lectura de g se vería incrementada por la atracción ejercida por esta placa entre la estación y el datum.

La expresión a emplear se puede deducir a partir de (3.2), tal y como se puede consultar en Burger (1992):

$$\Delta g_{Bouguer} = 2\pi G(\rho z) \approx 0,04193\rho z \text{ [mGal]} \quad (3.9)$$

Donde:

ρ es la densidad del material [g/cm³]

z es la altura de la estación [m] sobre el plano de referencia, es decir, el espesor de la placa plana.

La corrección de Bouguer se aplica en el sentido contrario que la de aire libre. Es decir, se resta cuando la estación está por encima del datum y viceversa (Telford et al., 1990). Para la campaña de campo planteada, como todas las estaciones se sitúan por encima del nivel del mar, la corrección de Bouguer siempre se restará al valor medido por el gravímetro.

Es importante en este punto recordar que en la deducción de la expresión (3.9) se han hecho dos asunciones: (a) La placa es de densidad uniforme y (b) su extensión horizontal es infinita. Como ninguna de ellas es válida:

⁶ Para seguir una coherencia en las correcciones realizadas, siempre se toma como referencia la estación base.

- Para el caso (a) se debe tener conocimiento del tipo de rocas locales y sus densidades. En el perfil planteado en el presente Trabajo, se asigna una densidad media en función de la litología presente a un lado y a otro de la falla (consultar apartado 5.1).
- Para el caso (b) debe considerarse una nueva corrección: la corrección por terreno (consultar apartado 3.3.4).

En el apartado 6.2.4 se recogen las correcciones de Bouguer aplicadas a las medidas tomadas en campo.

3.3.4 Corrección por terreno

La corrección de Bouguer, al asumir una placa horizontal plana, es demasiado aproximada. Por ello, la *corrección por terreno* permite cuantificar la influencia de las irregularidades superficiales (topografía) en la vecindad de cada estación. Colinas o montañas por encima de la cota de la estación “tiran” hacia arriba de la masa de prueba del gravímetro, mientras que los valles –falta de material– “dejan de tirar” hacia abajo de la masa de prueba. Por tanto, los dos tipos de ondulaciones topográficas afectan a las medidas de g en el mismo sentido, y la corrección por terreno se suma a la lectura de cada estación⁷.

Existen varios métodos para calcular correcciones por terreno. Todos ellos requieren del conocimiento detallado del relieve en las proximidades de cada estación, así como de un buen mapa topográfico –con curvas de nivel como mínimo cada 10 m– que se extienda una distancia considerable más allá del perfil planteado (Telford et al., 1990).

Nowell (1999) hace una recopilación tanto de los métodos clásicos como de los más modernos modelos computacionales, comparando las ventajas y limitaciones de cada uno de ellos.

El método tradicional más frecuente –empleado en el presente Trabajo– es el propuesto por Hammer (1939). Consiste, esencialmente, en dividir el área que rodea a

⁷ En una colina: la componente vertical de la atracción ejercida por la colina reduce el valor observado en el punto de medición, por lo que la corrección a aplicar deberá sumarse.

En un valle: la ausencia de material implica que se ha “sobrecorregido” al aplicar Bouguer. Se ha supuesto una masa que en realidad no existe, por lo que se debe sumar el equivalente a la sustracción hecha al aplicar Bouguer.

cada estación en compartimentos, y comparar la elevación media en cada compartimento con respecto a la elevación de la estación en cuestión. Esto se realiza mediante una plantilla que se sitúa sobre el mapa topográfico, formada por circunferencias concéntricas y líneas radiales. Estas circunferencias y radios determinan sectores cuyas áreas se incrementan con la distancia a la estación.

El objetivo es determinar la influencia que ejerce cada sector sobre la medida realizada en cada punto del perfil. Para su cálculo, Hammer propuso emplear como aproximación el efecto gravitatorio de un cilindro hueco/ anillo (g_{anillo}) sobre un punto situado en su centro y a nivel de su base (superior o inferior). La expresión se recoge en (3.10):

$$g_{anillo} = 2\pi G\rho \left(R_o - R_i + (R_i^2 + z^2)^{1/2} - (R_o^2 + z^2)^{1/2} \right) \quad (3.10)$$

Donde:

G es la constante de Gravitación Universal.

ρ es la densidad media de las rocas de la zona. Como aproximación se suele tomar el valor de densidad media de la corteza terrestre ($\rho = 2,67 \text{ g/cm}^3$)

R_o es el radio externo del anillo.

R_i es el radio interno del anillo.

z es el espesor del anillo (o altura media con respecto a su centro).

Para mayor claridad, en la Figura 3.2 se muestran los parámetros anteriormente referidos.

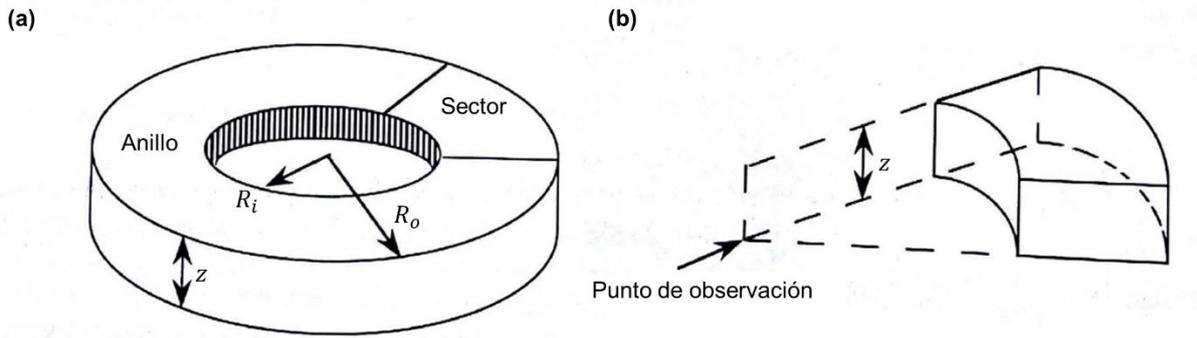


Figura 3.2. Corrección por terreno basada en la hipótesis de Hammer. (a) Un anillo cilíndrico de radio interno R_i , radio externo R_o y espesor z . Cada sección del anillo es denominada *sector*. (b) Un sector representando un elemento topográfico sobre el nivel del punto de medida de g (tomado de Burger, 1992).

Dividiendo cada anillo en un número n de anillos iguales, la atracción de cada sector se convierte en (3.11):

$$g_{sector} = \frac{g_{anillo}}{n} \quad (3.11)$$

Como el objetivo buscado es el efecto que ejerce una porción de terreno por encima o por debajo del nivel del punto de observación, cada segmento de terreno se trata como un sector del anillo, donde z se convierte en la diferencia de cota entre el nivel del punto donde se realiza la medida y la parte superior (o inferior) del sector correspondiente del anillo.

Hammer calculó los radios de anillos y tamaños de sector que proporcionaban los resultados más precisos a medida que se aumentaba la distancia al punto de medida en cuestión. La plantilla que propuso tras estos cálculos incorporaba 12 anillos concéntricos, a los que denominó *zonas* y denotó con una letra mayúscula⁸ (de B a M). Para hacer referencia a cada sector, añadió un número arábigo a la letra que define cada zona. El número de sectores que componen cada zona varía de unas a otras.

Para los propósitos de este Trabajo, se ha considerado únicamente hasta la zona F, ya que: (a) la anomalía objetivo – una falla– no precisa de una precisión microgravimétrica para su detección; y (b) son los sectores más próximos a cada estación los que afectan en un mayor grado a las mediciones tomadas por el gravímetro.

⁸ La zona A se corresponde con el terreno comprendido desde el punto de estacionamiento hasta un radio externo de 2 m. En este Trabajo se ha considerado que la cota media de la zona A es igual a la cota de estacionamiento de cada punto del perfil, por lo que la corrección a aplicar será nula.

En la Tabla 3.1 y la Figura 3.2 se recogen las características de cada zona considerada.

Tabla 3.1. Propiedades de cada uno de los sectores de la plantilla de Hammer considerados en este Trabajo.

Zona	Radio interno, R_i [m]	Radio externo, R_o [m]	Nº sectores, n
B	2	16,64	4
C	16,64	53,34	6
D	53,34	170,08	6
E	170,08	390,14	8
F	390,14	894,89	8

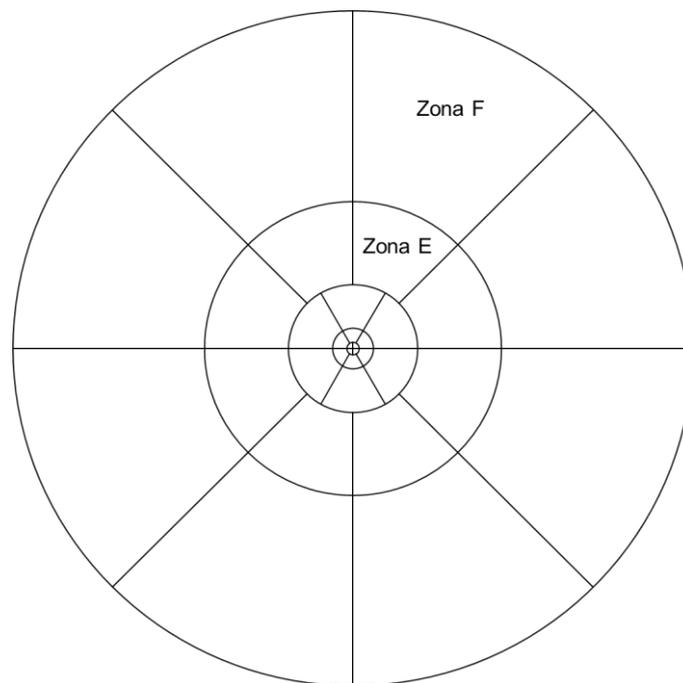


Figura 3.3. Plantilla de Hammer con las zonas B a F.

La forma en la que se aplicaron las ecuaciones (3.10) y (3.11) para cada sector considerado, así como las correcciones obtenidas para las estaciones del perfil planteado en el apartado 5, se recogen en el apartado 6.2.5.

El método propuesto por Hammer es, como se ha indicado, una primera aproximación, válida para los propósitos de este Trabajo. Sin embargo, para campañas de microgravimetría, se requiere de modelos que solventen los dos principales problemas que presenta Hammer: el elevado tiempo empleado en los cálculos y una precisión que depende del buen hacer del geofísico estimando cotas medias de cada sector superponiendo una plantilla sobre un mapa topográfico.

Es por este motivo que la idea de automatizar por ordenador todos estos cálculos haya sido perseguida casi desde la publicación del método de Hammer en 1939. Los mayores avances se han producido entre la década de 1990 y la actualidad, sobre todo gracias al aumento de la memoria de los ordenadores y al desarrollo de los modelos digitales del terreno (MDT). Una de las propuestas más actuales y ambiciosas, además de accesible al público, es el código GTeC (*Gravity Terrain Correction*). Implementado en MATLAB® y tomando MDT como base, su eficacia ha sido probada tanto en una campaña gravimétrica a escala regional, como en una de microgravimetría a escala local (Cella, 2015).

4 EQUIPO EMPLEADO: DESCRIPCIÓN Y CARACTERIZACIÓN

4.1 Características y funcionalidades

El gravímetro empleado en este Trabajo es el modelo Scintrex CG-5 Autograv (Figura 4.1). Se trata de un gravímetro relativo del tipo lineal, con una resolución de 1 μGal , una precisión de menos de 5 μGal y un rango operacional de más de 8000 mGal (Scintrex Ltd., 2012).



Figura 4.1. Gravímetro Scintrex CG-5 Autograv S/N 081240489. Es el equipo empleado en este Trabajo. La fotografía se corresponde con su base en el laboratorio de la Unidad de Modelización Hidro-Geofísica y de ensayos No Destructivos de la Universidad de Oviedo (Mieres, España).

El elemento sensor se basa en un sistema elástico de cuarzo fundido en el que la fuerza gravitacional sobre la masa de prueba es balanceada por un resorte y una pequeña fuerza electrostática restauradora.

Su diseño incluye una serie de microprocesadores que posibilitan la automatización de las mediciones y su procesamiento en tiempo real.

Mide a una frecuencia de 6 Hz durante un período de tiempo definido por el usuario (ciclo), que como mínimo es de 1 segundo. Transcurrido el ciclo, el equipo graba en su memoria interna (12 Mb) el promedio correspondiente a las mediciones tomadas a la referida frecuencia de 6 Hz, junto con su desviación típica. Además, cuenta con un sistema de eliminación de lecturas desviadas: cualquier medida que supere 4 veces la desviación típica calculada (o 6 veces si está activado el filtro sísmico) queda eliminada a la hora de calcular el promedio para el ciclo de medida seleccionado.

Asimismo, permite aplicar correcciones automáticas por: marea (consultar apartado 3.2.1), deriva instrumental a largo plazo (ver 3.2.2 y 4.2), inclinación del equipo, terreno circundante y temperatura.

Su rango operativo en exteriores es amplio (desde -40°C a +45°C).

En cuanto a sus características físicas, presenta unas dimensiones de 30 x 22 x 21 cm, y un peso de unos 8 kg; dato este último nada desdeñable a la hora de ejecutar las campañas de campo, donde se va a estar trasladando el equipo manualmente de una estación a otra durante varias horas.

Cuenta con dos baterías de ion de litio recargables de 6,6 Ah (11,1 V). De acuerdo con Scintrex Ltd. (2012), se garantiza una autonomía de 1 día completo cuando se usan en conjunto desde su estado de carga al 100% (en condiciones normales de campaña). Sin embargo, como se pudo comprobar en la campaña de campo ejecutada, para el modelo empleado los valores efectivos se reducen a unas 7-8 horas. La causa más probable de este hecho es el desgaste de las baterías debido a su edad.

La interacción del usuario con el equipo se realiza a través de una consola (Figura 4.2), en la que mediante un teclado alfanumérico se accede a los distintos menús disponibles: “Survey” (identificación de la campaña), “Autograv” (correcciones y filtros implementados en el software interno del gravímetro), “Options” (opciones de medida), “Clock” (reloj), “Dump” (descarga de datos), “Memory” (memoria interna disponible), “Measure” (medición).

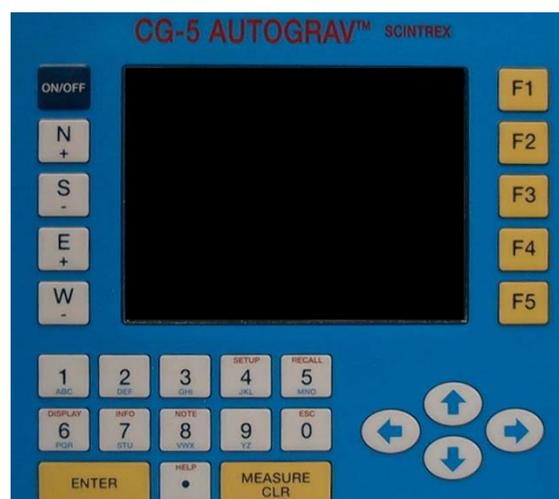


Figura 4.2. Consola del gravímetro SCINTREX CG-5. Obsérvense las teclas numéricas y alfanuméricas, así como las teclas de función y de dirección que permiten acceder a las distintas funcionalidades implementadas.

Para la descarga de los datos gravimétricos registrados en la memoria interna del CG-5 a un ordenador, el equipo cuenta con puertos de conexión RS-232C y USB; así como con un asistente de descarga: el software SCTUTIL.

4.2 Caracterización de la deriva instrumental a largo plazo

Como se ha indicado en el apartado 3.2.2 del presente Trabajo, uno de los efectos sobre las lecturas tomadas por un gravímetro relativo como el CG-5 es el conocido como deriva instrumental. Se trata de un efecto inevitable debido al estiramiento del resorte interno bajo tensión y su imperfecta recuperación, y supone algunas décimas de miligal por día (Scintrex Ltd., 2012).

La componente a corto plazo se determina en cada campaña de campo en particular y depende esencialmente de factores relacionados con las condiciones de manipulación del equipo.

La componente a largo plazo se considera generalmente lineal, y es en esta asunción en la que se basa la corrección automática por deriva que lleva incorporada el software interno del CG-5.

Sin embargo, la evolución de la deriva es una característica propia de cada equipo, y en muchos casos su magnitud es variable en el tiempo. Cuando se llevan a cabo tomas de medidas durante períodos de tiempo suficientemente largos, la no linealidad de la deriva es fácilmente detectable (Merlet et al., 2008), siendo necesario emplear al menos un polinomio de segundo grado para el ajuste.

La caracterización de la deriva de un equipo gravimétrico es una tarea que se realiza con frecuencia (Bonvalot et al., 1998; Liard et al., 1993; Merlet et al., 2008; Miranda et al., 2013). Generalmente se ejecuta junto con una serie de determinaciones relativas a otros parámetros (sensibilidad, por ejemplo) con el objeto de conocer el funcionamiento del equipo ante distintas situaciones y aprovechar al máximo sus capacidades.

Es por ello que se ha creído conveniente dedicar un apartado en el presente Trabajo en el que se caracterice la naturaleza de la deriva instrumental a largo plazo del gravímetro empleado (SCINTREX CG-5, S/N 081240489).

Para ello, se han recopilado el histórico de mediciones gravimétricas tomadas por el CG-5 en la base del laboratorio. Se trata de un conjunto de archivos de texto sin

formato, que han sido convenientemente tratados y homogeneizados. En la Tabla 4.1 se recoge una breve descripción de las características de las mediciones recopiladas.

Tabla 4.1. Descripción de las características de los datos tratados y homogeneizados del histórico de mediciones gravimétricas en el laboratorio (febrero 2014 a mayo 2016).

Característica	Descripción
Inicio mediciones	06/02/2014 18:32:02
Fin mediciones	04/05/2016 10:14:56
Lagunas de mediciones	Entre 15/07/2014 y 12/11/2014 Entre 17/01/2015 y 17/04/2015
Número de mediciones	579082
Correcciones aplicadas	Filtro sísmico, inclinación, auto-eliminación. Se desaplicaron (en los casos en que estaban activadas) las correcciones automáticas por deriva lineal y por marea.

Se trata de un conjunto de mediciones que abarcan un período temporal superior a los 2 años, por lo que teniendo en cuenta lo apuntado por Merlet et al. (2008), debe ser suficiente para observar cambios en la linealidad de la tendencia de la deriva. En efecto, un rápido vistazo a la Figura 4.3 permite apreciar fluctuaciones: en ciertos tramos, la tendencia es cuasi-lineal; mientras que en otros se observa una leve atenuación (véase el período entre agosto de 2015 y mayo de 2016).

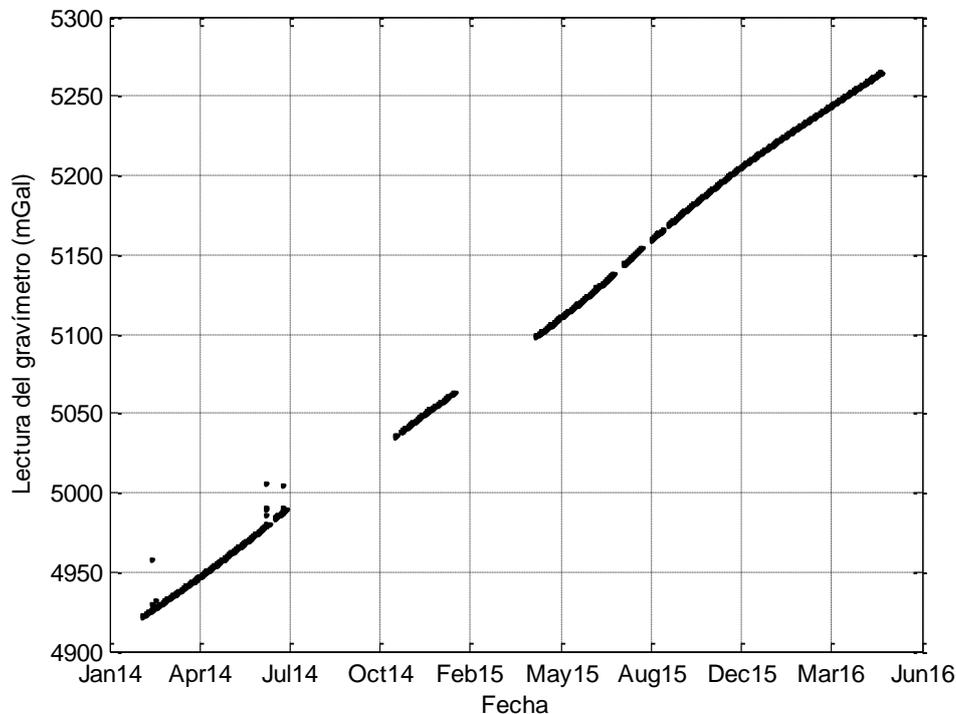


Figura 4.3. Histórico de lecturas del gravímetro CG-5 en la base del laboratorio (febrero 2014 a mayo 2016). Se trata de datos en bruto, sin aplicar las correcciones temporales.

Así, se ha decidido realizar un ajuste lineal de los datos disponibles (Figura 4.4); para compararlo a continuación con un ajuste a un polinomio de 2º grado (Figura 4.5). El software empleado a tal efecto ha sido MATLAB®.

Las características y parámetros relativos al ajuste (tipo de función, algoritmo empleado, intervalos de confianza, bondad del ajuste, etc.) se recogen en la Tabla 4.2 y en la Tabla 4.3.

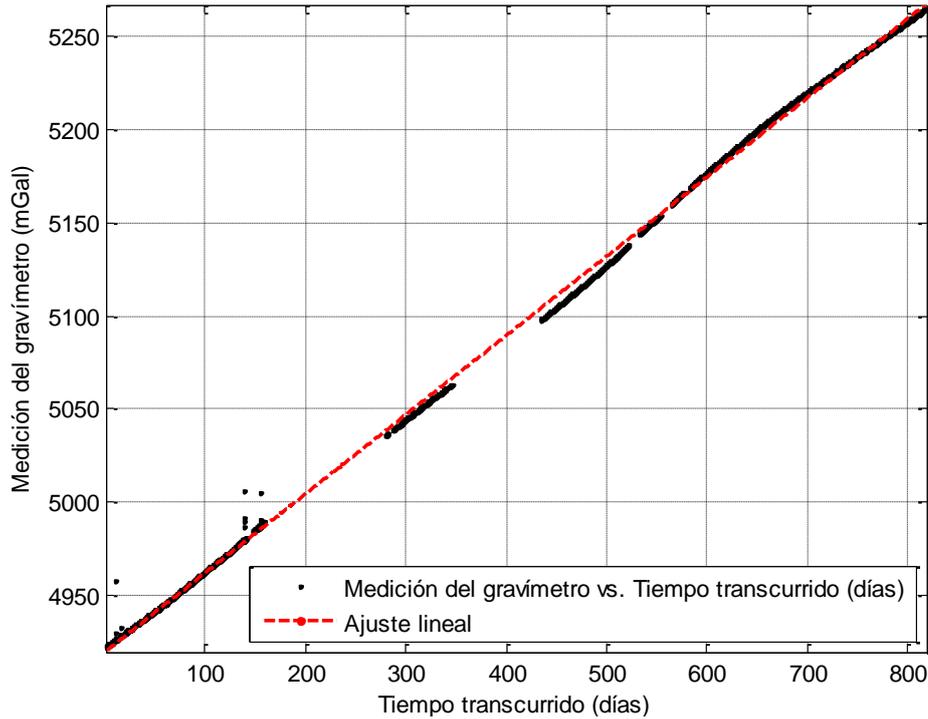


Figura 4.4. Ajuste lineal para el histórico de lecturas del gravímetro CG-5 en la base del laboratorio (febrero 2014 a mayo 2016).

Tabla 4.2. Parámetros del ajuste lineal al histórico de mediciones en el laboratorio (febrero 2014 a mayo 2016).

Parámetro	Descripción
Tipo de función	$g(t) = p_1 \cdot t + p_2$
Valores de los coeficientes (con un margen de confianza del 95 %)	$p_1 = 0,425 \text{ mGal/día } (0,4249; 0,425)$ $p_2 = 4919 \text{ mGal } (4919; 4919)$
Coefficiente de determinación (R²)	0,9994
Método empleado	Ajuste por mínimos cuadrados
Algoritmo empleado	Factorización QR

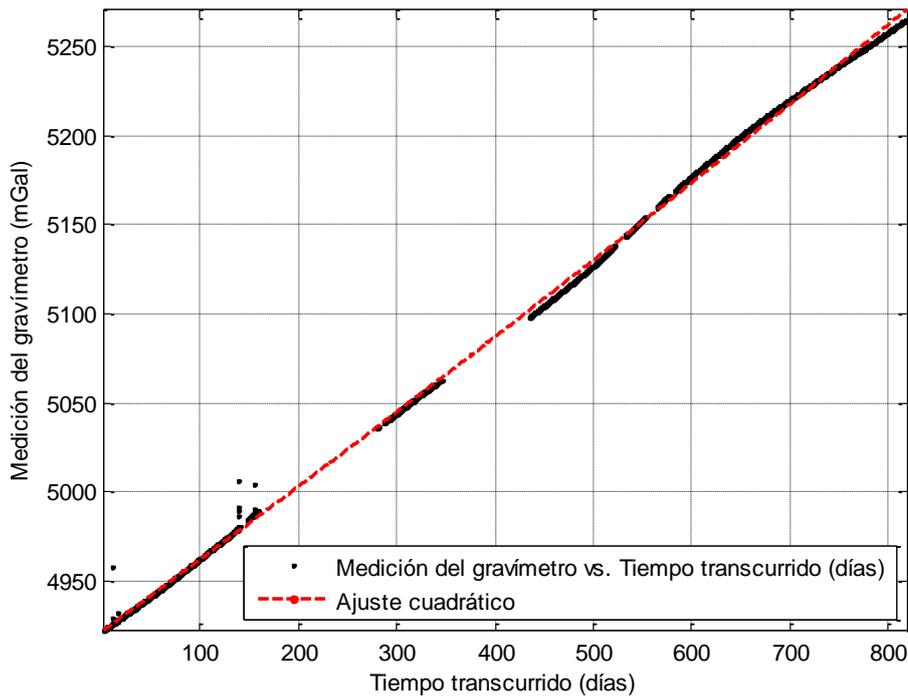


Figura 4.5. Ajuste cuadrático para el histórico de lecturas del gravímetro CG-5 en la base del laboratorio (febrero 2014 a mayo 2016).

Tabla 4.3. Parámetros del ajuste cuadrático al histórico de mediciones en el laboratorio (febrero 2014 a mayo 2016).

Parámetro	Descripción
Tipo de función	$g(t) = p_1 \cdot t^2 + p_2 \cdot t + p_3$
Valores de los coeficientes (con un margen de confianza del 95 %)	$p_1 = 2,989 \cdot 10^{-5} \text{ mGal/día}^2$ ($2,978 \cdot 10^{-5}; 3 \cdot 10^{-5}$) $p_2 = 0,4014 \text{ mGal/día}$ (0,4013; 0,4015) $p_3 = 4922 \text{ mGal}$ (4922; 4922)
Coefficiente de determinación (R^2)	0,9996
Método empleado	Ajuste por mínimos cuadrados
Algoritmo empleado	Factorización QR

En relación con el ajuste de lineal, se aprecia una tasa de deriva ($p_1 = 0,425 \text{ mGal/día}$) en consonancia con la calculada automáticamente por el gravímetro ($p_1 = 0,449 \text{ mGal/día}$) y con la establecida por la bibliografía precedente. Liard et al. (1993) apuntaron hacia un valor aproximado de $0,4 \text{ mGal/día}$ para el CG-3M, equipo de similares características que el CG-5 y fabricado por la misma casa. Bonvalot et al. (1998) y Miranda et al. (2013) realizaron un tratamiento de datos similar al que se ha llevado a cabo en el presente Trabajo –para un equipo CG-3M y para un CG-5, respectivamente– salvo que para obtener una mayor precisión en el ajuste eliminaron la influencia de las mareas. Los resultados que obtuvieron se transcriben en la Tabla 4.4 y la Tabla 4.5.

Tabla 4.4. Tasa lineal de deriva obtenida por Bonvalot et al. (1998) para distintos equipos SCINTREX CG-3M

Número de Serie	9002136	9110193	9408267
Tasa lineal de deriva	$p_1 = 0,243$ mGal/día	$p_1 = 0,521$ mGal/día	$p_1 = 0,349$ mGal/día
Coefficiente de determinación (R^2)	0,9999923	0,9999995	0,9999992

Tabla 4.5. Tasa lineal de deriva obtenida por Miranda et al. (2013) para un equipo SCINTREX CG-5

Número de Serie	40484
Tasa lineal de deriva	$p_1 = 0,23$ mGal/día
Coefficiente de determinación (R^2)	0,999937

Los residuos entre los valores medidos y el ajuste lineal varían (salvo valores anómalos) entre los -6 y 5 mGal, siguiendo una tendencia oscilatoria (Figura 4.6). Asimismo, los residuos del ajuste cuadrático (Figura 4.7) siguen una tendencia similar, con una amplitud algo inferior (entre -5 y 5 mGal). Este hecho, junto con el coeficiente de determinación mayor (consultar Tabla 4.2 y Tabla 4.3), apunta hacia una conclusión: el ajuste cuadrático es más adecuado para cuantificar la componente a largo plazo de la deriva instrumental para el gravímetro CG-5 empleado en el presente Trabajo.

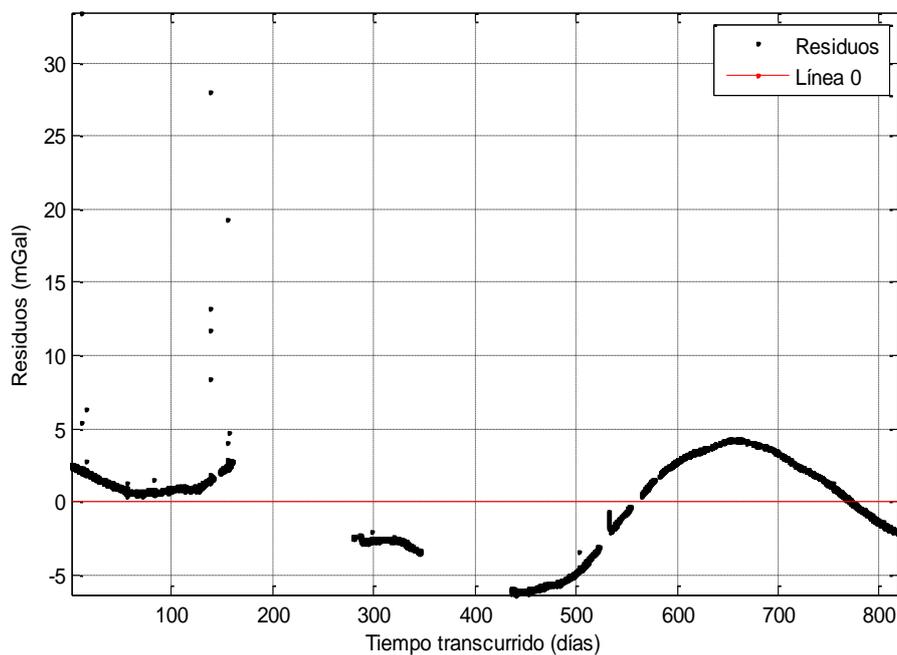


Figura 4.6. Residuos del ajuste lineal para el histórico de lecturas del gravímetro CG-5 en la base del laboratorio (febrero 2014 a mayo 2016).

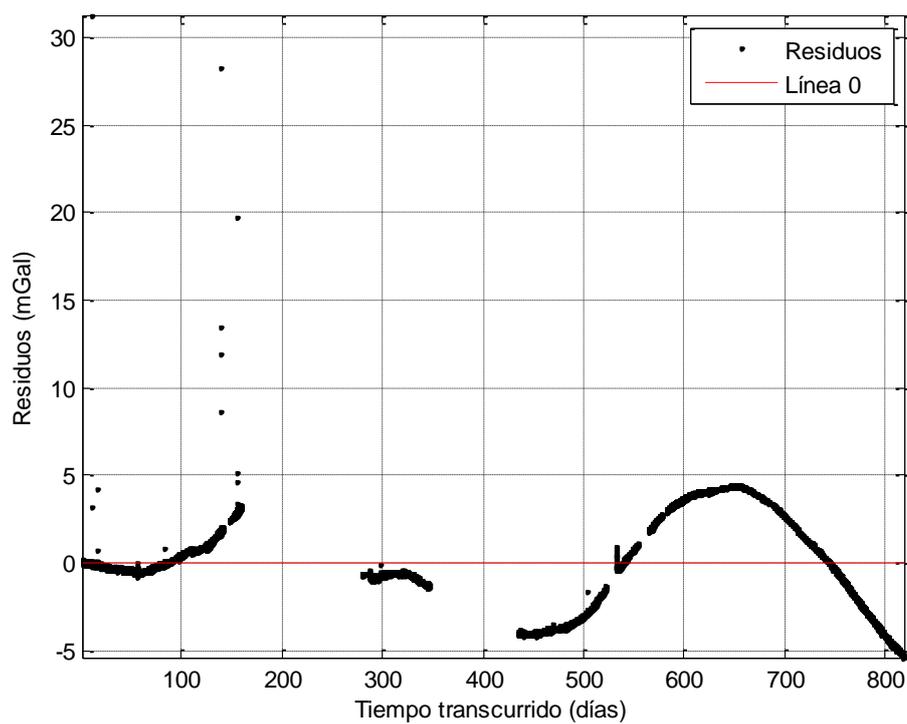


Figura 4.7. Residuos del ajuste cuadrático para el histórico de lecturas del gravímetro CG-5 en la base del laboratorio (febrero 2014 a mayo 2016).

5 CAMPAÑA DE CAMPO

5.1 Selección del emplazamiento y contexto geológico

Para la selección del emplazamiento donde realizar el perfil gravimétrico, se han revisado las hojas del Mapa Geológico Nacional Escala 1:50.000 (MAGNA) correspondientes al ámbito geográfico asturiano, con el objetivo de localizar la traza de la Falla de Ventaniella.

De todas las zonas donde se aprecia la falla, es de especial interés la región central asturiana situada entre Pola de Siero y Nava, ya que los materiales geológicos presentan afloramientos escasos y por tanto el trazado en el mapa (Beroiz et al., 1973) tiene un marcado carácter interpretativo.

Esta región se incluye geológicamente dentro de la Zona Cantábrica, y los materiales presentes se adscriben dentro de lo que se conoce como Cobertera Mesozoico-Terciaria. La razón de esta denominación es la disposición discordante de las rocas sobre el zócalo paleozoico. Los materiales rocosos de dicha cobertera, al haberse acumulado más tarde, han podido librarse de los intensos procesos de deformación que afectaron al basamento, especialmente durante la Orogénesis Varisca, por lo que tienden a disponerse, salvo en áreas muy localizadas, próximas a fallas de edad tardía, con inclinaciones menores, pudiendo incluso aparecer horizontalizados (Bastida y Aramburu, 1995). La Falla de Ventaniella, que se forma posteriormente asociada a los procesos de la Orogenia Alpina, es la que produce el desplazamiento esencialmente lateral de los materiales mesozoicos presentes en el área estudiada.

Una vez identificada el área de interés, se localizó una zona que cumpliera las siguientes condiciones:

- Acceso sencillo mediante automóvil.
- Pavimento estable: para facilitar el estacionamiento del gravímetro en cada punto de medida, es deseable que el sustrato sobre el que se coloca el equipo evite al máximo los asentamientos diferenciales. Este hecho se facilita en lugares pavimentados frente a caminos de tierra o zonas de pradería. Asimismo, se permite el marcaje de los puntos de estacionamiento con pinturas en aerosol, lo que facilita la repetición de medidas durante una

misma campaña en un punto de estacionamiento determinado (p. ej. la estación base).

- Camino poco transitado: el paso de gente, automóviles, maquinaria agrícola, animales, etc., produce vibraciones que afectan a las medidas (Scintrex Ltd., 2012; Seigel, 1995).
- Trazado del perfil perpendicular a la estructura: para que la respuesta gravimétrica sea simétrica a un lado y a otro de la traza supuesta de la falla, el perfil planteado debe ser lo más perpendicular posible a ésta.
- Traza del camino preferiblemente recta: un perfil de pequeña curvatura facilitará posteriormente la interpretación en base a un corte geológico rectilíneo.

De acuerdo con las condiciones anteriormente enumeradas, la ubicación finalmente elegida fue la **calleja del Gatín**, perteneciente a la localidad de **El Solanu** (Figura 5.1, recuadro verde a puntos), uno de los 63 núcleos de población que componen el concejo de Nava (Asturias, España).

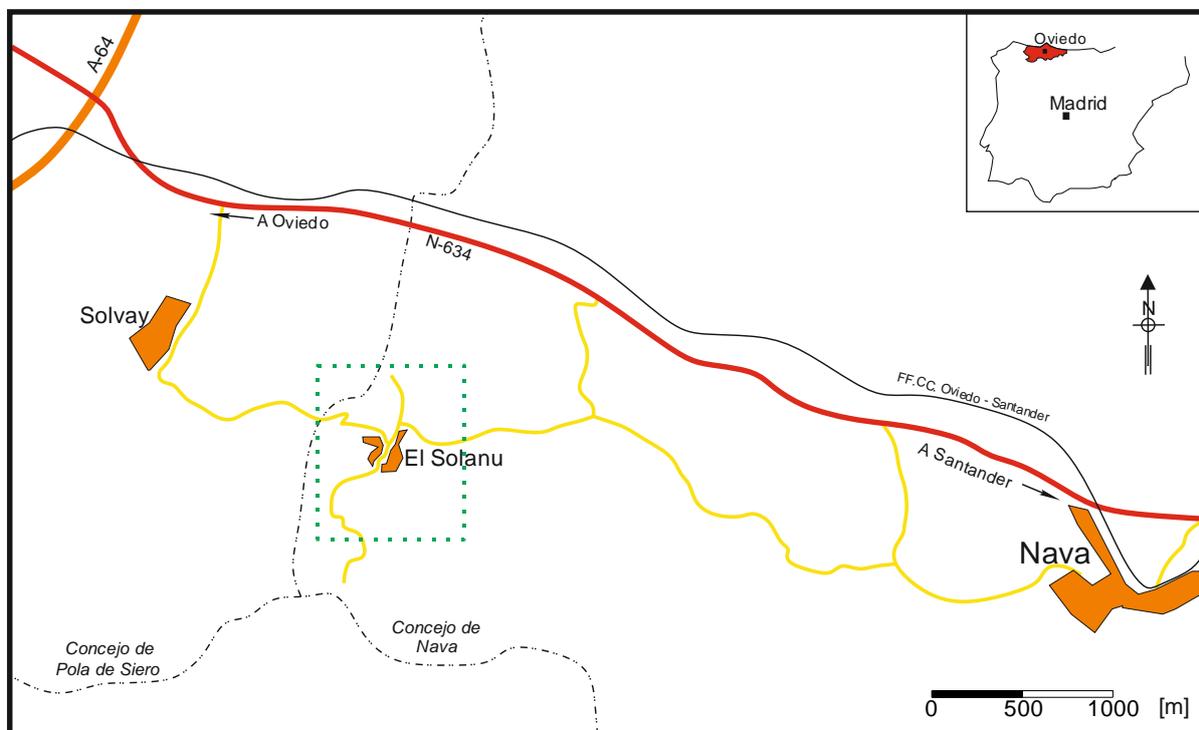


Figura 5.1. Ubicación de El Solanu (Asturias, España)

Tras la selección del emplazamiento, es necesario caracterizar las formaciones geológicas que aparecen en el área de interés, de acuerdo con Beroiz et al. (1973). El objetivo es tener una visión general de las características geológicas de la zona, que facilite posteriormente la interpretación de la curva gravimétrica obtenida tras el procesamiento de las mediciones realizadas. Asimismo, también es recomendable la realización de un corte geológico sobre la traza de la calleja del Gatín (donde se plantea el perfil gravimétrico), extendido varios kilómetros para conseguir una idea de conjunto.

Así:

- En el apartado 9 (página 85) se incluye la sección del mapa (digitalizado) de Beroiz et al. (1973) correspondiente al área de estudio, con las estaciones propuestas (ver Figura 6.2 y Figura 6.3, página 61) ubicadas sobre él. En la denominación y designación de cada formación geológica, se ha seguido la nomenclatura empleada actualmente en la Cartografía Geológica Digital Continua desarrollada por el IGME (Plan GEODE⁹).
- A partir del mapa de la página 85, se realizó un perfil geológico A-A', incluido en la Figura 5.2.

⁹ <http://info.igme.es/cartografiadigital/geologica/geode.aspx>

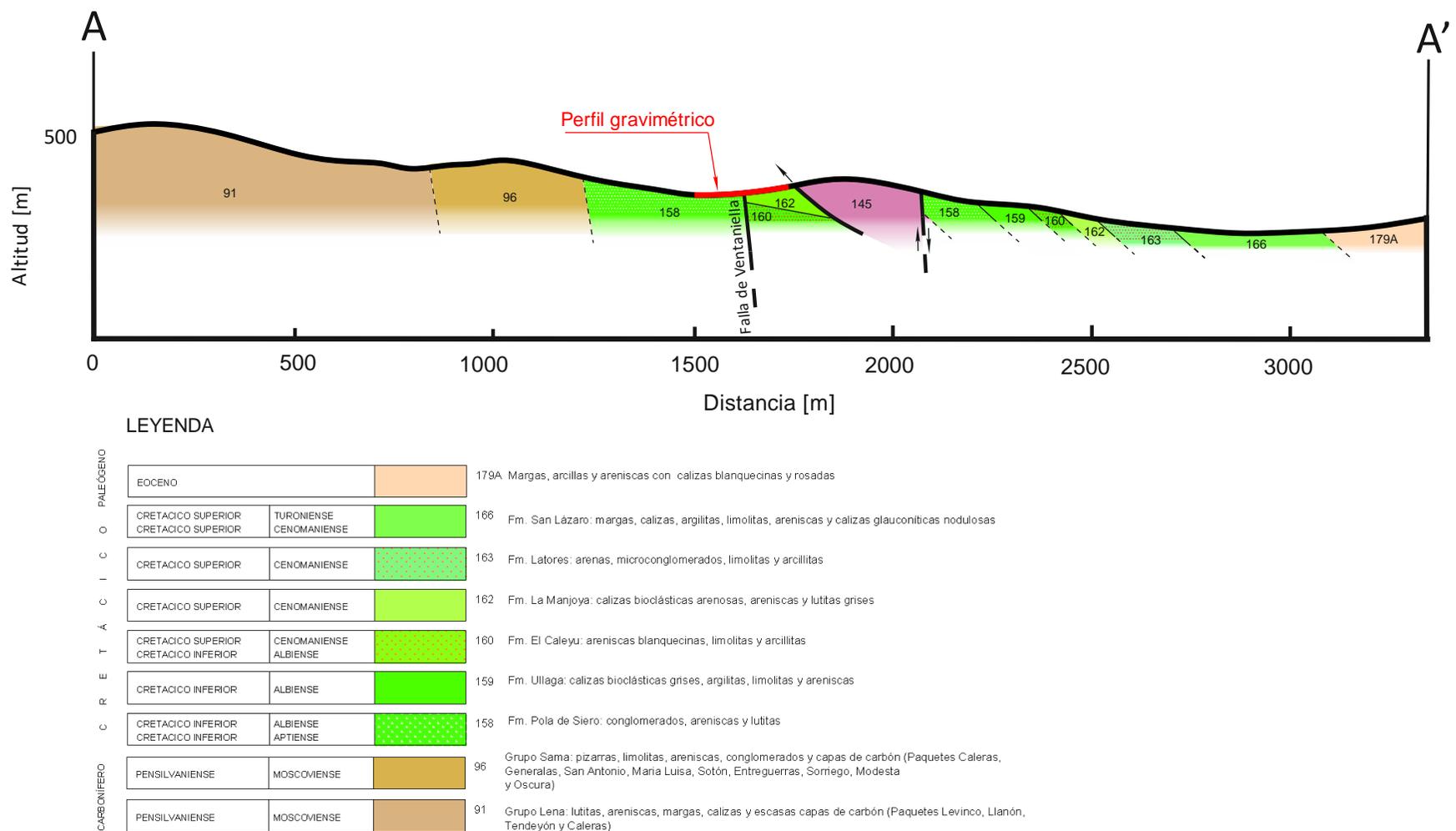


Figura 5.2. Perfil geológico A-A'. Área de El Solanu (Asturias, España)

Como se puede apreciar en la Figura 5.2, las litologías que pone en contacto la Falla de Ventaniella en El Solanu se corresponden con las **Fms. Pola de Siero** (SW) y **La Manjosa** (NE). Estas dos formaciones, situadas en la cobertera Mesozoico-Terciaria, pertenecen al Cretácico.

El período Cretácico, con una duración total de 81 millones de años, está comprendido entre los 146 y los 65 millones de años antes del presente. Los afloramientos de esta época en Asturias se conservan exclusivamente en determinadas áreas de los sectores central (ubicación de El Solanu) y oriental de la región, aunque inicialmente los sedimentos de esta edad debieron de ocupar una extensión bastante mayor que la actual, como puede deducirse del estudio de aquellos que la erosión posterior ha respetado (Bastida y Aramburu, 1995). Se extiende, en dirección este-oeste, a lo largo de una estrecha franja que sigue la depresión prelitoral asturiana, desde los alrededores de San Claudio y Llanera al oeste, prolongándose por los contornos de Oviedo, Pola de Siero, Nava, Infiesto, Arriondas y Cangas de Onís, hasta Mestas de Con, ocupando las depresiones de los valles del Nora, Piloña y Güeña (Bastida y Aramburu, 1995).

Dentro del Cretácico asturiano se pueden diferenciar, a grandes rasgos, dos grandes conjuntos de rocas que alcanzan un espesor total de 150 a 280 m, según las zonas (Bastida y Aramburu, 1995):

- El conjunto inferior, de edad Albiense a Cenomaniense, está constituido por conglomerados, areniscas, arenas, arcillas y carbonatos, pero predominando siempre los materiales silíceos.
- El conjunto superior, con una edad Turoniense a Santoniense, es predominantemente carbonatado, aunque con una importante intercalación siliciclástica.

Además, estudios más recientes como el de González Fernández, Menéndez Casares, Gutiérrez Claverol y García-Ramos (2004), incluyen también otro conjunto adicional que sólo aflora en la franja septentrional de la cuenca, cerca de la costa cantábrica.

Debido a la nomenclatura confusa que se seguía en el Cretácico asturiano, González Fernández et al. (2004) realizaron una unificación de todas las litologías,

tomando como base la bibliografía precedente y realizando nuevo trabajo cartográfico. Esta misma nomenclatura es la que se sigue en el GEODE, por lo que es la que se toma como referencia en este Trabajo.

Así, en el Cretácico asturiano (sector occidental) se establecen diez formaciones, que de muro a techo son: Peñaferruz, Antromero, Pola de Siero, Ullaga, El Caleyú, La Manjoya, Latores, San Lázaro, La Argañosa y Oviedo. Para mayor claridad y con objeto de situar claramente las formaciones de interés (Pola de Siero y La Manjoya), se ha adaptado la columna estratigráfica incluida en González Fernández et al. (2004) (Figura 5.3).

De acuerdo con estos autores, la **Formación Pola de Siero** presenta dos tramos bien diferenciados: el inferior conglomerático y el superior arenoso (Figura 5.3):

- Los conglomerados son silíceos con matriz limo-arenosa, heterométricos y redondeados, con intercalaciones de arcillitas rojas, y también de niveles de arenisca fina muy poco cementada. Los cantos presentan localmente granoselección positiva.
- El tramo arenoso está constituido por areniscas de grano mayoritariamente fino, blanco-amarillentas a grises, con intercalaciones de arcillitas plásticas, grises-rosáceas a negras. También se observan finos niveles de limolitas, materia orgánica, nódulos de pirita y costras ferruginosas.

En lo que respecta a la **Formación La Manjoya**, está constituida por niveles de calizas o areniscas calcáreas, limolitas grises a negras (ocasionalmente con ámbar) y calizas. Los niveles carbonatados presentan, en general, un abundante contenido fosilífero. Las calizas de esta unidad pueden estar karstificadas, oxidadas y dolomitizadas y, a veces, presentan estratificación cruzada (González Fernández et al., 2004).

Una vez caracterizadas las litologías presentes, será posible tanto el tratamiento de los datos obtenidos en la campaña como la interpretación de los resultados que se deriven de este proceso. La discusión correspondiente se realiza en el apartado 6.

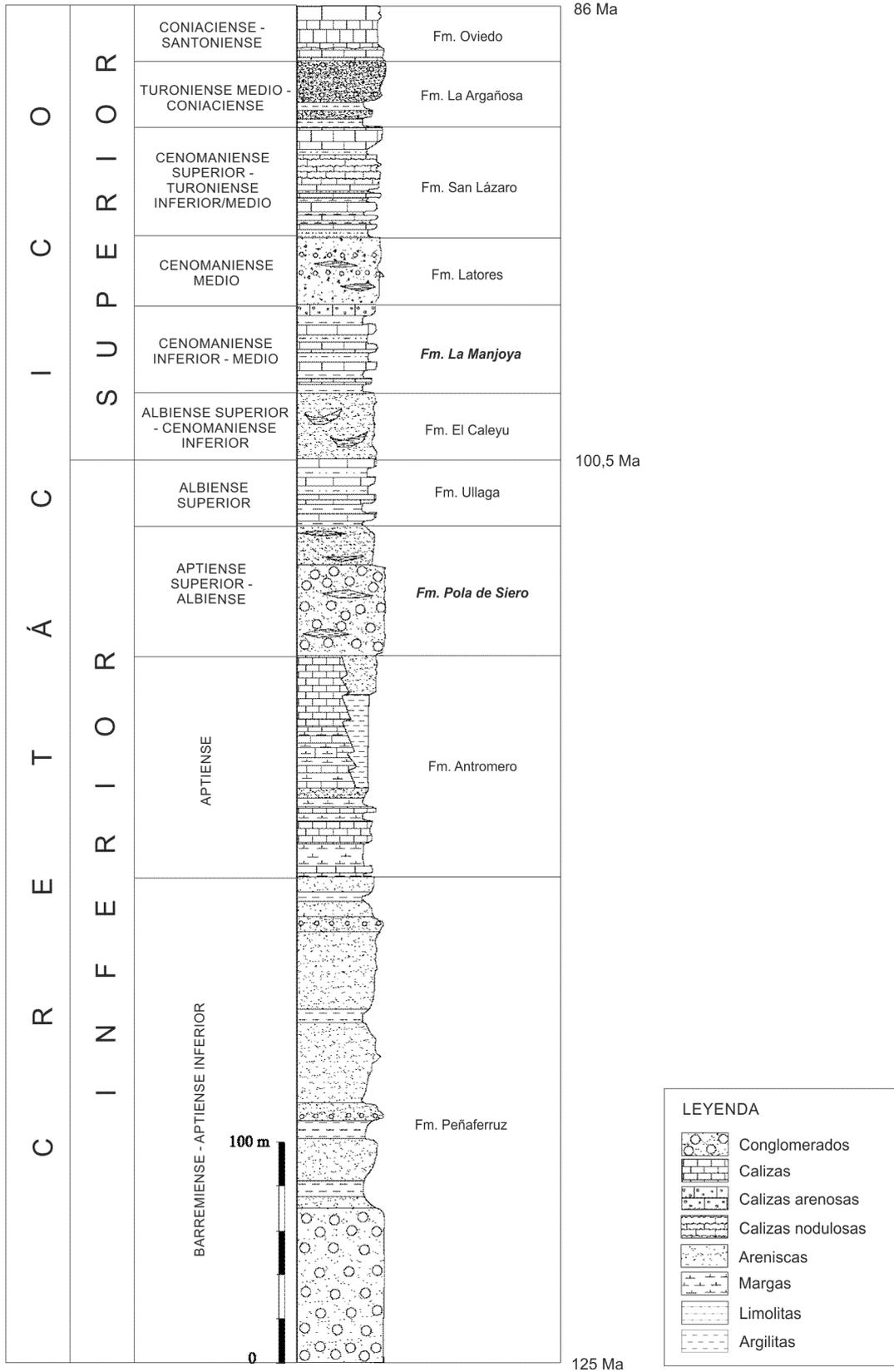


Figura 5.3. Columna estratigráfica del Cretácico asturiano (adaptado de González Fernández et al., 2004). Las formaciones de interés aparecen destacadas en negrita y cursiva (Ma=millones de años).

5.2 Planteamiento de la logística. Esquema y patrón de estacionamiento

Una vez establecida la localización del perfil gravimétrico, deben definirse otros dos parámetros esenciales: su longitud y el espaciado entre estaciones.

Para los objetivos de este Trabajo, y teniendo en cuenta la disponibilidad para emplear el equipo CG-5, el factor fundamental a la hora de determinar los dos parámetros anteriormente referidos fue el tiempo.

Se planteó la posibilidad de desarrollar una campaña de campo dividida en dos jornadas alternas, separadas una semana entre sí¹⁰ (en adelante, Jornada 1 y Jornada 2). Considerando este punto de partida, se creyó conveniente distribuir los objetivos a cumplir entre las dos jornadas de la siguiente forma:

- **Jornada 1:** (1) determinación del tiempo de estabilización tras transporte (parámetro esencial que se discute en el apartado 5.3); (2) localización de una zona estable donde situar la estación base; y (3) toma de medidas en una serie de puntos espaciados entre sí, de forma que (a) se puedan tener datos de g a un lado y a otro de la falla, de acuerdo con el trazado de Beroiz et al. (1973), y (b) pueda prescindirse de las medidas tomadas en la Jornada 2 en caso de que estas no sean equiparables en precisión a las de la Jornada 1, o que el equipo no estuviese disponible.
- **Jornada 2:** (1) establecimiento de una serie de estaciones intermedias entre puntos del perfil de la Jornada 1, permitiendo de este modo reducir la incertidumbre en el valor de g en los “huecos” entre estaciones; (2) repetición de las medidas en alguno de los puntos del perfil de la Jornada 1 para comparar los valores obtenidos.

El siguiente paso, teniendo en cuenta los objetivos anteriores, fue plantear la logística de la campaña de campo en cada jornada. El tiempo de traslado en automóvil desde el laboratorio de Mieres (donde se encuentra la base del gravímetro empleado) hasta El Solanu se estimó en aproximadamente 40 minutos.

Por otro lado, una vez en la localización designada, se debe tener presente que el número de desplazamientos y medidas es considerablemente superior al número de estaciones de un perfil, debido a la necesidad de vuelta a la base cada cierto tiempo para

¹⁰ 23/10/2015 y 30/10/2015.

corregir la componente a corto plazo de la deriva instrumental. Estos desplazamientos constituyen una pérdida nada desdeñable de tiempo, que no se está destinando a hacer mediciones.

Asimismo, durante el transcurso de la campaña de medición pueden surgir una serie de imprevistos que retrasen el transcurso normal de lo planificado, por lo que siempre es recomendable contar con un margen de tiempo suficiente.

En base a todos estos factores referidos, se realizó la planificación preliminar que se recoge en la Tabla 5.1.

Tabla 5.1. Planificación logística preliminar de la campaña de campo de las Jornadas 1 y 2.

Parámetro logístico	Jornada 1	Jornada 2
Longitud máxima del perfil (l_{perfil}) [m]	260	260
Hora llegada [hh:mm]	10:30	10:30
Hora salida [hh:mm]	19:30	18:00
Tiempo disponible (t_{disp}) [h:mm]	9:00	7:30
Tiempo estabilización (t_{estab}) [h:mm]	1:30	1:30
Búsqueda estación base y preparación terreno (t_{bus}) [h:mm]	0:15	[-]
Tiempo perdido por imprevistos (t_{imp}) [h:mm]	2:00	2:00
Tiempo restante para estacionamientos ¹¹ (t_{est}) [h:mm]	5:15	4:00
Tiempo de medida en cada estación (t_{med}) [h:mm]	0:15	0:15
Tiempo perdido entre estacionamientos ¹² (t_{perd}) [h:mm]	0:08	0:08
Número de estaciones ¹³ (n_{est})	13	10
Distancia entre cada estación ¹⁴ (d_{est}) [m]	20	26
Número de estaciones (a excepción de la base)	12	9
Número de estaciones del "loop"	4	3
Número de "loops"	3	3

De la Tabla 5.1, se extraen las siguientes conclusiones:

- Para la jornada 1: el número de estaciones que es factible realizar es de 12, al descontar la estación base. De esta manera, se ha creído conveniente

¹¹ $t_{est} = t_{disp} - (t_{estab} + t_{bus} + t_{imp})$

¹² Incluye tiempos perdidos en desplazamientos entre estaciones consecutivas y retornos a la base para la corrección de derivas.

¹³ $n_{est} = \frac{t_{est}}{t_{med} + t_{perd}}$

¹⁴ $d_{est} = \frac{l_{perfil}}{n_{est}}$

distribuir estas 12 estaciones en 3 “loops” (o ciclos) de 4 estaciones cada uno: **Base-1-2-3-4-Base-5-6-7-8-Base-9-10-11-12-Base.**

- Para la jornada 2: realizando el mismo razonamiento, el número de estaciones que es factible realizar es de 9, descontando la base. Se ha decidido distribuir las en 3 “loops” de 3 estaciones cada uno: **Base-1-2-3-Base-4-5-6-Base-7-8-9-Base.**

La denominación de las estaciones empleada en los puntos previos no es la definitiva: sólo hace referencia al orden cronológico de ocupación. El nombre designado a cada punto de perfil se decide en la propia campaña de campo (ver apartado 5.4). Esto es así ya que, por ejemplo, las estaciones en las que se repetirán medidas en la Jornada 2 sólo se conocerán tras haber ejecutado la Jornada 1, y asignar un nombre de antemano parece poco operativo.

Asimismo, las distancias entre estaciones recogidas en la Tabla 5.1 son meramente tentativas. El valor final dependerá de aquellas zonas que, considerando una separación lo más próxima posible a este valor tentativo, cumplan las condiciones necesarias para convertirse en punto de estacionamiento: alejadas del tráfico, con base pavimentada y suficientemente estable, etc.

En lo que respecta al tiempo de estabilización, éste no se conoce a priori (dependerá de las condiciones de transporte, tal y como se analiza detalladamente en el apartado 5.3), pero en base a otras campañas de campo realizadas con el mismo equipo CG-5 (González-Quirós, 2015) se ha estimado suficiente reservar 1,5 h para ejecutar esta prueba.

La forma en la que finalmente se desarrolló la campaña de campo, así como la descripción del proceso de toma de mediciones, se trata en el apartado 5.4.

5.3 Determinación del tiempo de estabilización tras transporte al emplazamiento

En la planificación de una campaña de campo, es necesario caracterizar con carácter previo el comportamiento del CG-5 tras el transporte al sitio de medición. En este caso se realizó en la Jornada 1.

El objetivo es cuantificar cuánto tiempo se ha de esperar para tomar medidas con una precisión requerida tras la llegada al punto de medición. La participación de ciertas desviaciones, cuyo origen y tipología se discute en este apartado, puede provocar que las medidas tomadas presenten una desviación típica muy elevada durante períodos de tiempo que pueden llegar a varias horas. Esto haría inviable por completo cualquier campaña de campo.

De acuerdo con Scintrex Ltd. (2012), las vibraciones o posibles choques en el transporte y la manipulación del gravímetro pueden inducir derivas a corto plazo (consultar apartado 3.2.2) que pueden ser del orden de varias horas de duración (Seigel, 1995). Este problema afecta tanto al modelo CG-5 como a su versión previa CG-3M, y siempre de acuerdo con Scintrex Ltd. (2012), puede determinarse sencillamente mediante una serie de medidas repetidas en una estación base seleccionada.

Sin embargo, Reudink et al. (2014) localizaron una susceptibilidad de este modelo de gravímetro –relativa a su inclinación durante el transporte– que no puede ser fácilmente detectada siguiendo las recomendaciones del fabricante. Aun correctamente ubicado en su mochila acolchada, y evitando al máximo las vibraciones y aceleraciones bruscas durante el transporte, se encontró que si las inclinaciones superaban un valor crítico de aproximadamente 6° durante varios minutos, las observaciones iniciales podían desviarse en un rango de decenas de μGal . Teniendo en cuenta que la precisión del equipo es de $1 \mu\text{Gal}$, y la desviación estándar de las medidas en cualquier localización debería ser inferior a los $5 \mu\text{Gal}$ (Scintrex Ltd., 2012), la influencia que ejerce el efecto anteriormente descrito no puede ser despreciada.

Las referencias bibliográficas que documentan este efecto son escasas. Yushkin (2011) apunta hacia la necesidad de mantener el CG-5 en una posición lo más verticalmente posible y orientado preferentemente siempre en una misma dirección con respecto a la dirección de movimiento cuando el transporte se realiza mediante vehículos de orugas (Figura 5.4). Asimismo, recomienda descartar el uso de mochilas de transporte

habituales si se quiere evitar una rápida fatiga de los componentes del equipo para viajes en regiones sin carreteras y en vehículos con orugas. La empresa *Niimorgeofizika-Group* ha diseñado una mochila-carcasa especial para este tipo de condiciones en sus campañas de prospección de hidrocarburos en Siberia (Federación Rusa). Sin embargo, las características de diseño de este tipo de dispositivos no son accesibles mediante los cauces habituales de consulta bibliográfica.



Figura 5.4. Campaña gravimétrica de prospección de yacimientos de petróleo y gas en Siberia (Federación Rusa). El transporte del CG-5 se realiza mediante vehículo con orugas debido a la dificultad del terreno y a la ausencia de carreteras (Niimorgeofizika-Group, 2009)

En el diseño de la campaña de campo, es por tanto indispensable cuantificar el efecto de la inclinación del gravímetro tras el transporte. Este no puede evitarse completamente al ser imposible mantener condiciones de horizontalidad total durante todo el trayecto. No obstante, se puede minimizar empleando una disposición en el interior del automóvil ya ensayada en otras campañas (González-Quirós, 2015). Las principales precauciones tomadas fueron:

- Ubicación en el asiento trasero central del automóvil.
- Protección mediante la mochila acolchada.
- Amarre firme mediante el cinturón de seguridad central.
- Nivelación en el asiento con ayuda de unos recortes de poliuretano.

Una vez en el lugar designado en el apartado 5.3 para la ejecución de la campaña de campo, se estacionó el gravímetro en una ubicación estable y se comenzaron las mediciones. Los parámetros seleccionados para el registro de las medidas en la memoria interna del equipo se recogen en la Tabla 5.2. Asimismo, puede consultarse un extracto de los datos registrados en la Tabla 9.2.

Tabla 5.2. Parámetros empleados en el registro de mediciones tomadas para determinar el tiempo de estabilización

Parámetro	Selección
Tiempo de lectura (DUR)	2 segundos
Auto-eliminación	SÍ
Filtro sísmico	SÍ
Corrección continua de inclinación	SÍ
Corrección de terreno	NO
Corrección por marea terrestre	SÍ
Corrección automática por deriva lineal	SÍ
Registro de datos en bruto (6 Hz)	NO

Se considera importante en este punto recordar las definiciones de varios parámetros estadísticos que se van a emplear (Montgomery y Runger, 1996) para poder establecer una relación entre los valores de la Tabla 9.2 y la determinación del tiempo de estabilización, objetivo final perseguido con estas mediciones.

Se define **media muestral** \bar{x} de una muestra de tamaño n con observaciones puntuales x_1, x_2, \dots, x_n a:

$$\bar{x} = \frac{x_1 + x_2 + \dots + x_n}{n} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} \quad (5.1)$$

Se define **varianza muestral** s^2 de una muestra de tamaño n con observaciones puntuales x_1, x_2, \dots, x_n a:

$$s^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n - 1} \quad (5.2)$$

La **desviación estándar muestral** s es la raíz cuadrada positiva de la varianza muestral.

El **error estándar estimado de la media muestral** $\hat{\sigma}_{\bar{x}}$ da una idea sobre la precisión que se obtiene al representar la media de una población mediante una media muestral.

$$\hat{\sigma}_{\bar{x}} = \frac{s}{\sqrt{n}} \quad (5.3)$$

El gravímetro CG-5 mide a una frecuencia de 6 Hz durante un período de tiempo definido por el usuario (ciclo), que como mínimo es de 1 segundo. Para cada ciclo, el software implementado en el equipo calcula la media (\bar{x}) y el error estándar estimado de esa media ($\hat{\sigma}_{\bar{x}}$).

En este caso, por tanto, los datos registrados en las columnas 1 y 2 de la Tabla 9.2 son las medias y los errores estándar estimados de las 12 mediciones realizadas durante los 2 segundos del ciclo (DUR=2s).

El análisis directo de estos datos no permite extraer ninguna conclusión en relación a la estabilización de las medidas. Por ello, es necesario realizar algún tipo de razonamiento auxiliar. En este sentido, y teniendo en cuenta las definiciones de los parámetros estadísticos recogidos en las ecuaciones (5.1), (5.2) y (5.3), parece evidente que el error estándar de la media muestral es el indicador adecuado para extraer algún tipo de conclusión.

En efecto, la media muestral \bar{x} representará de manera más fiel a la media real de la población (i.e. las infinitas mediciones que idealmente podría realizar el gravímetro en un tiempo diferencial) cuanto mayor sea el número de muestras (i.e. las medidas en bruto a 6 Hz del gravímetro) y, en consecuencia, cuanto menor sea el error estándar de la media muestral $\hat{\sigma}_{\bar{x}}$.

Por tanto, el efecto que se quiere observar con las pruebas de estabilización tras el transporte es la disminución de $\hat{\sigma}_{\bar{x}}$ de las muestras a 6 Hz a medida que aumenta el tiempo de permanencia en la misma estación (i.e. aumenta el número de muestras empleadas para el cálculo de \bar{x})

En este punto surge un problema a resolver: no se tiene acceso a las muestras individuales a 6 Hz, sino a sus medias y desviaciones estándar para ciclos de 2 segundos. Será necesario encontrar alguna relación entre estos valores y el de $\hat{\sigma}_{\bar{x}}$ de las muestras a 6 Hz a medida que aumenta el tamaño de muestra. Dicha relación se deduce paso a paso en el apartado 9.1.1, siendo la expresión final obtenida (5.4):

$$\hat{\sigma}_k = \sqrt{\frac{(n-1) \cdot \sum_{i=1}^k s_i^2 + n \cdot \sum_{i=1}^k \bar{x}_i^2 - \frac{n}{k} \cdot (\sum_{i=1}^k \bar{x}_i)^2}{k \cdot n \cdot (k \cdot n - 1)}}; \quad k = 2,3, \dots, 1082 \quad (5.4)$$

Donde:

n es el tamaño de muestra con el que se calculan las medias y errores estándar de cada dato (ciclo) de la Tabla 9.2 ($n = 6 \text{ mediciones}/s \cdot 2^s/\text{ciclo} = 12$).

k es el número de pares de datos (\bar{x}_i, s_i) de la Tabla 9.2 empleados para el cálculo del error estándar de la media muestral $\hat{\sigma}_k$. Varía entre 2 y 1082, que es el total de pares de datos (\bar{x}_i, s_i) del tipo de los recogidos en la Tabla 9.2 (total de ciclos).

En el apartado 9.1.2 se adjunta también un breve código en MATLAB® que permite implementar de forma sencilla la expresión (5.4) para obtener la evolución de $\hat{\sigma}_k$ desde el inicio hasta el fin de las mediciones.

La representación gráfica de esta evolución se recoge en la Figura 5.5. En ella se aprecia un brusco descenso de $\hat{\sigma}_k$ en los primeros 8 minutos, de manera que en el entorno de los 10 minutos este error se sitúa por debajo del rango de precisión de 5 μGal que garantiza el fabricante (Scintrex Ltd., 2012).

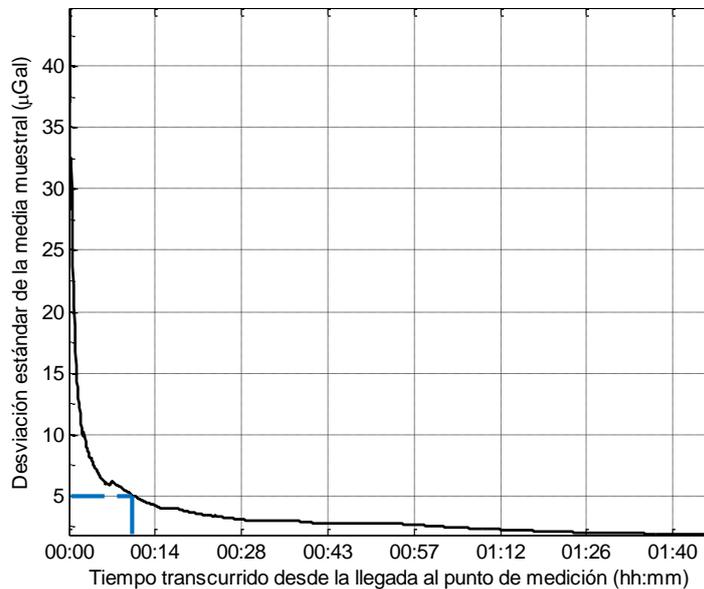


Figura 5.5. Evolución de la desviación estándar de la media muestral con el tiempo de estacionamiento. Obsérvese el descenso a medida que aumenta el tamaño de muestra para el cálculo de la media. Con líneas a trazos (azul) se indica el tiempo de estabilización hallado (aprox.10 minutos)

En conclusión, para las condiciones de transporte características de la campaña de campo planteada, y siguiendo las precauciones en cuanto a inclinación del equipo, se considera que las mediciones del gravímetro son estables a partir de 10 minutos tras la

llegada al sitio, y, por tanto, todas las mediciones tomadas en cualquier estación del perfil a partir de este momento son válidas.

Resulta interesante en este punto plantearse qué efecto hubiera tenido en el CG-5 empleado el incumplimiento de las recomendaciones establecidas por Reudink et al. (2014).

Para ello, se ha aplicado la expresión (5.4) a las mediciones realizadas por el mismo equipo tras otra campaña de campo en la que no se tuvo en cuenta el criterio de la inclinación. Tras un transporte de unos 40 minutos desde el lugar de la campaña hasta la base de Mieres, se observa que las mediciones posteriores no entran en un rango aceptable de precisión ($\hat{\sigma}_{\bar{x}} < 5 \mu\text{Gal}$) hasta transcurridas aproximadamente 4,5 horas.

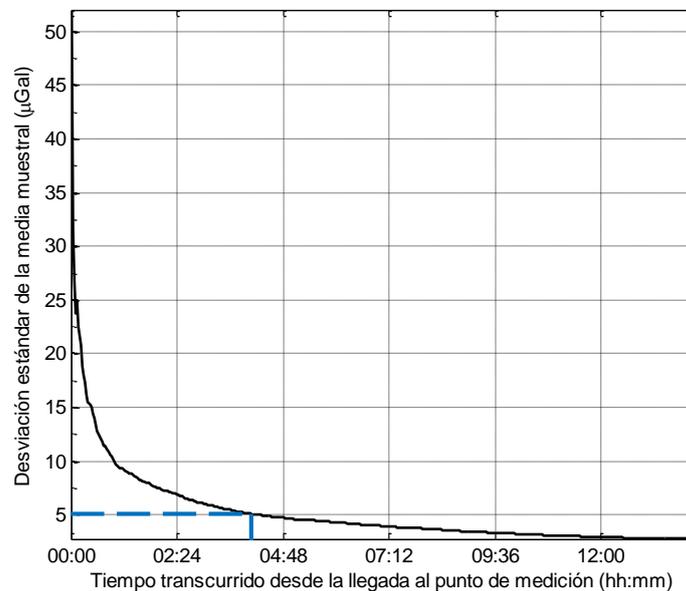


Figura 5.6. Evolución de la desviación estándar de la media muestral con el tiempo de estacionamiento. Obsérvese la línea azul a trazos y compárese con la Figura 5.5 la diferencia temporal en alcanzar el rango de precisión que garantiza el fabricante (de 10 minutos a 4,5 horas)

Un vistazo rápido a la Figura 5.5 y a la Figura 5.6 evidencia la importancia que tiene la inclinación del equipo durante el transporte en la calidad de las mediciones que se van a realizar durante la campaña de campo, y lo que es más importante, en su logística. Un tiempo de estabilización de 4,5 horas (Figura 5.6) hace prácticamente inviable la ejecución de un perfil gravimétrico durante una jornada.

Como conclusiones a lo expuesto a lo largo de este apartado cabría plantear los siguientes puntos:

- El tiempo de estabilización para la campaña de campo siguiendo las recomendaciones de Reudink et al. (2014) es suficientemente pequeño para plantear una logística viable de la campaña de campo en la ubicación seleccionada.
- La influencia de la inclinación es determinante: el transporte durante unos minutos bajo condiciones de no horizontalidad puede provocar que no se alcance el rango de precisión en las medidas garantizado por el fabricante hasta transcurridas varias horas.

5.4 Ejecución de la campaña de campo

En este apartado se comenta de forma conjunta, por sus similitudes, los aspectos característicos de la campaña de campo llevada a cabo en las Jornadas 1 y 2.

Tras la llegada a la localización del perfil en El Solanu, y (a) una vez realizada la prueba de estabilización en el caso de la Jornada 1; o (b) transcurrido el tiempo de estabilización determinado en dicha prueba (véase apartado 5.3) en el caso de la Jornada 2, se comienza la campaña.

En primer lugar, se elige como estación base una zona recogida y alejada del tráfico y del tránsito de personas y/o animales (Figura 5.7), iniciándose las mediciones.



Figura 5.7. Emplazamiento de la estación base. Obsérvese que se trata de un emplazamiento tranquilo, alejado lo máximo posible de la traza central del camino pavimentado y en el que la referencia espacial de la ubicación es evidente. Así se evita cualquier problema que pudiese surgir en posibles ocupaciones en días distintos a los planteados (p. ej., borrado de las marcas de pintura del pavimento), caso de que fuese necesario repetir mediciones.

La metodología de medición a seguir en cada una de las estaciones (incluida la base) se puede resumir en los siguientes puntos:

- Selección de su ubicación y marcaje sobre el pavimento mediante una pintura verde en aerosol (Figura 5.8), indicándose cada uno de los vértices del trípode sobre el que se asienta el gravímetro.

- Colocación del trípode sobre las indicaciones del pavimento y estacionamiento del gravímetro sobre el trípode (Figura 5.9).
- Nivelación del trípode mediante un proceso similar a la nivelación topográfica de equipos: se efectúa primero un ajuste grosero observando la indicación del nivel de burbuja acoplado al trípode y, una vez calado, se procede a una nivelación fina con las herramientas de inclinación que posee el aparato (Figura 5.10).
- Medición de la altura del aparato: la altura del gravímetro es un factor crítico, si bien en esta campaña no lo es tanto como para, por ejemplo, estudios microgravimétricos. Todas las medidas deben ser referidas a la altura del mismo punto del aparato. En concreto, se ha escogido un punto situado en la cara inferior del gravímetro. Así, a la cota de cada estación (determinada mediante su situación en un mapa topográfico de la suficiente precisión), se le sumará el valor correspondiente a esta altura sobre el pavimento de la cara inferior del equipo. La operación se lleva a cabo con una regla metálica de precisión milimétrica.
- Medición propiamente dicha: como se ha indicado ya en el apartado 5.3, el equipo empleado está preparado para realizar 6 mediciones cada segundo, promediando éstas para ciclos de medida seleccionados por el usuario, que son los registrados en la memoria interna. Para la Jornada 1, los ciclos de medida se establecieron en 2 segundos; mientras que en la Jornada 2 fueron de 60 segundos¹⁵.



Figura 5.8. Marcaje de los puntos de estacionamiento del gravímetro (destacado en círculo rojo)

¹⁵ De 30 segundos para la primera ocupación de la estación base.



Figura 5.9. Vista inferior del CG-5 (izquierda) y trípode (derecha). Obsérvese las indicaciones sobre la disposición correcta de los punzones del trípode sobre la base del gravímetro (A, B y C)

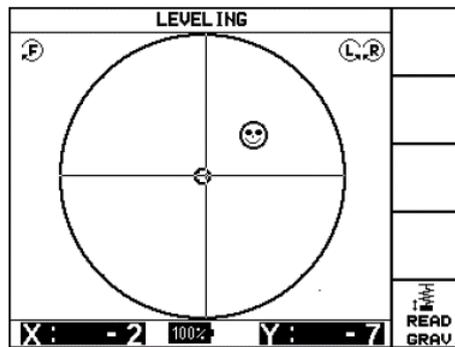


Figura 5.10. Pantalla de nivelación del CG-5. En la parte superior se indica el sentido de giro de las ruedas del trípode para conseguir la nivelación (F=rueda frontal, L=rueda izquierda, R=rueda derecha). A medida que se giran las ruedas, las líneas horizontal y vertical se mueven hasta que coinciden perpendicularmente en el punto central, momento en el que el CG-5 está nivelado (emoticono ☺). Es conveniente además que, llegados a este punto, la inclinación en segundos de arco (indicada en la parte inferior de la pantalla) sea como máximo de $X=Y=\pm 3$

Es importante notar que, en todo momento, se fue indicando en un cuaderno de campo aquellas incidencias que se iban produciendo a medida que transcurrían las mediciones, así como la identificación de las estaciones, y las horas de inicio y fin de las medidas en cada punto. Estas anotaciones sirven como sistema de comprobación de los datos brutos que se descargan del gravímetro, y permiten identificar cualquier error que pueda derivarse de este proceso.

En cuanto a la denominación de las estaciones, se sigue el siguiente criterio alfanumérico (Tabla 5.3): en primer lugar, se coloca la letra “E” (estación), unido al número de estación (1 a 19) según la ocupación por orden cronológico de cada punto. Para la estación base –situada aproximadamente en el centro del perfil, con objeto de reducir los tiempos de desplazamiento en los retornos– se ha reservado la denominación “Base”. Asimismo, aquellas estaciones donde se han realizado repeticiones de medidas durante la Jornada 2, se han denotado añadiendo el sufijo “bis” a la denominación correspondiente de la Jornada 1.

En la Tabla 5.3 se recogen las estaciones planteadas en las Jornadas 1 y 2, siguiendo la nomenclatura anteriormente descrita, junto con (a) un código de

identificación (ID) sencillo (el que se introdujo en el CG-5 y el que aparece en los datos en bruto) y (b) los tiempos de estacionamiento y aquellos perdidos entre estaciones.

Tabla 5.3. Estaciones, denominación, tiempos de ocupación y tiempos muertos para la campaña de campo planteada (Jornada 1 + Jornada 2).

Jornada	Estación	ID	Hora inicio	Hora fin	Duración medición [h:mm]	Duración tiempos muertos [h:mm]
1	Base	2002	12:10	12:34	0:23	-
1	E1	1	12:44	12:59	0:15	0:10
1	E2	2	13:08	13:21	0:12	0:08
1	E3	3	13:29	13:42	0:12	0:07
1	E4	4	13:49	14:01	0:11	0:07
1	Base	2002	14:10	14:24	0:13	0:09
1	E5	5	14:30	14:41	0:10	0:06
1	E6	6	14:49	14:59	0:10	0:07
1	E7	7	15:07	15:19	0:12	0:07
1	E8	8	15:32	15:46	0:14	0:12
1	Base	2002	15:55	16:06	0:11	0:08
1	E9	9	16:12	16:25	0:12	0:06
1	E10	10	16:35	16:48	0:12	0:10
1	E11	11	16:57	17:07	0:10	0:09
1	E12	12	17:18	17:29	0:10	0:10
1	Base	2002	17:38	17:50	0:11	0:09
2	Base	2002	10:10	10:58	0:48	-
2	E13	13	11:13	11:25	0:11	0:14
2	E14	14	11:38	11:50	0:11	0:13
2	E15	15	11:58	12:12	0:14	0:08
2	Base	2002	12:17	12:30	0:13	0:04
2	E16	16	12:36	12:53	0:16	0:06
2	E5bis	555	12:58	13:11	0:13	0:05
2	E17	17	13:18	13:30	0:11	0:07
2	Base	2002	13:37	13:49	0:11	0:06
2	E18	18	14:07	14:20	0:13	0:17
2	E7bis	777	14:26	14:40	0:14	0:06
2	E19	19	14:53	15:08	0:15	0:12
2	Base	2002	15:23	15:39	0:16	0:14

Del análisis de los datos contenidos en la Tabla 5.3, se pueden establecer las conclusiones en cuanto a la logística recogidas en la Tabla 5.4.

Tabla 5.4. Tiempos útiles en la campaña de campo realizada. Se observa que en torno a 1/3 del tiempo no se emplea en realizar medidas

Parámetro	JORNADA 1		JORNADA 2	
	Horas [h:mm]	%	Horas [h:mm]	%
Tiempos de medición	3:26	60,66%	3:31	64,13%
Tiempos muertos	2:13	39,34%	1:58	35,87%
TOTAL	5:39	100,00%	5:29	100,00%

Así, esta información podría emplearse en la planificación de la logística de nuevas jornadas de medición que se llevasen a cabo en el mismo emplazamiento. En ese caso, no se partiría de estimaciones: se tendría el condicionamiento inicial de que sólo se podrán tomar medidas en dos terceras partes del tiempo disponible.

En cuanto a las reocupaciones de la base, Gettings (2009) recomienda, para el equipo CG-5, de 4 a 5 por jornada. Teniendo en cuenta las limitaciones de tiempo ya referidas, se optó por seguir la planificación preliminar de la Tabla 5.1, en la que sólo se cumple esta recomendación para la Jornada 1. Asimismo, el promedio de retorno se situó en las 1:33 horas cada 4 estaciones intermedias en la Jornada 1, mientras que en la Jornada 2 el promedio fue de 1:19 horas cada 3. Este tiempo se ha estimado suficiente para la precisión requerida en las medidas.

Por último, la medida de las distancias entre estaciones se realizó mediante una cinta métrica. La disposición final se puede apreciar, de forma visual y esquemática, en la Figura 5.11.

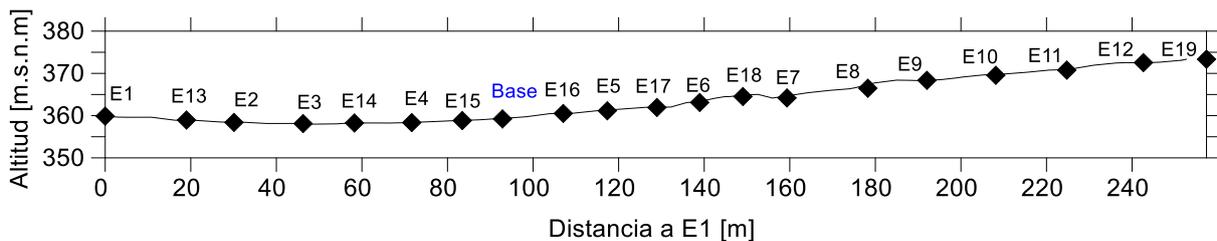


Figura 5.11. Perfil topográfico con la situación de las estaciones. Obsérvese que el espaciado final entre estaciones es menor o igual a 20 metros.

6 PROCESADO DE DATOS, DISCUSIÓN Y RESULTADOS

6.1 Análisis crítico de los datos brutos: selección de los datos a tratar

Las lecturas realizadas por el gravímetro CG-5 en la campaña de campo fueron almacenadas en su memoria interna. Para su tratamiento y procesado, se volcaron todos los datos a un ordenador mediante la conexión USB que incorpora el equipo. Se siguieron los pasos recomendados en Scintrex Ltd. (2012), empleando para ello el software SCTUTIL.

No se incluyen en este Trabajo los datos brutos obtenidos por su no operatividad en relación al espacio que ocupan (2248 medidas en la Jornada 1 y 248 en la Jornada 2). Sin embargo, se cree conveniente comentar los parámetros esenciales que aparecen tanto en la cabecera de los datos (Tabla 6.1) como la forma en que éstos vienen estructurados, columna por columna (Tabla 6.2).

Tabla 6.1. Descripción de los principales parámetros que aparecen en la cabecera de los datos descargados del CG-5.

Parámetro de la cabecera	Descripción
REF	Valor de referencia interno que utiliza el gravímetro para realizar las mediciones. En este caso (mediciones relativas) no interviene
GCAL1	Constante interna del aparato que se emplea para transformar las señales eléctricas en valores medidos en mGal.
Tempco	Constante para la corrección de las medidas por temperatura. Por diseño, el CG-5 está aislado casi completamente de variaciones térmicas.
Drift constant y Drift correction Start	Valores que se utilizan para la corrección automática de la deriva temporal en caso de que esté activada. En este caso sí lo está (Drift const. = 0,449 mGal/día) (Drift corr. start = 22/10/2015 17:33:16)
GMT Diff.	Diferencia horaria con el meridiano de Greenwich. Se emplea, por ejemplo, en la corrección automática por marea (ver apartado 3.2.1).

Tabla 6.2. Descripción de las distintas columnas de datos registrados en la memoria interna del CG-5.

Columna	Descripción
LINE	Se introduce la identificación de la línea a la que pertenece cada estación, en el caso de que se plantee una campaña basada en una malla. En este caso no se emplea.
STATION	Indica el número de estación en el que se está realizando la medida.
DUR	Duración seleccionada del ciclo de medida, en segundos. Como mínimo debe ser de 1 s.
GRAV	Lectura anotada por el aparato tras calcular la media para el ciclo de medida seleccionado (mGal).
SD	Desviación estándar de la media registrada en la fila correspondiente de GRAV (mGal)

Columna	Descripción
GMT Diff.	Diferencia horaria con el meridiano de Greenwich. Se emplea, por ejemplo, en la corrección automática por marea (ver apartado 3.2.1).
TILT X / TILT Y	Valores de la inclinación del aparato en el momento de la medida, en segundos de arco.
TEMP	Temperatura medida por el sensor (diferencia respecto a las condiciones normales de funcionamiento).
TIDE	Corrección automática por marea según la fórmula de Longman (1959) (mGal).
REJ	Número de valores rechazados al calcular la media en GRAV por encontrarse muy desviados de los valores comunes (por encima de 4 veces la desviación típica).
TIME	Hora a la que se realizó la lectura.
DATE	Fecha en la que se realizó la lectura.

Las medidas registradas tanto para la Jornada 1 como para la 2 incorporan la corrección automática por deriva lineal a largo plazo, así como la corrección automática por marea.

En primer lugar, se realizó un filtrado de estas medidas, para emplear en el procesado posterior sólo aquellas que presentan una mayor fiabilidad. Así, se emplearon 3 criterios:

- Criterio “DUR”: se eliminaron todas aquellas lecturas en las que no se cumplió el ciclo completo de medida (2 s).
- Criterio “REJ”: se eliminaron todas las lecturas con ruido, es decir, en las que se hubiese rechazado algún valor en el cálculo del promedio.
- Criterio “SD”: se eliminaron el 5% de las lecturas con una desviación típica más elevada (cálculo del percentil 95).

De esta manera, el número de medidas consideradas finalmente en el procesado se recogen en la Tabla 6.3. Como se puede apreciar, tanto para la Jornada 1 como para la 2, se emplearon en torno al 91% de las medidas brutas originales registradas.

Tabla 6.3. Medidas aceptadas y rechazadas según los criterios “DUR”, “REJ” y “SD” (Jornadas 1 y 2)

Jornada	Total medidas	Medidas rechazadas	Medidas aceptadas	% aceptadas	% rechazadas
Jornada 1	2468	214	2254	91,33%	8,67%
Jornada 2	248	22	226	91,13%	8,87%

El procesado debe iniciarse con la obtención de los promedios de aceleración gravitatoria para cada estación del perfil. Esto es, se parte de un número discreto de

mediciones en una misma estación (que son los promedios registrados por el gravímetro en cada ciclo de medida) y se debe obtener finalmente un único valor que represente el valor de g en ese punto.

Gettings (2009) propone para ello un método basado en una media ponderada, donde los pesos son el inverso de los cuadrados de las desviaciones estándar de cada lectura. Así, a cada punto del perfil le asigna un valor promedio y una desviación estándar.

Sin embargo, en este proyecto se ha seguido otra metodología igualmente válida, ya que:

- Se conoce que el promedio para cada estación es equivalente a la media del conjunto de lecturas realizadas en ésta. Es decir, el promedio buscado es la media de los valores que registra el gravímetro¹⁶.
- Se ha deducido una expresión (5.4) que permite determinar el error estándar estimado de la media muestral ($\hat{\sigma}_{\bar{x}}$) para datos agrupados, conociendo la media y la varianza muestral de cada grupo. En el apartado 5.3 esta expresión se empleó para conocer la evolución de $\hat{\sigma}_{\bar{x}}$ a medida que aumentaba el tiempo de permanencia en una estación. En este caso, el valor buscado es $\hat{\sigma}_{\bar{x}}$ para el tiempo total de estacionamiento. Por tanto, la expresión (5.4) evaluada para las N lecturas totales llevadas a cabo en cada estación arroja la desviación estándar final que debe asignarse (consultar apartado 9.1.1 para una mejor comprensión de lo aquí razonado).

De acuerdo con esta metodología, los valores para cada estación quedan según sigue (Tabla 6.4):

¹⁶ Esto sólo se cumple si los ciclos de medida en una misma estación tienen la misma duración (i.e. se toma un mismo número de muestras –las brutas a 6 Hz, consultar apartado 5.3– para calcular la media).

Tabla 6.4. Valores medios y errores estándar de la media para cada estación (Jornada 1 y Jornada 2).

Jornada 1			Jornada 2		
[1]	[2]	[3]	[4]	[5]	[6]
Estación¹⁷	Media	Desviación	Estación	Media	Desviación
(ID)	[mGal]	estándar de la	(ID)	[mGal]	estándar de la
		media			media
		[mGal]			[mGal]
2002 (1)	5197,159	0,004			
1	5196,713	0,004	2002 (1)	5197,175	0,018
2	5197,078	0,004	13	5196,962	0,027
3	5197,237	0,004	14	5197,261	0,025
4	5197,273	0,004	15	5197,220	0,022
2002 (2)	5197,144	0,004	2002 (2)	5197,166	0,023
5	5196,989	0,005	16	5197,073	0,022
6	5196,727	0,005	555	5196,996	0,022
7	5196,503	0,005	17	5196,863	0,025
8	5196,129	0,004	2002 (3)	5197,169	0,024
2002 (3)	5197,144	0,005	18	5196,624	0,021
9	5195,928	0,004	777	5196,520	0,021
10	5195,735	0,005	19	5195,284	0,021
11	5195,581	0,005	2002 (4)	5197,171	0,019
12	5195,375	0,004			
2002 (4)	5197,144	0,004			

Comparando los valores correspondientes a las desviaciones estándar de la media muestral para las estaciones de la Jornada 1 y la Jornada 2, se aprecia que los correspondientes a la Jornada 2 son, grosso modo, 5 veces superiores a los de la Jornada 1.

En efecto, haciendo una representación gráfica de la evolución de este parámetro para el tiempo de permanencia en cada estación (tal y como se hizo en el apartado 5.3 con objeto en ese caso de determinar el tiempo de estabilización), se aprecia que las mediciones realizadas en la Jornada 2 no llegan al nivel de precisión de las de la Jornada 1 (Figura 6.1).

¹⁷ Para distinguir entre sí las ocupaciones de la estación base (2002), se añade la aclaración (1), (2), (3) o (4).

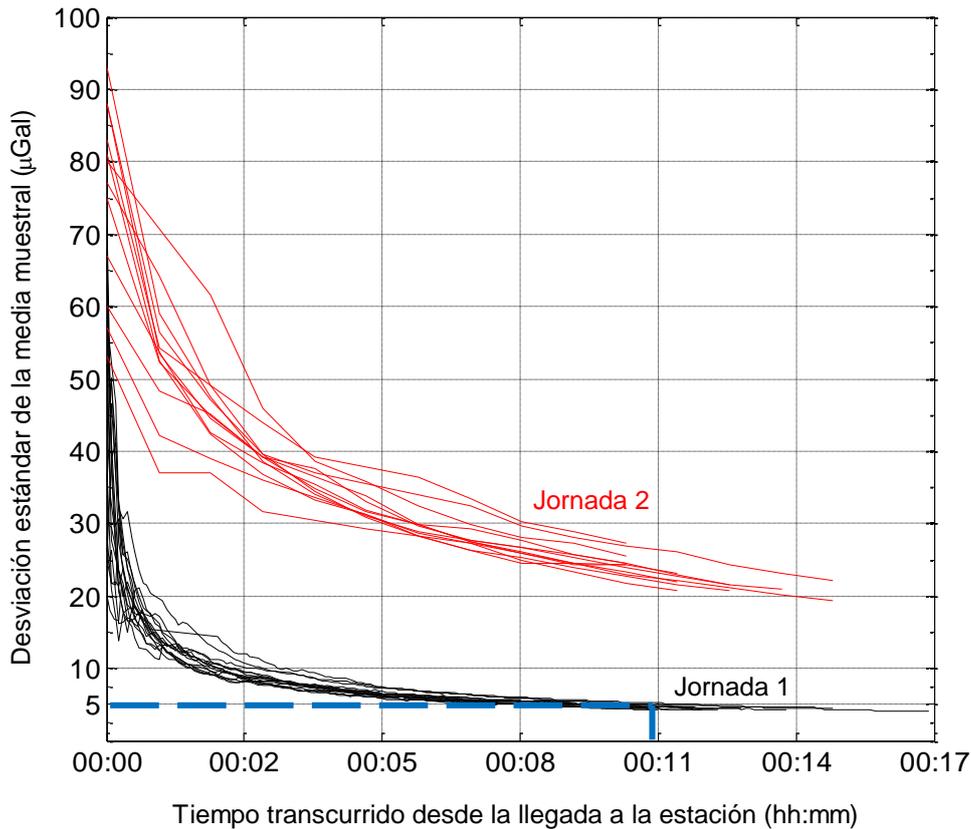


Figura 6.1. Evolución de la desviación estándar de la media muestral para las mediciones realizadas en cada estación: Jornada 1 (líneas negras) y Jornada 2 (líneas rojas). Obsérvese que la diferencia de precisión entre las dos jornadas hace desaconsejable su empleo conjunto sin antes deducir algún tipo de expresión que permita correlacionar las medidas, lo que se escapa a los propósitos de este Trabajo. Con línea a trazos azul se marca la precisión máxima del CG-5 (5 μ Gal).

Esta diferencia puede deberse a, entre otras causas, en la Jornada 2 no se consiguiese la horizontalidad completa del gravímetro durante su transporte.

Como las medidas de la Jornada 1 tienen una precisión excelente (el error está en torno a los 5 μ Gal, que es la precisión del CG-5), cubren suficientemente el perfil planteado a un lado y a otro de la traza supuesta de la falla, y se escaparía a los propósitos de este Trabajo la deducción de algún tipo de expresión que permitiese correlacionar las medidas de las dos jornadas, **se decidió prescindir de las medidas tomadas en la Jornada 2 en el procesado de datos y en la obtención de la curva gravimétrica final.**

De esta forma, la discusión en las secciones subsiguientes de este Trabajo se realizará en base a las medidas tomadas en la Jornada 1 (Tabla 6.4, columnas [1], [2] y [3]).

6.2 Correcciones

6.2.1 Correcciones temporales

En esta sección cabe hacer referencia a:

- Corrección por marea.
- Corrección por deriva instrumental a largo plazo.
- Corrección por deriva instrumental a corto plazo.

Las dos primeras ya se han aplicado automáticamente por el CG-5, y están incluidas en los valores recogidos en la Tabla 6.4 (columna [2])¹⁸.

Por tanto, sólo resta comentar la forma en la que se ha implementado la componente a corto plazo de la deriva instrumental.

El fundamento teórico ya se ha expuesto en el apartado 3.2.2, debiéndose emplear la expresión (3.4) para los cálculos.

En la Tabla 6.5 y la Tabla 6.6 se muestran los resultados parciales que se han obtenido para cada uno de los términos de (3.4), así como el valor de la corrección finalmente hallado (Δg_d).

Tabla 6.5. Determinación del tiempo transcurrido entre cada ocupación de las bases y de la tasa lineal de deriva a corto plazo en la expresión (3.4).

Ocupación de las bases			Tiempo transcurrido	Tasa lineal de deriva
			$t_e - t_b$ [min decimales]	$\frac{g_e - g_b}{t_e - t_b}$ [mGal/min]
Loop 1	2002 (1)	2002 (2)	109,55	$-1,39 \cdot 10^{-4}$
Loop 2	2002 (2)	2002 (3)	102,58	$-2,71 \cdot 10^{-6}$
Loop 3	2002 (3)	2002 (4)	103,95	$1,35 \cdot 10^{-6}$

¹⁸ Corrección por marea según la fórmula de Longman (1959). Corrección automática por deriva lineal con una tasa de 0,449 mGal/día.

Tabla 6.6. Determinación del tiempo transcurrido entre la medida registrada en cada estación y la ocupación inmediatamente anterior de la estación base, así como de la corrección por deriva a corto plazo.

Ocupación de cada estación con respecto a la base		Tiempo transcurrido $t - t_b$ [min decimales]	Corrección por deriva a corto plazo Δg_d [mGal]
2002 (1)	E1	12,98	-0,002
2002 (1)	E2	47,30	-0,007
2002 (1)	E3	68,18	-0,009
2002 (1)	E4	87,02	-0,012
2002 (2)	E5	17,35	-0,015
2002 (2)	E6	33,18	-0,015
2002 (2)	E7	55,48	-0,015
2002 (2)	E8	82,68	-0,015
2002 (3)	E9	18,87	-0,015
2002 (3)	E10	41,47	-0,015
2002 (3)	E11	61,25	-0,015
2002 (3)	E12	82,90	-0,015

Como se puede apreciar en la Tabla 6.6, la corrección por deriva lineal a corto plazo (Δg_d) es del orden de las decenas de microgal. Para obtener los valores para cada estación corregidos por este parámetro, sólo habría que sumar Δg_d a cada una de las estaciones (E1 a E12), asignando a la estación base el valor 0 por definición (Tabla 6.7).

Tabla 6.7. Valores previos a la corrección por deriva a corto plazo y tras aplicar la corrección [mGal]

Estación	Valores previos a la corrección por deriva a corto plazo [mGal]	Corregido por deriva a corto plazo [mGal]
1	5196,713	5196,711
2	5197,078	5197,071
3	5197,237	5197,228
4	5197,273	5197,261
2002	5197,159	5197,159
5	5196,989	5196,973
6	5196,727	5196,712
7	5196,503	5196,488
8	5196,129	5196,113
9	5195,928	5195,912
10	5195,735	5195,720
11	5195,581	5195,565
12	5195,375	5195,359

6.2.2 Corrección por aire libre

Para la corrección por aire libre, se aplica la expresión (3.6). Por ello, es necesario conocer con la suficiente precisión la cota a la que se ha llevado a cabo cada medición en el perfil.

Para ello, se ha tomado como base el modelo digital del terreno MDT5 del área de interés¹⁹ (hoja 29 del Mapa Topográfico Nacional). Con ayuda de la herramienta de interpolación *kriging* del software Surfer[®], se ha trazado un mapa topográfico a partir de los puntos de la malla del MDT5, y se han situado sobre el mismo las distintas estaciones²⁰ (Figura 6.2 y Figura 6.3). Surfer[®] permite de manera sencilla conocer la cota de las mismas mediante el comando *Digitize*.

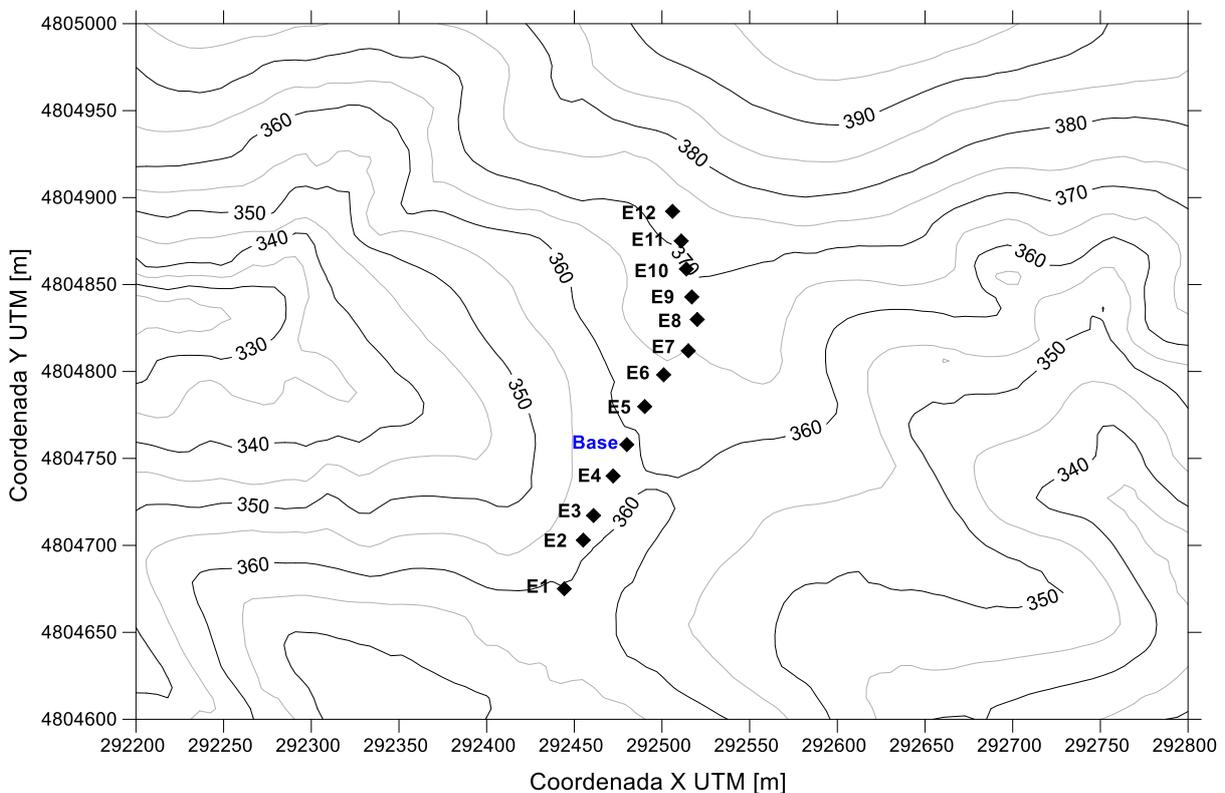


Figura 6.2. Mapa topográfico sobre el que se ha situado la posición de cada estación con el objeto de conocer su cota.

¹⁹ Modelo digital del terreno con paso de malla de 5 m, con la distribución oficial de hojas 1:25.000. Sistema geodésico de referencia ETRS89. Disponible en la web institucional del Instituto Geográfico Nacional (<http://www.ign.es/ign/layoutln/modeloDigitalTerreno.do>)

²⁰ Las coordenadas de cada estación se tomaron en la campaña de campo mediante un equipo GPS de mano.

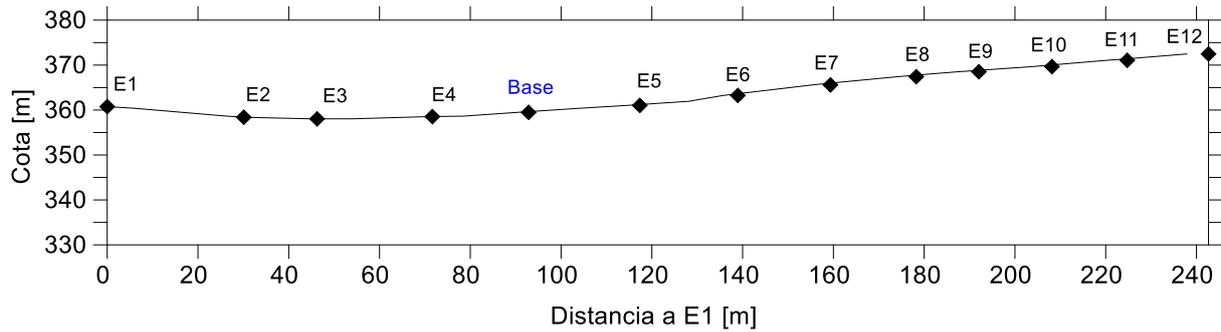


Figura 6.3. Perfil topográfico del conjunto de estaciones obtenido a partir del mapa de la Figura 6.4. mediante el software *Surfer*®.

En la Tabla 6.8 se recoge tanto el valor de las coordenadas UTM²¹ de cada una de las estaciones, como su cota, hallada siguiendo el procedimiento anteriormente referido. Asimismo, se incluye una columna donde se anotó la altura de la base del gravímetro sobre el suelo, de tal manera que se pueda referir las cotas de cada estación a un mismo punto de referencia. Se debe indicar que, para la precisión requerida en esta campaña (determinada por la anomalía objetivo), este último paso no sería necesario: la cota de cada punto ya ha sido determinada con un error del entorno o superior a la altura de estacionamiento. Sin embargo, como es el procedimiento que se debería seguir en otras campañas (microgravimetría, por ejemplo), ha decidido respetarse.

Tabla 6.8. Coordenadas UTM y cotas de cada estación [m]

Estación	X UTM [m]	Y UTM [m]	Cota [m]	Altura estacionamiento [m]	Cota corregida [m]
E1	292444	4804675	360,76	0,16	358,56
E2	292455	4804703	358,39	0,17	358,20
E3	292461	4804717	358,04	0,17	358,70
E4	292472	4804740	358,53	0,18	360,93
Base	292480	4804758	359,48	0,17	359,64
E5	292490	4804780	361,02	0,17	361,19
E6	292501	4804798	363,24	0,17	363,41
E7	292515	4804812	365,59	0,18	365,77
E8	292520	4804830	367,42	0,19	367,60
E9	292517	4804843	368,52	0,17	368,68
E10	292514	4804859	369,66	0,15	369,81
E11	292511	4804875	371,06	0,16	371,21
E12	292506	4804892	372,48	0,17	372,64

²¹ Según el sistema geodésico de referencia ETRS89.

La última columna de la Tabla 6.8 incluye los valores de Δh a emplear en la ecuación (3.6) para obtener la corrección por aire libre.

En la Figura 6.5 se recoge una comparativa entre la curva gravimétrica obtenida al representar los valores para cada estación corregidas las derivas temporales (última columna de la Tabla 6.7) y la misma curva una vez incorporadas las correcciones por aire libre. Como se observa, su morfología es bastante distinta.

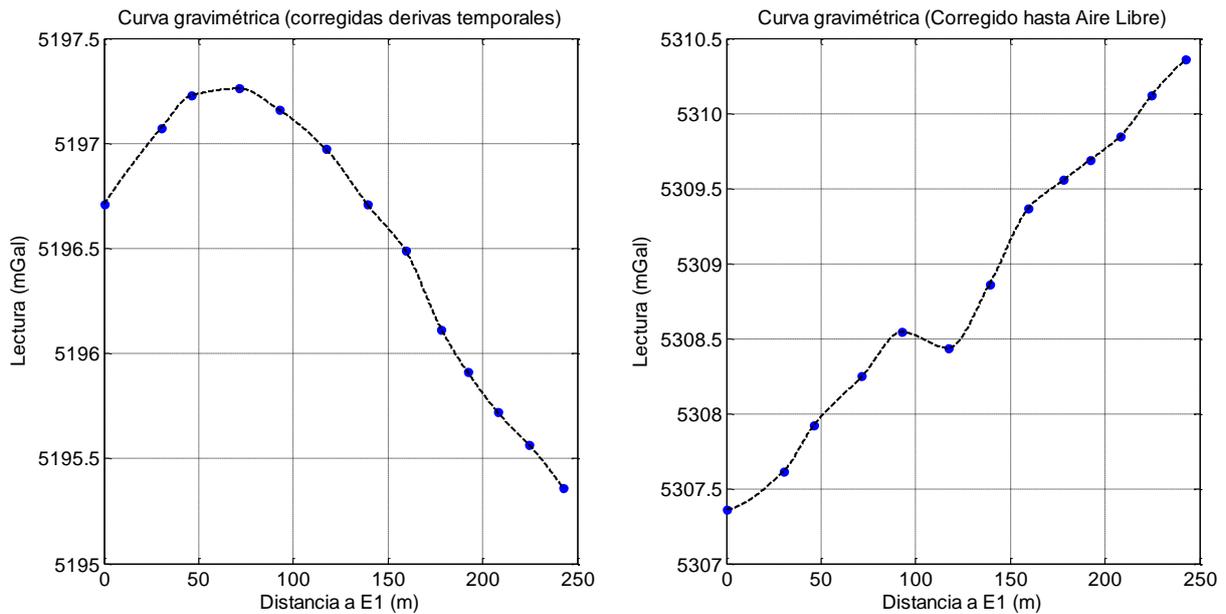


Figura 6.5. Curvas gravimétricas: corregidas las derivas temporales (izquierda) y corregido hasta aire libre (derecha).

6.2.3 Corrección por latitud

En la corrección por latitud, se determina el valor de la aceleración gravitatoria normal para cada estación según la expresión (3.8), y se calculan los remanentes con respecto al valor que toma este parámetro en la estación base (consultar apartado 3.3.2).

Los resultados obtenidos se recogen en la Tabla 6.9 y en la Figura 6.6.

Tabla 6.9. Latitud de cada estación, gravedad normal, corrección por latitud y valor final tras aplicar dicha corrección.

Estación	Latitud ²² [°]	Latitud [rad]	g_n [mGal]	Corrección por latitud [mGal]	Corregido por latitud [mGal]
E1	43,365472	0,756870	980461,005	-0,068	5307,294
E2	43,365727	0,756875	980461,028	-0,045	5307,568
E3	43,365856	0,756877	980461,040	-0,033	5307,889
E4	43,366064	0,756881	980461,058	-0,015	5308,232
Base	43,366228	0,756883	980461,073	0,000	5308,543
E5	43,366428	0,756887	980461,091	0,018	5308,455
E6	43,366595	0,756890	980461,106	0,033	5308,892
E7	43,366723	0,756892	980461,117	0,044	5309,408
E8	43,366887	0,756895	980461,132	0,059	5309,614
E9	43,367002	0,756897	980461,142	0,069	5309,757
E10	43,367146	0,756899	980461,155	0,082	5309,927
E11	43,367290	0,756902	980461,168	0,095	5310,217
E12	43,367442	0,756905	980461,182	0,109	5310,466

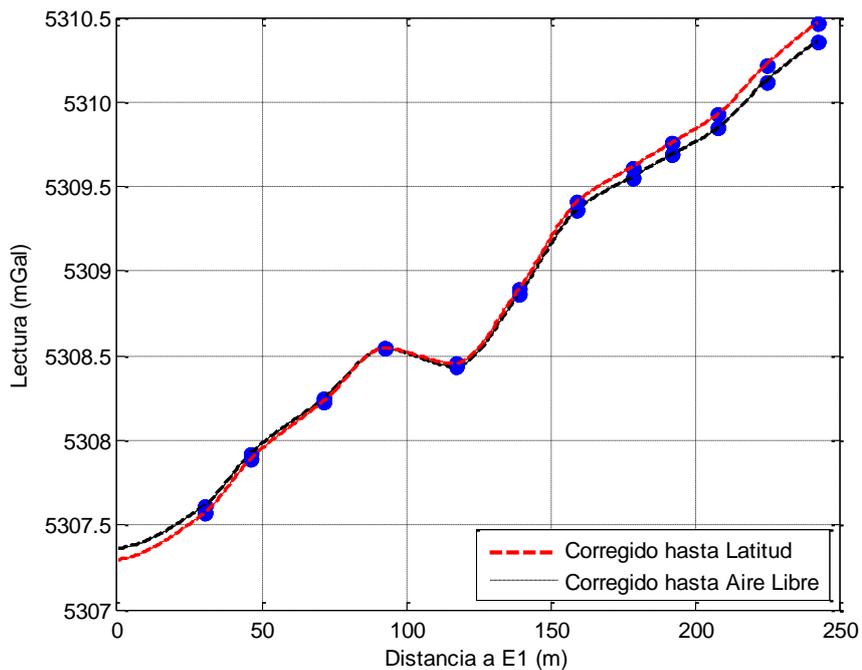


Figura 6.6. Curvas gravimétricas: corregido hasta latitud (rojo) frente a la curva previa (negro).

²² La latitud se ha calculado tomando como base las coordenadas UTM de cada estación (Tabla 6.8), a partir de la hoja de cálculo implementada a tal efecto por la Federación Andaluza de Colombofilia (www.fedcolandaluza.com/utilidades/convertidor.xls).

6.2.4 Corrección de Bouguer

La expresión (3.9), aplicada a la medición realizada en cada punto del perfil, permite conocer la corrección de Bouguer correspondiente.

Como paso previo, resta únicamente asignar una densidad de reducción con la que realizar los cálculos. En este caso, al entrar en contacto dos materiales distintos a cada lado de la falla (conglomerados de la Fm. Pola de Siero y calizas arenosas de la Fm. La Manjosa, consultar para más detalles el apartado 5.1), se debe tomar una densidad media representativa de los mismos.

En la bibliografía consultada, no se han encontrado valores de medidas directas de densidad a partir de muestras de campo en ninguna de estas formaciones. Evers (1967) obtuvo una densidad media para materiales del Cretácico en su estudio del borde septentrional de la Cuenca del Duero de 2,46 g/cm³. Como las Fms. Pola de Siero y La Manjosa pertenecen a este período, cabría esperar una densidad del mismo orden.

Telford et al. (1990) establece una densidad media para las calizas de 2,55 g/cm³, y de 2,35 g/cm³ para las areniscas; así como un valor medio de 2,5 g/cm³ para las rocas sedimentarias. No recoge valores para los conglomerados, pero en cualquier caso debe ser superior a la de calizas y areniscas por la propia naturaleza de la roca.

Por tanto, puede considerarse una densidad de 2,6 g/cm³ para la Fm. Pola de Siero (conglomerados) y de 2,5 g/cm³ para la Fm. La Manjosa (calizas arenosas). Así, para la corrección de Bouguer se ha asignado un valor medio de 2,55 g/cm³.

Teniendo en cuenta todo lo anterior, al aplicar la expresión (3.9) se obtienen los resultados de la Tabla 6.10 y la Figura 6.7 (derecha).

Tabla 6.10. Valores empleados en la expresión (3.9), así como la corrección obtenida.

Estación	Cota (z) [m]	Corrección de Bouguer [mGal]	Corregido hasta Bouguer [mGal]
E1	358,56	38,337	5268,957
E2	358,2	38,300	5269,268
E3	358,7	38,353	5269,536
E4	360,93	38,454	5269,778
Base	359,64	38,591	5269,952
E5	361,19	38,619	5269,836
E6	363,41	38,856	5270,036
E7	365,77	39,108	5270,300

Estación	Cota (z) [m]	Corrección de Bouguer [mGal]	Corregido hasta Bouguer [mGal]
E8	367,6	39,305	5270,310
E9	368,68	39,420	5270,337
E10	369,81	39,541	5270,386
E11	371,21	39,691	5270,527
E12	372,64	39,844	5270,622

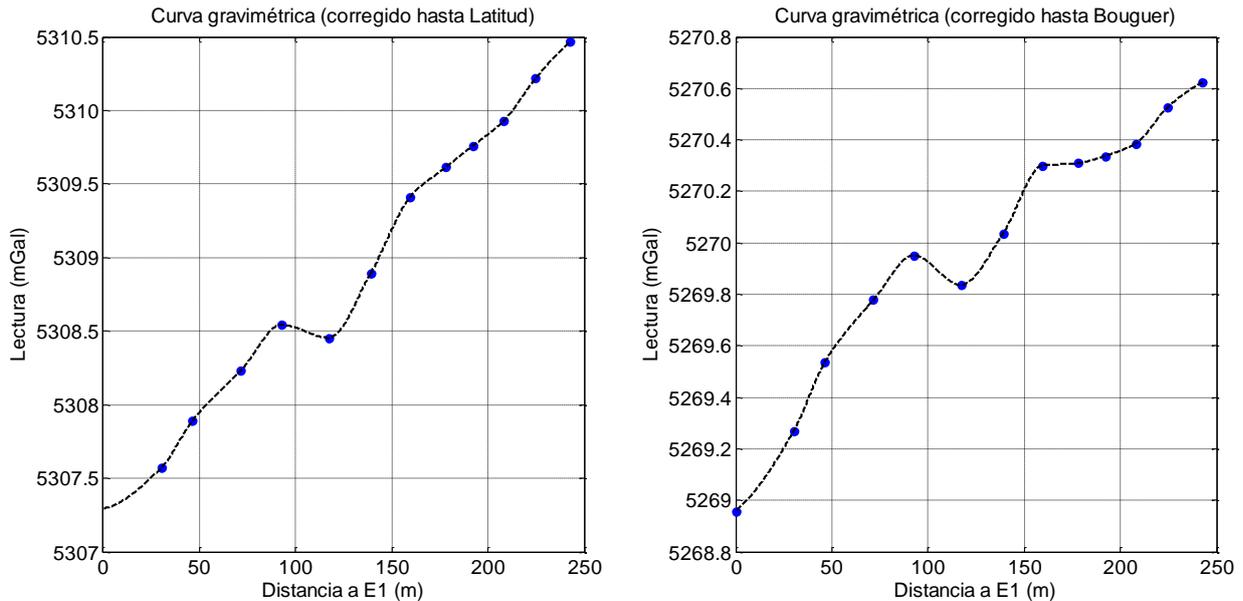


Figura 6.7. Comparativa entre curvas gravimétricas: corregido hasta latitud (izquierda) y corregido hasta Bouguer (derecha).

6.2.5 Corrección por terreno

De acuerdo con lo establecido en el apartado 3.3.4, la corrección por terreno se calcula en base al método propuesto por Hammer (1939). Las ecuaciones a seguir son la (3.10) y la (3.11).

Por ello, el parámetro a determinar en primer lugar es la cota media de cada zona de Hammer, para hallar su diferencia con respecto a la cota del punto de estacionamiento. El procedimiento seguido consistió en situar la plantilla de Hammer sobre el mapa topográfico de la zona, y determinar la cota media en función de las líneas de nivel presentes en cada sector de la plantilla (Figura 6.8). Los valores registrados se recogen en una serie de tablas en el apartado ANEXOS (páginas 79 a 81).

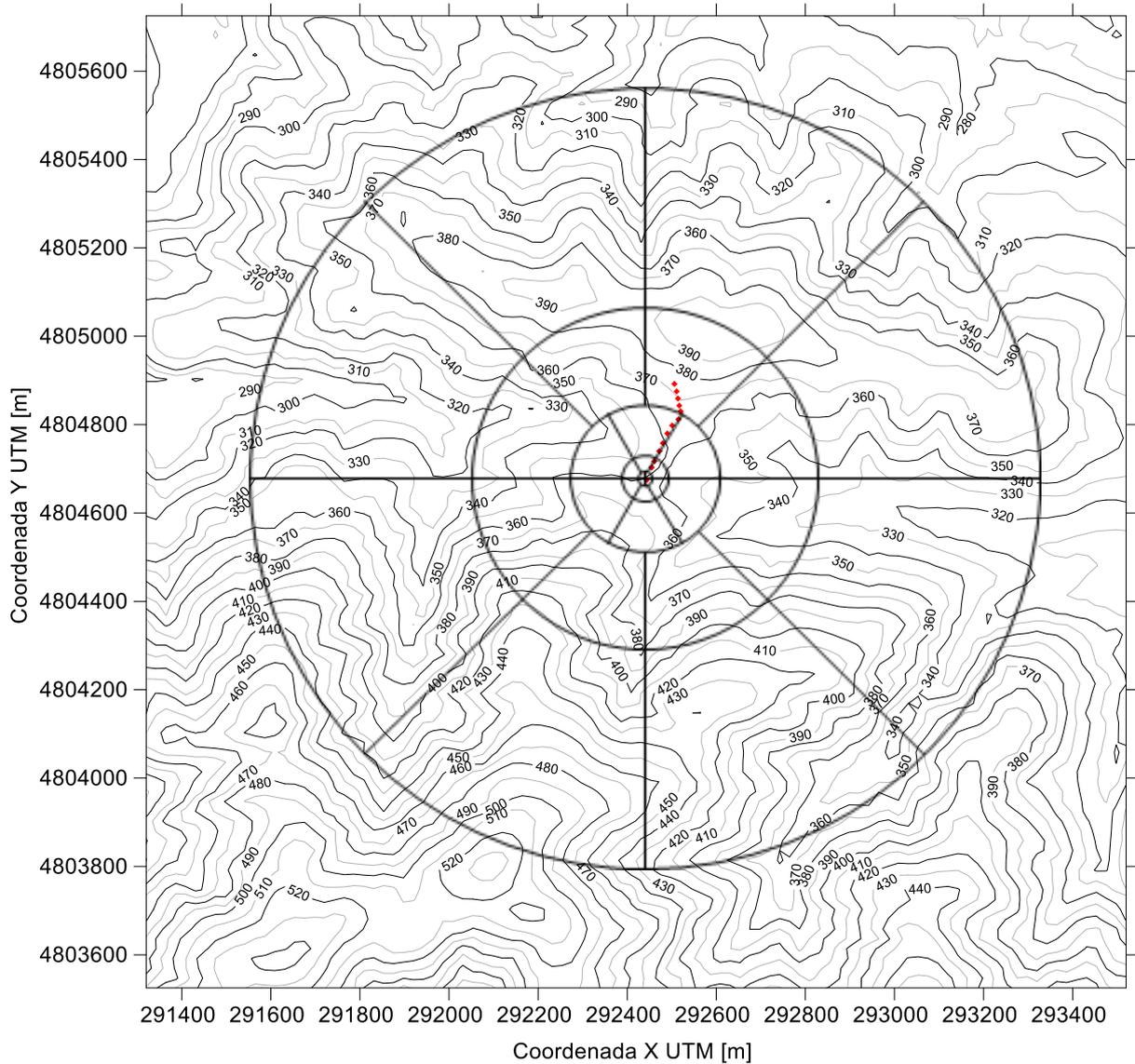


Figura 6.8. Plantilla de Hammer (zonas B a F) situada sobre el mapa topográfico de la zona para estimar la cota media de cada sector. Los puntos en rojo representan las distintas estaciones del perfil. En este caso, la plantilla se encuentra situada sobre E1.

Una vez conocida la cota media en cada sector, y en consecuencia, su diferencia con respecto a la cota de cada estación, sólo resta aplicar las ecuaciones (3.10) y (3.11) para cada sector y estación. Las correcciones parciales obtenidas se adjuntan también en el apartado ANEXOS (páginas 82 a 84).

Asimismo, en la Tabla 6.11 se recogen las correcciones para cada zona o anillo rodeando a cada estación, así como la corrección final a aplicar a cada punto del perfil para conseguir así la curva gravimétrica final.

El resultado de aplicar las correcciones por terreno a las medidas corregidas hasta Bouguer (Tabla 6.10, cuarta columna) se puede apreciar comparativamente en la Figura 6.9.

Tabla 6.11. Correcciones por terreno [mGal] para cada estación. Se puede observar la contribución de cada zona de la plantilla de Hammer (B a F) a la corrección final²³

Zona/ Estación	Base	E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8	E9	E10	E11	E12
B	0,072	0,101	0,025	0,027	0,038	0,006	0,018	0,010	0,004	0,021	0,032	0,025	0,025
C	0,030	0,023	0,026	0,024	0,025	0,035	0,019	0,014	0,012	0,022	0,023	0,035	0,055
D	0,047	0,059	0,050	0,035	0,035	0,038	0,056	0,073	0,094	0,105	0,121	0,134	0,119
E	0,052	0,090	0,071	0,077	0,066	0,067	0,046	0,051	0,041	0,053	0,060	0,053	0,060
F	0,102	0,137	0,113	0,108	0,130	0,133	0,129	0,140	0,151	0,158	0,149	0,171	0,166
TOTAL	0,302	0,411	0,284	0,271	0,295	0,279	0,269	0,289	0,301	0,359	0,385	0,417	0,424

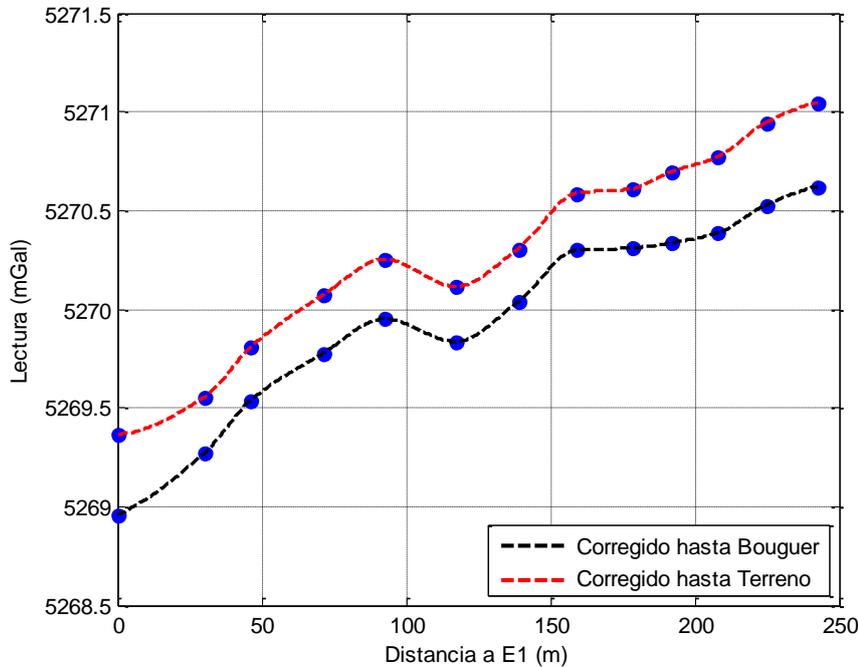


Figura 6.9. Comparativa de la curva gravimétrica de Bouguer (línea a trazos negra) con respecto a la misma curva con las correcciones por terreno añadidas (línea a trazos roja).

²³ A la zona A (radio de 2 m) se le ha asignado la misma cota que la estación correspondiente, por lo que la corrección a realizar en esta zona es nula.

6.3 Curva gravimétrica experimental obtenida

Tras la ejecución de todas las correcciones a las medidas en bruto tomadas en el perfil planteado en El Solanu (Asturias, España), se ha obtenido la curva gravimétrica de la Figura 6.10. En ella se representa la variación de la aceleración gravitatoria con respecto a un valor medio entre el máximo y mínimo de la Figura 6.9 (línea a trazos roja)

Se puede observar que los valores de aceleración gravitatoria terrestre sufren una discontinuidad clara en el tramo del perfil situado entre los 100 y 150 m de la estación 1, aproximadamente. Dicha discontinuidad es la indicativa de la presencia de la Falla de Ventaniella en esta zona.

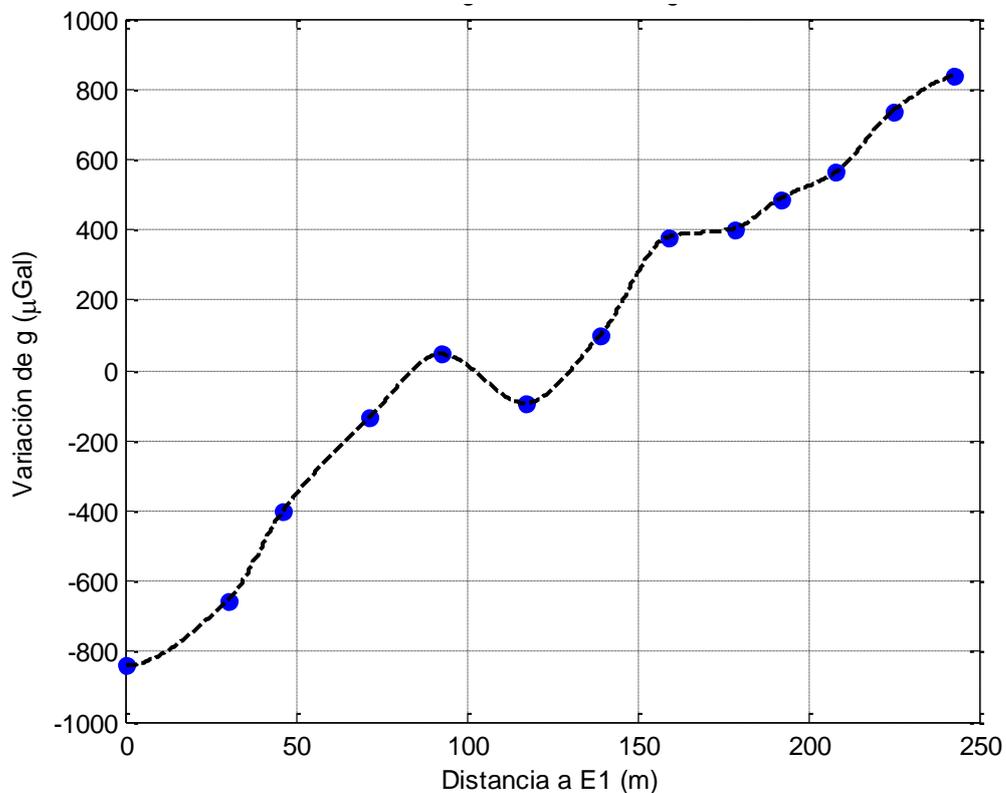


Figura 6.10. Curva experimental obtenida tras realizar todas las correcciones. Se observa un salto claro en los valores de aceleración gravitatoria entre los 100 y los 150 m de la estación 1, indicativo de la presencia de la Falla de Ventaniella en esta zona.

7 CONCLUSIONES

Tras la ejecución de la secuencia ordenada de pasos que permiten, a partir de un conjunto de mediciones tomadas con un gravímetro relativo, obtener un perfil gravimétrico en el que se ha eliminado cualquier influencia externa (temporal o no), se pueden extraer las siguientes conclusiones (Figura 6.10):

- Se ha identificado una anomalía gravimétrica en el perfil planteado (El Solanu, Asturias).
- La discontinuidad se produce a una distancia de la estación 1 de entre 100 y 150 m, y es de unos 500 μGal . Se trata de una discontinuidad del rango esperado para una falla.
- Esta zona donde se aprecia la anomalía coincide esencialmente con la traza de la Falla de Ventaniella realizada por Beroiz et al. (1973). Por tanto, la causa de la anomalía detectada en la aceleración gravitatoria debe ser, necesariamente, la propia falla.
- La forma de la curva gravimétrica se asemeja a la respuesta teórica aceptable en casos similares con estructuras falladas próximas a la superficie (Telford et al., 1990).

Por tanto, se puede concluir que la aplicación metodológica y didáctica de los principios de la prospección gravimétrica llevada a cabo en el presente Trabajo, permite identificar sin problema la presencia de estructuras falladas. Cualquier interpretación posterior en detalle de las características de los materiales que la falla pone en contacto, así como un conocimiento más profundo de la geología del subsuelo en la zona del perfil gravimétrico ejecutado, necesitaría de un tratamiento más avanzado de los resultados obtenidos en este Trabajo, empleando para ello programas de simulación computacional.

8 REFERENCIAS

Alonso, J. L., Pulgar, J. A. y Pedreira, D. (2007). El relieve de la Cordillera Cantábrica. *Enseñanza de las Ciencias de la Tierra*, 15(2), 151-163.

Barbosa, V. C. F., Menezes, P. T. L. y Silva, J. B. C. (2005). *In Depth Enhancement of Subtle Basement Faults Using Gravity Data In Almada Basin, Brazil*. Society of Exploration Geophysicists.

Barbosa, V. C. F., Menezes, P. T. L. y Silva, J. B. C. (2007). Gravity data as a tool for detecting faults: In-depth enhancement of subtle Almada's basement faults, Brazil. *Geophysics*, 72(3), B59-B68.

Bastida, F. y Aramburu, C. (1995). *Geología de Asturias*. Gijón: Ediciones Trea.

Beroiz, C., Pignatelli, R., Baron, A., Coma, J., Felgueroso, C., Ramírez del Pozo, J., . . . Gervilla, M. (1973). Mapa Geológico de España a escala 1: 50.000. Hoja 29, Oviedo.

Bonvalot, S., Diament, M. y Gabalda, G. (1998). Continuous gravity recording with Scintrex CG-3M meters: a promising tool for monitoring active zones. *Geophysical Journal International*, 135(2), 470-494.

Burger, H. R. (1992). *Exploration geophysics of the shallow subsurface*. Prentice Hall.

Cella, F. (2015). GTeC—A versatile MATLAB® tool for a detailed computation of the terrain correction and Bouguer gravity anomalies. *Computers & Geosciences*, 84, 72-85. doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.cageo.2015.07.015>

Colorado School of Mines y Imperial College London. (2013). *Geophysical Investigation of the Pagosa Springs Geothermal System - Upper San Juan Basin, Archuleta County, Colorado*.

Evers, H. J. (1967). Geology of the Leonides Between the Bernesga and Porma Rivers, Cantabrian Mountains, NW Spain. *Leidse Geologische Mededelingen*, 41, 83-151.

Fernández-Viejo, G., Olona, J., López-Fernández, C. y Llana-Fúnez, S. (2016). *Characterization of the Ventaniella fault from top to bottom through a multidisciplinary geophysical study*. Ponencia presentada en la 17ª International Seismix Symposium, Aviemore, Escocia:

Gettings, P. (2009). *High Precision Gravity Measurements: Techniques, Software, & Algorithms*.

González Fernández, B., Menéndez Casares, E., Gutiérrez Claverol, M. y García-Ramos, J. (2004). Litoestratigrafía del sector occidental de la cuenca cretácica de Asturias. *Trabajos de Geología*, 24, 43-80.

González-Quirós, A. (2015). Study of the gravity anomaly produced by a pumping test in an unconfined aquifer: coupled modelling and survey optimization. *Mathematical Geosciences Student Award 2014*,

Hammer, S. (1939). Terrain corrections for gravimeter stations. *Geophysics*, (3), 184. doi:<http://10.1190/1.1440495>

Hugill, A. (1990). The Scintrex CG-3 Autograv Automated Gravity Meter, Description and Field Results. Ponencia presentada en *SEG Conference, San Francisco*.

Julivert, M. (1960). Estudio geológico de la cuenca de Beleño (valles altos del Sella, Ponga, Nalón y Esla). *Boletín del Instituto Geológico y Minero de España*, 71, 1-346.

Liard, J., Gagnon, C., Hearty, D., Salib, P. y Flint, T. (1993). Evaluation of the Scintrex CG-3 gravity meter. *Geological Survey of Canada, open file*, 2696.

Lien, T., Cheng, C., Hwang, C. y Crossley, D. (2014). Assessing active faulting by hydrogeological modeling and superconducting gravimetry: A case study for Hsinchu Fault, Taiwan. *Journal of Geophysical Research-Solid Earth*, 119(9), 7319-7335. doi:10.1002/2014JB011285

Longman, I. M. (1959). Formulas for computing the tidal accelerations due to the moon and the sun. *Journal of Geophysical Research*, 64(12), 2351-2355. doi:10.1029/JZ064i012p02351

López-Fernández, C. (2007). *Actividad sísmica, zonación sismotectónica y peligrosidad sísmica en el noroeste de la Península Ibérica*. Tesis doctoral, 248 pp.

López-Fernández, C., Pulgar, J., Gallart, J., González-Cortina, J., Díaz, J. y Ruiz, M. (2002). Actividad sísmica reciente en el noroeste de la Península Ibérica. Ponencia presentada en la *3ª Asamblea Hispano-Portuguesa de Geodesia y Geofísica*.

López-Fernández, C., Pulgar, J., Gallart, J., González-Cortina, J., Díaz, J. y Ruiz, M. (2004). Actividad sísmica en el noroeste de la Península Ibérica observada por la red sísmica local del Proyecto GASPI (1999-2002). *Trabajos de geología*, 24(24), 91-107.

Merlet, S., Kopaev, A., Diament, M., Geneves, G., Landragin, A. y Dos Santos, F. P. (2008). Micro-gravity investigations for the LNE watt balance project. *Metrologia*, 45(3), 265. doi:<http://dx.doi.org/10.1088/0026-1394/45/3/002>

Milsom, J. (2003). *Field geophysics*. John Wiley and Sons.

Miranda, S., Herrada, A. y Pacino, M. C. (2013). Respuesta instrumental del gravímetro Scintrex Autograv CG-5 (s/n 40484) en modos continuo y relevamiento. *Geoacta*, 38(1), 1-14.

Montgomery, D. y Runger, G. (1996). *Probabilidad y estadística aplicadas a la ingeniería* (E. G. Urbina Medal, trad.). (1ª ed.). México: McGraw-Hill.

Niebauer, T. (2015). En Schubert G. (Ed.), *3.03 - Gravimetric Methods – Absolute and Relative Gravity Meter: Instruments Concepts and Implementation*, pp. 37-57. Oxford: Elsevier. doi:<http://dx.doi.org/10.1016/B978-0-444-53802-4.00057-9>

Niimorgeofizika-Group. (2009). *Gravimetric Surveys Photo Gallery*. Recuperado el 27/05/2016, de <http://www.niimorgeofizika-group.com/en/niims/plosh.html>

Nishijima, J. y Naritomi, K. (2015). Interpretation of gravity data to delineate underground structure in the Beppu geothermal field, central Kyushu, Japan. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.ejrh.2015.11.022>

Nowell, D. A. G. (1999). Gravity terrain corrections — an overview. *Journal of Applied Geophysics*, 42(2), 117-134. doi:[http://dx.doi.org/10.1016/S0926-9851\(99\)00028-2](http://dx.doi.org/10.1016/S0926-9851(99)00028-2)

Reudink, R., Klees, R., Francis, O., Kusche, J., Schlesinger, R., Shabanloui, A., . . . Timmen, L. (2014). High tilt susceptibility of the Scintrex CG-5 relative gravimeters. *Journal of Geodesy*, 88(6), 617-622. doi:10.1007/s00190-014-0705-0

Richarte, J. M., Peláez, J. A., Sánchez Gómez, M. y Gil, A. J. (2007). Prospección gravimétrica en la terminación norte del frente montañoso de las Béticas. *Iniciación a la investigación, Universidad de Jaén*, 2(a2)

Saibi, H., Nishijima, J. y Ehara, S. (2006). Processing and Interpretation of Gravity Data for the Shimabara Peninsula Area, Southwestern Japan. *Memoirs of the Faculty of Engineering, Kyushu University*, 66(2)

Scintrex Ltd. (2012). *CG-5 Scintrex Autograv system operation manual, part I # 867700 revision 8* *CG-5 Scintrex Autograv system operation manual, part I # 867700 revision 8*. Concord: Scintrex Limited.

Seigel, H. O. (1995). En Scintrex Ltd. (Ed.), *A guide to high precision land gravimeter surveys*. Concord, Ontario:

Telford, W. M., Geldart, L. P. y Sheriff, R. E. (1990). *Applied geophysics* (2ª ed.) Cambridge University Press.

Tsuboi, C. (1979). *Gravity*. London: George Allen & Unwin.

Van Camp, M. y Vauterin, P. (2005). Tsoft: graphical and interactive software for the analysis of time series and Earth tides. *Computers & Geosciences*, 31(5), 631-640. doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.cageo.2004.11.015>

Van Der Hilst, R. (2004). *12.201 Essentials of Geophysics, Fall 2004. (Massachusetts Institute of Technology: MIT OpenCourseWare)*. Recuperado el 30/05/2016, de <http://ocw.mit.edu>

Yushkin, V. (2011). Operating experience with CG5 gravimeters. *Measurement Techniques*, 54(5), 486-489.

9 ANEXOS

9.1 Desviación estándar de la media muestral para datos agrupados, conocidas la varianza muestral y la media de cada grupo

9.1.1 Deducción

En la Tabla 9.2 se recoge un extracto de las medias y los errores estándar estimados de dichas medias para cada ciclo de medida del gravímetro (6 muestras por segundo durante 2 segundos, 12 muestras). Se pretende obtener una expresión que relacione estos valores con la evolución del error estándar estimado de la media muestral ($\hat{\sigma}_{\bar{x}}$) a medida que se aumenta el tamaño de muestra.

Las expresiones de partida son la (5.1), la (5.2) y la (5.3). Se plantea una deducción de $\hat{\sigma}_{\bar{x}}$ a partir de los datos de dos ciclos de medida (en el caso descrito en el apartado 5.3, equivale a pasar de 12 a 24 muestras), y generalizándola para k ciclos de medida.

La expresión buscada debe quedar en función de los parámetros conocidos \bar{x}_1 , s_1 , \bar{x}_2 , s_2 , n_1 y n_2 (Tabla 9.1).

Tabla 9.1. Parámetros conocidos para la deducción a realizar.

Ciclo	Parámetros conocidos
Ciclo 1	\bar{x}_1 ; $\hat{\sigma}_{\bar{x}_1} = s_1 \cdot \sqrt{n_1}$
Ciclo 2	\bar{x}_2 ; $\hat{\sigma}_{\bar{x}_2} = s_2 \cdot \sqrt{n_2}$
Ciclo i	\bar{x}_i ; $\hat{\sigma}_{\bar{x}_i} = s_i \cdot \sqrt{n_i}$

La ecuación (5.2) puede expresarse de otra forma, conocida en ocasiones como el método abreviado para el cálculo de s^2 (Montgomery y Runger, 1996):

$$s^2 = \frac{\sum_{i=1}^n \bar{x}_i^2 - \frac{(\sum_{i=1}^n \bar{x}_i)^2}{n}}{n-1} \quad (9.1)$$

Particularizando la expresión (9.1) para los ciclos 1 y 2, y teniendo en cuenta la definición de media muestral (5.1), se tiene:

$$s_1^2 = \frac{\sum_{i=1}^{n_1} \bar{x}_i^2 - \frac{(\sum_{i=1}^{n_1} \bar{x}_i)^2}{n_1}}{n_1-1} = \frac{\sum_{i=1}^{n_1} \bar{x}_i^2 - \frac{(n_1 \cdot \bar{x}_1)^2}{n_1}}{n_1-1}$$

$$s_2^2 = \frac{\sum_{i=1}^{n_2} \bar{x}_i^2 - \frac{(\sum_{i=1}^{n_2} \bar{x}_i)^2}{n_1}}{n_2 - 1} = \frac{\sum_{i=1}^{n_2} \bar{x}_i^2 - \frac{(n_2 \cdot \bar{x}_2)^2}{n_2}}{n_2 - 1}$$

De donde:

$$\sum_{i=1}^{n_1} \bar{x}_i^2 = s_1^2 \cdot (n_1 - 1) + n_1 \cdot \bar{x}_1^2 \quad (9.2)$$

$$\sum_{i=1}^{n_2} \bar{x}_i^2 = s_2^2 \cdot (n_2 - 1) + n_2 \cdot \bar{x}_2^2 \quad (9.3)$$

Si se unen las mediciones de los 2 primeros ciclos (1+2), la expresión (9.1) queda:

$$s_{1+2}^2 = \frac{\sum_{i=1}^{n_1+n_2} \bar{x}_i^2 - \frac{(\sum_{i=1}^{n_1+n_2} \bar{x}_i)^2}{n_1 + n_2}}{n_1 + n_2 - 1} = \frac{\sum_{i=1}^{n_1} \bar{x}_i^2 + \sum_{i=1}^{n_2} \bar{x}_i^2 - \frac{(\sum_{i=1}^{n_1} \bar{x}_i + \sum_{i=1}^{n_2} \bar{x}_i)^2}{n_1 + n_2}}{n_1 + n_2 - 1} \quad (9.4)$$

Sustituyendo las ecuaciones (9.2) y (9.3) en (9.4), y teniendo en cuenta la definiciones de media muestral (5.1) y error estándar de la media muestral (5.3), se tiene:

$$\hat{\sigma}_{1+2}^2 \cdot (n_1 + n_2) = \frac{s_1^2 \cdot (n_1 - 1) + n_1 \cdot \bar{x}_1^2 + s_2^2 \cdot (n_2 - 1) + n_2 \cdot \bar{x}_2^2 - \frac{(n_1 \cdot \bar{x}_1 + n_2 \cdot \bar{x}_2)^2}{n_1 + n_2}}{n_1 + n_2 - 1} \quad (9.5)$$

El tamaño de la muestra para cada ciclo de medida es idéntico. Por tanto:

$$n_1 = n_2 = n$$

Y la ecuación (9.5) puede simplificarse:

$$\hat{\sigma}_{1+2}^2 \cdot 2n = \frac{(n - 1) \cdot (s_1^2 + s_2^2) + n \cdot (\bar{x}_1^2 + \bar{x}_2^2) - \frac{(n \cdot (\bar{x}_1 + \bar{x}_2))^2}{2n}}{2n - 1}$$

O lo que es lo mismo:

$$\hat{\sigma}_{1+2} = \sqrt{\frac{(n-1) \cdot (s_1^2 + s_2^2) + n \cdot (\bar{x}_1^2 + \bar{x}_2^2) - \frac{n}{2} (\bar{x}_1 + \bar{x}_2)^2}{2n \cdot (2n - 1)}} \quad (9.6)$$

En la ecuación (9.6) se puede observar una tendencia clara. Así, por ejemplo, si se uniesen las mediciones de 3 ciclos, la desviación estándar de la media muestral para las $3n$ muestras sería:

$$\hat{\sigma}_{1+2+3} = \sqrt{\frac{(n-1) \cdot (s_1^2 + s_2^2 + s_3^2) + n \cdot (\bar{x}_1^2 + \bar{x}_2^2 + \bar{x}_3^2) - \frac{n}{3} (\bar{x}_1 + \bar{x}_2 + \bar{x}_3)^2}{3n \cdot (3n - 1)}}$$

Por lo que para k sumas de ciclos, se tendría la expresión (9.7), equivalente a la (5.4):

$$\hat{\sigma}_k = \sqrt{\frac{(n-1) \cdot \sum_{i=1}^k s_i^2 + n \cdot \sum_{i=1}^k \bar{x}_i^2 - \frac{n}{k} \cdot (\sum_{i=1}^k \bar{x}_i)^2}{k \cdot n \cdot (k \cdot n - 1)}}; \quad k = 2, 3, \dots, N \quad (9.7)$$

Donde:

n es el tamaño muestral de cada ciclo.

k es el número de pares de datos (\bar{x}_i, s_i) empleados para el cálculo del error estándar de la media muestral $\hat{\sigma}_k$. Varía entre 2 y N , que es el total de pares de datos (\bar{x}_i, s_i) que se tengan en cada caso (total de ciclos).

9.1.2 Código de MATLAB®

```
% evolucion_desvest_media_estabilizacion.m es un script de MATLAB que
% permite determinar la evolución del error estándar de la media muestral
% a medida que se toman más muestras para su cálculo. En los datos de
partida
% no se tiene acceso a las muestras individuales, sino a medias y errores
% estándar de distintos grupos de muestras aleatorios y del mismo tamaño.

% Se aplica al caso particular en el que se pretende determinar la
% evolución de este parámetro a medida que aumenta el tiempo de
% estacionamiento en un mismo punto de medida (mayor número de muestras)
% para una campaña de gravimetría. Por tanto, se trabaja con promedios
% de aceleración gravitatoria.

% Medidas_estabilizacion_2s.txt es el archivo de texto donde se incluyen
% los datos de partida:
% 1ª columna: promedio de las distintas muestras para el ciclo de medida
% seleccionado.
% 2ª columna: error estándar del promedio de dichas muestras.
```

```
% 3ª columna: tiempo de permanencia en la estación, en formato decimal  
con origen de tiempos 01/01/1900
```

```
clear  
clc
```

```
load('Medidas_estabilizacion_2s.txt')  
freq=6; % Frecuencia de medición del CG-5 (6 Hz)  
DUR=2; % Duración del ciclo de medida (en s)  
n=freq*DUR; % Número de medidas de cada grupo
```

```
% Parámetros a emplear en la expresión (5.4) del Trabajo Fin de Máster
```

```
tiempo=x2mdate(Medidas_estabilizacion_2s(:,3),0); % Tiempo decimal con  
origen de tiempos MATLAB (01/01/0000)  
s=Medidas_estabilizacion_2s(:,2).*sqrt(n); % Desviación estándar muestral  
s_cuadrado=s.^2; % Varianza muestral  
media=Medidas_estabilizacion_2s(:,1);  
clear Medidas_estabilizacion_2s;  
media_cuadrado=media.^2;
```

```
% Expresión (5.4) del Trabajo Fin de Máster
```

```
for k=2:length(s_cuadrado)  
    desvest_grupo(k-1,1)=sqrt(((n-  
1)*sum(s_cuadrado(1:k))+n*sum(media_cuadrado(1:k))-  
(n/k)*(sum(media(1:k)))^2)/(k*n*(k*n-1)));  
end
```

```
% Representación gráfica de la evolución del error estándar de la media  
% muestral con el tiempo (Figura 5.5 del Trabajo Fin de Máster).
```

```
desvest_grupo=[s(1,1)/sqrt(n);desvest_grupo];  
plot(tiempo,desvest_grupo,'black','linewidth',1.4)  
datetick('x',15,'keeplimits','keep_ticks');  
axis tight  
title('Evolución con el tiempo de la desviación estándar de la media  
muestral');  
xlabel('Tiempo transcurrido desde la llegada al punto de medición  
(hh:mm)');  
ylabel('Desviación estándar de la media muestral (mGal)');  
grid on;
```

9.2 Tablas de datos

Tabla 9.2. Extracto de las 10 primeras mediciones registradas por el CG5 en las pruebas de estabilización. Se trata de promedios y errores estándar de esos promedios de las series brutas a 6 Hz para ciclos de medición de 2 s

Fecha y hora [dd/mm/aaaa hh:mm:ss]	Promedio para el ciclo [mGal]	Desviación estándar de la media [mGal]
23/10/2015 10:13:10	5197,289	0,037
23/10/2015 10:13:16	5197,251	0,083
23/10/2015 10:13:21	5197,217	0,031
23/10/2015 10:13:26	5197,246	0,066
23/10/2015 10:13:31	5197,263	0,120
23/10/2015 10:13:36	5197,221	0,106
23/10/2015 10:13:41	5197,286	0,083
23/10/2015 10:13:46	5197,244	0,046
23/10/2015 10:13:51	5197,233	0,025
23/10/2015 10:13:56	5197,291	0,061

Tabla 9.3. Elevaciones medias [m] para cada sector de la plantilla de Hammer (Estación Base).

Zona y sector	1	2	3	4	5	6	7	8
B	360	360	358,5	358	[-]	[-]	[-]	[-]
C	361	358	360	359,5	355	355	[-]	[-]
D	370	365	355	362	357	345	[-]	[-]
E	390	365	340	355	385	355	345	370
F	330	350	340	400	440	350	345	335

Tabla 9.4. Elevaciones medias [m] para cada sector de la plantilla de Hammer (Estación 1).

Zona y sector	1	2	3	4	5	6	7	8
B	360,5	361,5	361,5	360	[-]	[-]	[-]	[-]
C	356	360	360,5	363,5	363	356	[-]	[-]
D	355	358	365	370	373	348	[-]	[-]
E	382	348	336	366	400	370	328	356
F	335	350	345	390	465	370	330	350

Tabla 9.5. Elevaciones medias [m] para cada sector de la plantilla de Hammer (Estación 2).

Zona y sector	1	2	3	4	5	6	7	8
B	358,5	360	358	357	[-]	[-]	[-]	[-]
C	354	360	360	361	358	352	[-]	[-]
D	357	360	352	367	367	343	[-]	[-]
E	380	355	340	360	400	360	335	365
F	335	340	350	400	445	370	330	340

Tabla 9.6. Elevaciones medias [m] para cada sector de la plantilla de Hammer (Estación 3).

Zona y sector	1	2	3	4	5	6	7	8
B	358,5	359,5	357,5	357	[-]	[-]	[-]	[-]
C	356	360	360	360,5	356	352	[-]	[-]
D	361	360	367	365	364	346	[-]	[-]
E	390	355	340	350	390	367	330	370
F	335	355	345	400	445	345	335	340

Tabla 9.7. Elevaciones medias [m] para cada sector de la plantilla de Hammer (Estación 4).

Zona y sector	1	2	3	4	5	6	7	8
B	359	359,5	358	357,5	[-]	[-]	[-]	[-]
C	358	360,5	360	360	355	353	[-]	[-]
D	363	363	353	364	360	345	[-]	[-]
E	390	358	338	356	384	354	338	380
F	330	350	330	415	445	350	335	340

Tabla 9.8. Elevaciones medias [m] para cada sector de la plantilla de Hammer (Estación 5).

Zona y sector	1	2	3	4	5	6	7	8
B	361,5	361	360,5	360,5	[-]	[-]	[-]	[-]
C	354	364	361	360	357	357	[-]	[-]
D	370	365	355	359	352	351	[-]	[-]
E	394	367	340	353	377	355	335	380
F	325	350	330	410	445	345	340	330

Tabla 9.9. Elevaciones medias [m] para cada sector de la plantilla de Hammer (Estación 6).

Zona y sector	1	2	3	4	5	6	7	8
B	364,5	363	362	363,5	[-]	[-]	[-]	[-]
C	366,5	367	362,5	361	359	361,5	[-]	[-]
D	375	368	356	362	350	354	[-]	[-]
E	390	370	340	350	372	352	354	380
F	315	340	330	415	430	345	350	325

Tabla 9.10. Elevaciones medias [m] para cada sector de la plantilla de Hammer (Estación 7).

Zona y sector	1	2	3	4	5	6	7	8
B	366,5	365	365	366	[-]	[-]	[-]	[-]
C	368	367	364	362	362	365	[-]	[-]
D	380	370	356	358	352	358	[-]	[-]
E	388	374	340	342	374	350	356	374
F	320	335	325	405	435	335	355	320

Tabla 9.11. Elevaciones medias [m] para cada sector de la plantilla de Hammer (Estación 8).

Zona y sector	1	2	3	4	5	6	7	8
B	368	367	367,4	367,8	[-]	[-]	[-]	[-]
C	371	369	367	366	364	366	[-]	[-]
D	384	376	356	358	352	366	[-]	[-]
E	386	380	378	342	372	350	360	380
F	315	340	325	405	440	340	350	320

Tabla 9.12. Elevaciones medias [m] para cada sector de la plantilla de Hammer (Estación 9).

Zona y sector	1	2	3	4	5	6	7	8
B	369	368	367	368	[-]	[-]	[-]	[-]
C	372	367	366	365	365	372	[-]	[-]
D	386	378	357	358	352	368	[-]	[-]
E	380	380	340	344	370	346	360	376
F	310	335	325	405	430	330	360	315

Tabla 9.13. Elevaciones medias [m] para cada sector de la plantilla de Hammer (Estación 10).

Zona y sector	1	2	3	4	5	6	7	8
B	371	369	368	369	[-]	[-]	[-]	[-]
C	374	375	368	368	367	368	[-]	[-]
D	388	382	358	359	352	370	[-]	[-]
E	380	380	340	345	368	340	370	378
F	315	335	330	405	425	335	355	310

Tabla 9.14. Elevaciones medias [m] para cada sector de la plantilla de Hammer (Estación 11).

Zona y sector	1	2	3	4	5	6	7	8
B	373	371	370	371	[-]	[-]	[-]	[-]
C	376	376	370	367	366	370	[-]	[-]
D	390	386	360	358	354	372	[-]	[-]
E	375	382	346	347	368	340	370	376
F	310	330	325	395	430	330	355	310

Tabla 9.15. Elevaciones medias [m] para cada sector de la plantilla de Hammer (Estación 12).

Zona y sector	1	2	3	4	5	6	7	8
B	374	373	371	373	[-]	[-]	[-]	[-]
C	380	380	372	368	368	373	[-]	[-]
D	391	388	363	363	356	374	[-]	[-]
E	372	382	350	348	364	336	376	370
F	305	330	340	400	425	330	360	310

Tabla 9.16. Correcciones [mGal] para cada sector de la plantilla de Hammer (Estación Base).

Zona y sector	1	2	3	4	5	6	7	8
B	0,00497	0,00497	0,02674	0,03557	[-]	[-]	[-]	[-]
C	0,00000	0,00323	0,00033	0,00078	0,01278	0,01278	[-]	[-]
D	0,00960	0,00195	0,00413	0,00013	0,00182	0,02904	[-]	[-]
E	0,01904	0,00038	0,00993	0,00080	0,01310	0,00080	0,00577	0,00187
F	0,00949	0,00119	0,00435	0,01511	0,06112	0,00119	0,00252	0,00667

Tabla 9.17. Correcciones [mGal] para cada sector de la plantilla de Hammer (Estación 1).

Zona y sector	1	2	3	4	5	6	7	8
B	0,00497	0,00497	0,02674	0,03557	[-]	[-]	[-]	[-]
C	0,00000	0,00323	0,00033	0,00078	0,01278	0,01278	[-]	[-]
D	0,00960	0,00195	0,00413	0,00013	0,00182	0,02904	[-]	[-]
E	0,01904	0,00038	0,00993	0,00080	0,01310	0,00080	0,00577	0,00187
F	0,00949	0,00119	0,00435	0,01511	0,06112	0,00119	0,00252	0,00667

Tabla 9.18. Correcciones [mGal] para cada sector de la plantilla de Hammer (Estación 2).

Zona y sector	1	2	3	4	5	6	7	8
B	0,00053	0,01627	0,00025	0,00800	[-]	[-]	[-]	[-]
C	0,00655	0,00122	0,00122	0,00293	0,00002	0,01392	[-]	[-]
D	0,00017	0,00038	0,00452	0,00904	0,00904	0,02652	[-]	[-]
E	0,01076	0,00023	0,00752	0,00007	0,03888	0,00007	0,01218	0,00105
F	0,00534	0,00329	0,00067	0,01728	0,07341	0,00138	0,00789	0,00329

Tabla 9.19. Correcciones [mGal] para cada sector de la plantilla de Hammer (Estación 3).

Zona y sector	1	2	3	4	5	6	7	8
B	0,00024	0,00372	0,00794	0,01479	[-]	[-]	[-]	[-]
C	0,00274	0,00064	0,00064	0,00122	0,00274	0,01611	[-]	[-]
D	0,00062	0,00020	0,00806	0,00466	0,00330	0,01865	[-]	[-]
E	0,02204	0,00031	0,00793	0,00172	0,02204	0,00157	0,01857	0,00291
F	0,00557	0,00014	0,00186	0,01688	0,07259	0,00186	0,00557	0,00347

Tabla 9.20. Correcciones [mGal] para cada sector de la plantilla de Hammer (Estación 4).

Zona y sector	1	2	3	4	5	6	7	8
B	0,00245	0,00013	0,01398	0,02186	[-]	[-]	[-]	[-]
C	0,00102	0,00028	0,00005	0,00005	0,00796	0,01587	[-]	[-]
D	0,00133	0,00133	0,00518	0,00223	0,00001	0,02465	[-]	[-]
E	0,02074	0,00006	0,01061	0,00030	0,01341	0,00073	0,01061	0,00939
F	0,00871	0,00092	0,00871	0,03021	0,07104	0,00092	0,00603	0,00383

Tabla 9.21. Correcciones [mGal] para cada sector de la plantilla de Hammer (Estación 5).

Zona y sector	1	2	3	4	5	6	7	8
B	0,00057	0,00022	0,00281	0,00281	[-]	[-]	[-]	[-]
C	0,01843	0,00296	0,00001	0,00054	0,00652	0,00652	[-]	[-]
D	0,00906	0,00171	0,00450	0,00057	0,00987	0,01210	[-]	[-]
E	0,02418	0,00077	0,01018	0,00153	0,00568	0,00087	0,01549	0,00802
F	0,01297	0,00124	0,00965	0,02353	0,06853	0,00260	0,00446	0,00965

Tabla 9.22. Correcciones [mGal] para cada sector de la plantilla de Hammer (Estación 6).

Zona y sector	1	2	3	4	5	6	7	8
B	0,00668	0,00100	0,01063	0,00005	[-]	[-]	[-]	[-]
C	0,00358	0,00481	0,00031	0,00218	0,00719	0,00137	[-]	[-]
D	0,01559	0,00248	0,00643	0,00023	0,02075	0,01033	[-]	[-]
E	0,01596	0,00099	0,01240	0,00409	0,00168	0,00296	0,00202	0,00625
F	0,02315	0,00544	0,01106	0,02627	0,04356	0,00337	0,00179	0,01461

Tabla 9.23. Correcciones [mGal] para cada sector de la plantilla de Hammer (Estación 7).

Zona y sector	1	2	3	4	5	6	7	8
B	0,00313	0,00342	0,00342	0,00033	[-]	[-]	[-]	[-]
C	0,00188	0,00058	0,00118	0,00528	0,00528	0,00022	[-]	[-]
D	0,02332	0,00211	0,01112	0,00706	0,02185	0,00706	[-]	[-]
E	0,01119	0,00154	0,01500	0,01278	0,00154	0,00565	0,00217	0,00154
F	0,02070	0,00938	0,01645	0,01524	0,04704	0,00938	0,00115	0,02070

Tabla 9.24. Correcciones [mGal] para cada sector de la plantilla de Hammer (Estación 8).

Zona y sector	1	2	3	4	5	6	7	8
B	0,00095	0,00214	0,00025	0,00024	[-]	[-]	[-]	[-]
C	0,00431	0,00074	0,00014	0,00097	0,00484	0,00097	[-]	[-]
D	0,03071	0,00825	0,01562	0,01075	0,02788	0,00030	[-]	[-]
E	0,00768	0,00350	0,00246	0,01481	0,00044	0,00703	0,00132	0,00350
F	0,02730	0,00756	0,01795	0,01385	0,05138	0,00756	0,00308	0,02239

Tabla 9.25. Correcciones [mGal] para cada sector de la plantilla de Hammer (Estación 9).

Zona y sector	1	2	3	4	5	6	7	8
B	0,00060	0,00274	0,01457	0,00274	[-]	[-]	[-]	[-]
C	0,00411	0,00107	0,00271	0,00506	0,00506	0,00411	[-]	[-]
D	0,03412	0,01013	0,01584	0,01328	0,03176	0,00006	[-]	[-]
E	0,00291	0,00291	0,01855	0,01378	0,00004	0,01165	0,00172	0,00122
F	0,03392	0,01124	0,01887	0,01306	0,03700	0,01481	0,00075	0,02843

Tabla 9.26. Correcciones [mGal] para cada sector de la plantilla de Hammer (Estación 10).

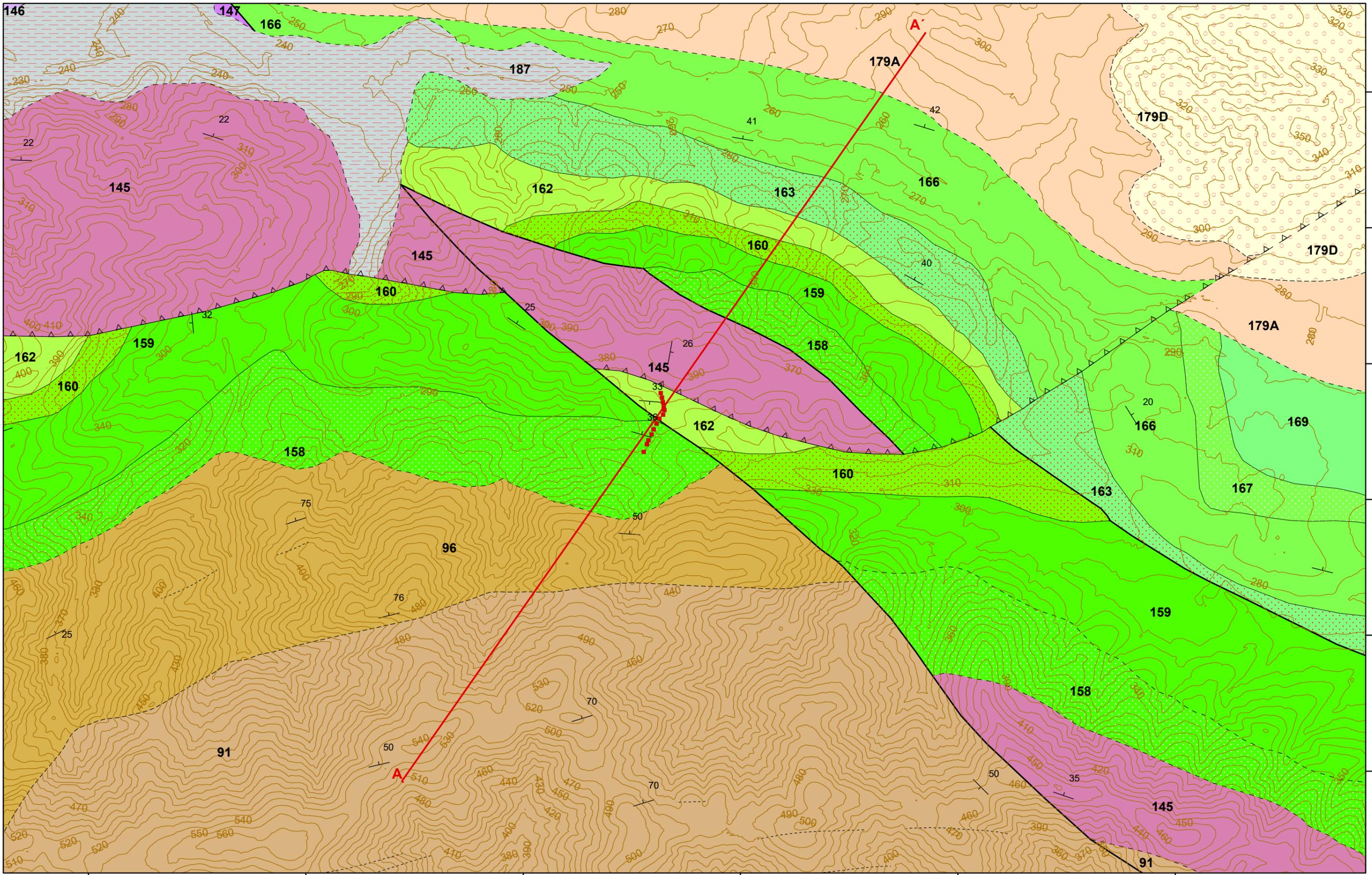
Zona y sector	1	2	3	4	5	6	7	8
B	0,00778	0,00384	0,01654	0,00384	[-]	[-]	[-]	[-]
C	0,00650	0,00986	0,00124	0,00124	0,00297	0,00124	[-]	[-]
D	0,03750	0,01720	0,01619	0,01360	0,03604	0,000004	[-]	[-]
E	0,00236	0,00236	0,02002	0,01392	0,00008	0,02002	0,000001	0,00153
F	0,02963	0,01201	0,01569	0,01226	0,03003	0,01201	0,00218	0,03522

Tabla 9.27. Correcciones [mGal] para cada sector de la plantilla de Hammer (Estación 11).

Zona y sector	1	2	3	4	5	6	7	8
B	0,01610	0,00028	0,00813	0,00028	[-]	[-]	[-]	[-]
C	0,00844	0,00844	0,00056	0,00659	0,00997	0,00056	[-]	[-]
D	0,03991	0,02511	0,01461	0,02017	0,03374	0,00007	[-]	[-]
E	0,00033	0,00265	0,01437	0,01326	0,00024	0,02192	0,00003	0,00052
F	0,03688	0,01681	0,02111	0,00561	0,03403	0,01681	0,00261	0,03688

Tabla 9.28. Correcciones [mGal] para cada sector de la plantilla de Hammer (Estación 12).

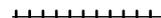
Zona y sector	1	2	3	4	5	6	7	8
B	0,00994	0,00076	0,01396	0,00076	[-]	[-]	[-]	[-]
C	0,01923	0,01923	0,00016	0,00796	0,00796	0,00005	[-]	[-]
D	0,03818	0,02704	0,01085	0,01085	0,03161	0,00022	[-]	[-]
E	0,00001	0,00199	0,01161	0,01373	0,00170	0,03005	0,00026	0,00016
F	0,04493	0,01799	0,01056	0,00742	0,02705	0,01799	0,00159	0,03860



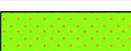
Mapa geológico de la zona de estudio



SIGNOS CONVENCIONALES

	Contacto normal o concordante
	Contacto supuesto
	Contacto discordante
	Contacto discordante supuesto
	Contacto mecánico
	Cambio lateral de facies
	Contacto intrusivo
	Masas de agua
	Límite político
	Escombrera
	Falla
	Falla supuesta
	Falla normal con indicacion de hundimiento
	Falla normal supuesta con indicacion de hundimiento
	Falla inversa
	Falla inversa supuesta
	Cabalgamiento
	Cabalgamiento supuesto
	Cicatriz de deslizamiento
	Traza de capa
	Capa de carbón
	Simbología cuaternario
	Crestas de morrena
	Dirección de movimiento en masa
	Anticlinal
	Anticlinal tumbado o asimétrico
	Sinclinal
	Sinclinal con sentido de inmersión
	Sinclinal tumbado o asimétrico
	Estratificación subhorizontal
	Estratificación subvertical
	Estratificación invertida
	Estratificación y buzamiento
	Esquistosidad de Fase I subvertical
	Esquistosidad de Fase I
	Esquistosidad principal
	Lineación de Fase I o Lineación principal
	Eje de plieque de Fase I

LEYENDA DE LAS FORMACIONES DE INTERÉS DEL MAPA GEOLÓGICO

P A L E O G E N O	EOCENO			179A Margas, arcillas y areniscas con calizas blanquecinas y rosadas
	CRETACICO SUPERIOR	TURONIENSE		166 Fm. San Lázaro: margas, calizas, argilitas, limolitas, areniscas y calizas glauconíticas nodulosas
	CRETACICO SUPERIOR	CENOMANIENSE		
	CRETACICO SUPERIOR	CENOMANIENSE		163 Fm. Latores: arenas, microconglomerados, limolitas y arcillitas
	CRETACICO SUPERIOR	CENOMANIENSE		162 Fm. La Manjoya: calizas bioclásticas arenosas, areniscas y lutitas grises
	CRETACICO SUPERIOR	CENOMANIENSE		160 Fm. El Caleyú: areniscas blanquecinas, limolitas y arcillitas
	CRETACICO INFERIOR	ALBIENSE		
	CRETACICO INFERIOR	ALBIENSE		159 Fm. Ullaga: calizas bioclásticas grises, argilitas, limolitas y areniscas
	CRETACICO INFERIOR	ALBIENSE		158 Fm. Pola de Siero: conglomerados, areniscas y lutitas
	CRETACICO INFERIOR	APTIENSE		
C A R B O N Í F E R O	PENSILVANIENSE	MOSCOVIENSE		96 Grupo Sama: pizarras, limolitas, areniscas, conglomerados y capas de carbón (Paquetes Caleras, Generalas, San Antonio, María Luisa, Sotón, Entreguerras, Sorriego, Modesta y Oscura)
	PENSILVANIENSE	MOSCOVIENSE		91 Grupo Lena: lutitas, areniscas, margas, calizas y escasas capas de carbón (Paquetes Levinco, Llanón, Tendeyón y Caleras)

