

## Result of the 4D microgravity study in the karst of Sierra de las Nieves (Málaga, Spain)

Plata Torres J.L.

Instituto Geológico y Minero de España, La Calera 2, 28760 Tres Cantos (Madrid). [jl.plata@igme.es](mailto:jl.plata@igme.es)

### SUMMARY

One of the aims of the Project “Conceptualization, characterization and interpretation of the spatiotemporal variability of karst hydrogeology by inverse modelling (KARSTINV)”, carried out by IGME, is the development and evaluation of a gravimetric technique to obtain information on the spatial distribution of the permeability of a karst system, as an input to be considered in the recharge modelling. To do this, the gravity anomaly measured after a period of drought is going to be compared with the existing one after a period of recharge. The area selected for the study is the carbonate aquifer of Sierra de las Nieves (Málaga). Two measurements campaigns have been conducted with a Scintrex CG5 gravimeter, developing one specific methodology both for the field protocol and the anomalies calculation phases. The greatest difficulty in achieving the required high accuracy is the stabilization drift of the gravimeter at each reading, which depends on the type of motion of the instrument while it is moved between stations. Despite the adverse conditions of the area for this experiment, because of its big extension and rough relieve, it has been attained a final accuracy of about 5 microGal for each of the measuring periods. The amplitude of the 4D anomalies found does not exceed 30 microGal; the error analysis of the anomalies allow to localize areas of higher probability of low permeability. This experiment only covers a small part of the aquifer investigated, as the number of gravity stations is limited by the need to take measurements in the shortest time possible, so that there is no significant variation in the position of the water between readings of the same campaign. It can be concluded that this kind of gravimetric application should be limited to the study of smaller areas with gentle topography and with a vadose zone of little thickness.

### 1. INTRODUCCIÓN

Tras el experimento GRACE (Gravity Recovery and Climate Experiment) (Llubes et al., 2004), se ha producido un renovado interés en las aplicaciones de la gravimetría en investigación hidrogeológica, dando lugar incluso a un cierto exceso de expectativas en cuanto a su utilidad en hidrogeología local. Desde los trabajos orientados a determinar la influencia gravimétrica de las variaciones de agua locales, como ruido a eliminar de las mediciones de gravedad absoluta (Van Camp et al., 2006; Creutzfeldt, 2010), se ha pasado a utilizar la microgravimetría en estudios hidrogeológicos en karst, tanto con mediciones absolutas (Jacob et al. 2008) como relativas (Jacob et al., 2010), en entornos detríticos (Pfeffer et al., 2013) o en aplicaciones para el monitoreo del movimiento de fluidos introducidos desde superficie (Mrlina, 2007; Gasperikova y Hoversten, 2008; Ferguson et al., 2007 y 2008; Hare et al., 2008), con mayor o menor éxito y en ocasiones con dudosos resultados.

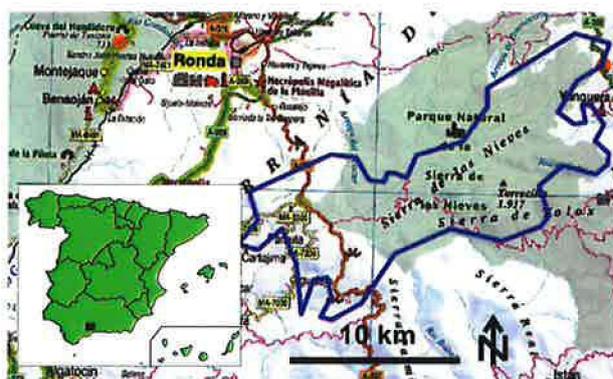


Figura 1- Situación de la zona de trabajo. (Position of the study area)

Uno de los objetivos del Proyecto “Conceptualización, caracterización e interpretación de la variabilidad espacio-temporal de la hidrogeología del karst por modelado inverso. (KARSTINV)”, nº CGL2010-15498 del Plan Nacional de Investigación Científica 2008-2011, llevado a cabo por el IGME,

es el desarrollo de una metodología microgravimétrica relativa 4D que proporcione datos para la estimación de la recarga en sistemas kársticos, utilizando un método operativo que consiga una precisión del orden de 5  $\mu$ Gal, y que sea viable en términos económicos y logísticos. La zona seleccionada para el estudio es el acuífero carbonatado de la Sierra de las Nieves (Málaga) (Figura 1), Parque Natural catalogado como Reserva de la Biosfera por la UNESCO. El plan de trabajo ha consistido en la realización de dos campañas gravimétricas en dos épocas de distinto estado de recarga del acuífero, utilizando un gravímetro Scintrex CG5 con precisión de 1  $\mu$ Gal. Un análisis de las correcciones por variaciones externas de la gravedad puede verse en Plata (2012) y Plata et al. (2013), y una descripción completa del experimento puede encontrarse en el informe IGME 64103-64104 (Plata, 2013), siendo el objeto de esta comunicación la presentación resumida de la metodología establecida y de los resultados obtenidos.

### 2. CAMPAÑAS DE MEDICIÓN

Los itinerarios seleccionados por su mayor interés hidrogeológico y accesibilidad forman cinco alineaciones con un total de unos 24 km (Figura 2). Sobre ellos se han señalado 38 estaciones para las medidas de gravimetría con una distancia media del orden de los 500-1000 m, de acuerdo con las posibles anomalías de diversos modelos previamente evaluados. Los itinerarios 1 y 3 tienen orientación NO-SE, con cotas entre 998 m en el norte y 1155 m en el sur; comienzan en las dolomías del Jurásico Inferior-Triásico Superior, atraviesan la brecha de “La Nava”, del Mioceno Inferior, y las calizas y margo-calizas del Jurásico Inferior, para finalizar de nuevo sobre las dolomías jurásicas. Los itinerarios 2 y 4 transcurren con orientación general O-E, ascendiendo desde 1046 m en el Este hasta el Puerto de los Pilonos con 1749 m; recorren la brecha de “La Nava”, margo-calizas del Jurásico Inferior y dolomías jurásicas. El quinto itinerario es un sendero de montaña de unos 3 km que une el Puerto de los Pilonos con el Puerto de los Valientes, con orientación variable, sobre calizas jurásicas y margo-calizas; se efectuó a pie, transportando el gravímetro en una mochila especial, siendo en el resto transportado sobre el asiento posterior de un vehículo todoterreno.

Las estaciones se han situado sobre afloramientos o lugares con garantías razonables de estabilidad y permanencia en un periodo de

suave en la superficie circundante, ya que no es necesario efectuar correcciones de relieve. En cada lugar se ha señalado la estación con pintura y fotografiando el lugar. Así mismo se han marcado los puntos sobre los que se apoyó el trípode del gravímetro en la primera lectura de cada estación, diferenciando la posición de la pata del trípode que se bloqueó para impedir variaciones en la altura del sensor. En el punto central del trípode se ha dejado un clavo de 5 cm, introducido en una perforación a broca y fijado con silicona. Las coordenadas de las estaciones, necesarias exclusivamente a efectos cartográficos, ya que no van a formar parte de los cálculos gravimétricos, se han medido utilizando el sistema GPS diferencial, con instrumentación Java propiedad del IGME, calculándose en el sistema UTM huso 30 ED50 y cota Z en m s.n.m.

La ubicación de la base obedece a unos criterios específicos, ya que debe estar en un lugar que no sea previsible que se vea afectado por variación en el contenido de agua en el subsuelo próximo, y además no debe estar demasiado alejada de las estaciones gravimétricas. Su cota no debería ser muy diferente de la de las estaciones, a fin de minimizar la amplitud de las anomalías estación-base, criterio imposible de cumplir en este caso. Se ha situado fuera del acuífero, sobre margas y calizas margosas del Triásico Medio (Figura 2). Para disponer de algún criterio con el que poder verificar la invariabilidad de la gravedad en este punto, se han seleccionado sobre la misma formación otras dos bases auxiliares, distanciadas entre si unos 1.5 km y con diferencias de cotas inferiores a 170 m.

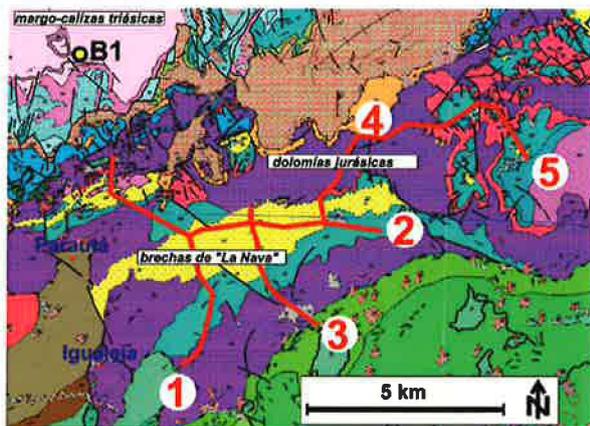


Figura 2- Itinerarios seleccionados según el interés hidrogeológico y accesibilidad de la zona. Base en punto B1. (Survey itinerary's chosen after the hydrogeological interest and accessibility. Point B1 is the gravimetric base).

Tras la calibración del gravímetro Scintrex CG5 utilizado y unión de las bases implantadas, las mediciones se han efectuado en agosto de 2011 y mayo de 2012. Cada campaña ha tenido una duración de 13 a 16 días, con programas de 3 a 4 h (salvo el realizado a pié, que duró 9 h), utilizando exclusivamente la base B1. En 2011 se han registrado 5 ciclos de lectura en cada determinación, repitiendo las mediciones al menos tres veces en programas independientes, pasando a 10 ciclos y dos repeticiones en 2012. Para tener en cuenta la variación de la corrección Luni-Solar y de carga oceánica con las coordenadas y cota de cada estación, se ha dividido la zona en tres sectores, a cotas 900, 1100 y 1700 m. Las correcciones se han calculado utilizando el método ETGTAB para la Luni-Solar y Fes2004 para la carga oceánica, en intervalos de 2 minutos y posterior interpolación a los tiempos exactos de lectura de cada ciclo en los programas de medición.

Debido a la fuerte topografía de la zona, las anomalías (diferencia de gravedad estación y base) son superiores a 20 mGal para 17 de las 38 estaciones, llegando a más de 120 mGal (Figura 3), lo que supone una fuente potencial de errores derivados de imprecisiones en la constante de calibración del gravímetro.

en la Base1 de 16  $\mu$ Gal, que han sido disminuidos a los valores de anomalías medidos en esa campaña, antes de calcular las anomalías 4D.

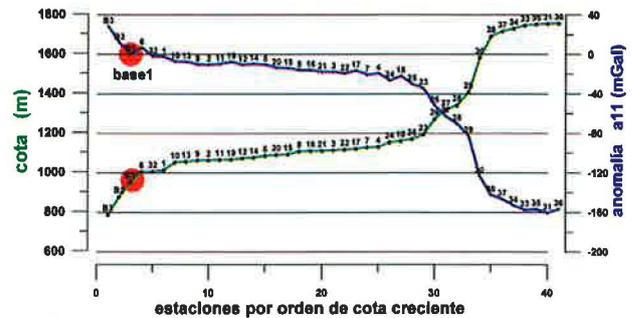


Figure 3- Variación de la anomalía en función de la cota de la estación. (Gravity anomaly versus altitude).

### 3. DERIVA DE ESTABILIZACIÓN. CRITERIO PARA LA SELECCIÓN DE LECTURAS

Se ha podido apreciar que el factor que más influye en la calidad de las lecturas es la deriva de estabilización del gravímetro. En la operatividad del gravímetro Scintrex CG5 pueden apreciarse diversos tipos de deriva o variación de las lecturas con el tiempo. El instrumento dispone de un sistema de compensación de la deriva intrínseca o estática mediante un factor que ha sido regularmente comprobado. La variación de las primeras lecturas efectuadas cada día en la base permite verificar el comportamiento del gravímetro tras un periodo de reposo (durante la noche) seguido de un desplazamiento aceptablemente igual para todos los días (lugar de alojamiento-base), denominado deriva secular; la variación de las lecturas en base a principio y fin de programa es la deriva de trabajo, cuya evolución permite verificar si es acorde con la variación Luni-Solar, controlando así la posible existencia de saltos, que provocarían derivas anormales.

Puesto que en cada estación se registran al menos cinco ciclos de lectura, es necesario seleccionar el valor a asignar la medición. Para esta selección resulta fundamental conocer el comportamiento de la estabilización instrumental, que depende fundamentalmente del movimiento a que ha sido sometido el gravímetro en su desplazamiento entre estaciones. El tiempo de estabilización es el tiempo transcurrido desde que el gravímetro se deja nivelado y leyendo en una estación hasta que las lecturas empiezan a seguir la evolución del efecto Luni-Solar, y en mayor detalle el de la carga oceánica. Cuando se dan estas condiciones, la variación en la elongación del muelle está respondiendo a la variación de la gravedad, aunque al cabo de un tiempo, debido a la deriva, comience a separarse de esta tendencia. Mientras que en un registro estático de larga duración es posible evaluar su deriva y corregirla de los datos, esto es inviable en las lecturas dinámicas efectuadas durante un programa de medición en campo, en las que el registro en cada estación es de pocos minutos. Se han llevado a cabo varios experimentos para evaluar la estabilización de las lecturas del gravímetro utilizado (Plata, 2013), tanto en condiciones puramente estáticas, como utilizando datos más afectados por condiciones dinámicas. El análisis de estos datos permite llegar a la conclusión de que cuando el gravímetro ha estado sometido a movimiento, como es el debido a una jornada de trabajo en campo, una vez instalado en un punto fijo las lecturas tardan en estabilizarse (en el sentido de seguir una evolución de acuerdo con la variación de la gravedad debida al efecto de marea y de carga oceánica), tiempos mínimos de dos a tres horas, con un aumento (en ocasiones disminución) de los valores de las lecturas, que pueden ser de más de 0.100 mGal. Se ha comprobado que no puede atribuirse a los cambios de temperatura el largo tiempo de estabilización de las lecturas. El ritmo de estabilización es normalmente mayor al comienzo del registro, para luego ir suavizándose, sin que siga la misma pauta en todas las ocasiones, con ratios de variación que pueden llegar a ser de 2 a 10 cmGal/h, muy superiores a los

(entre 0 y 0.5 cmGal/h) y estática (del orden de 1 cmGal/h) (Figura 4). Sin embargo, se ha comprobado que la evolución de un conjunto de ciclos de lectura durante un tiempo de unos quince minutos, incluso aunque se escojan al inicio del registro o cuando el instrumento no esté todavía estabilizado, pueden presentar oscilaciones del orden de solamente unos  $\pm 3\mu\text{Gal}$  respecto de un valor medio, por lo que se interpretarían como “estabilizadas” (en sentido estricto), aunque no respondan a las variaciones de gravedad en ese momento. Además se ha verificado que la evolución en estos periodos cortos no depende de la aplicación a las lecturas de la corrección de la deriva de trabajo (excepto cuando ésta es muy acusada, superior a 2.5 cmGal/h) y de carga oceánica, que son prácticamente constantes para todas las lecturas durante ese tiempo. Esto es debido a que la estabilización no se produce con un ratio constante, sino que en realidad tiene lugar mediante aumentos “escalonados” que durante un corto intervalo de tiempo presentan ratios muy inferiores al total. El análisis efectuado evidencia que las lecturas registradas en los primeros minutos de hacer estación no van reflejar el valor real de la gravedad, que no se alcanza hasta un tiempo que puede ser superior a dos horas. Mientras que las derivas de trabajo y secular son equivalentes en ambas campañas (Figura 4), la estabilización ha sido mejor en la campaña de 2012, en la que a la vista de la experiencia adquirida se han cuidado extremadamente las condiciones de transporte del instrumento, en especial durante la ejecución de los programas de medición.

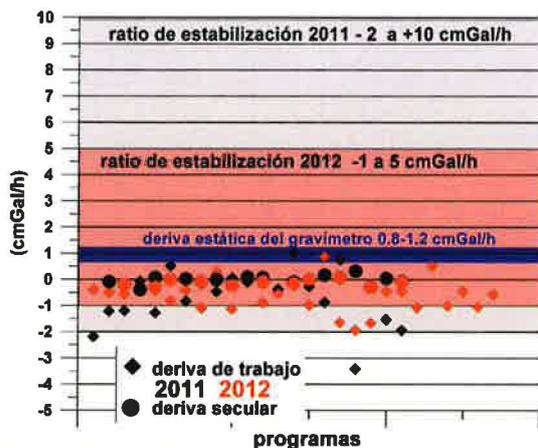


Figure 4- Diferentes tipos de deriva del gravímetro. (Different kinds of drifts of the gravimeter).

La deriva de estabilización tiene una consecuencia importante, ya que la gravimetría relativa se basa en medir la diferencia de lecturas entre cada estación y la base a la que se van a referir las anomalías. La metodología de trabajo tiene que procurar que la diferencia de lecturas entre base y estación sí que refleje la diferencia de gravedad entre ambos lugares, aunque cada lectura independiente no lo haga. La ejecución de varios ciclos de lectura tiene precisamente por objeto optimizar el valor adoptado para la gravedad en cada estación. Si el ritmo de estabilización fuera siempre el mismo, la diferencia de gravedad determinada entre dos puntos sería independiente del ciclo de lectura escogido en cada estación, siempre que se tomaran al cabo del mismo tiempo desde el inicio de cada medición. Si las lecturas del gravímetro presentan gran “estabilidad” en todo el programa la selección del ciclo de lectura no resulta crítica; en la Figura 5 las lecturas seleccionadas en la apertura y cierre en base se han marcado con una cruz verde, indicando la barra de color malva la diferencia de gravedad con la que se calcula la deriva de trabajo. Para la estación 4 se indica el valor de las anomalías para todos los ciclos leídos, respecto del ciclo seleccionado en la apertura en Base, habiendo entre todas ellas una diferencia máxima de 3  $\mu\text{Gal}$ . En la Figura 6 se presenta un programa con lecturas de peor estabilidad, en el que la anomalía puede tener una oscilación de 14  $\mu\text{Gal}$  según el ciclo seleccionado.

primeras medidas de cada día en la base es positivo, con valores similares cada día, aunque no son escasas las excepciones. El ratio de estabilización de las lecturas en las mediciones finales en la base presenta mucha mayor disparidad: en ocasiones es similar al de las lecturas de apertura, en otras es muy diferente o de signo contrario. En cualquier caso, es notable que el signo de estabilización sea independiente del de la deriva de trabajo. Solo ocasionalmente los ratios de variación de las lecturas en base son muy pequeños, permitiendo elegir una lectura sin ambigüedad. Estas mismas conclusiones son válidas para el ratio de estabilización de las lecturas en las estaciones del programa, para las que la corrección de la deriva de trabajo solo supone añadir una constante a todos los ciclos, por lo que no contribuye a equalizar el ritmo de estabilización.

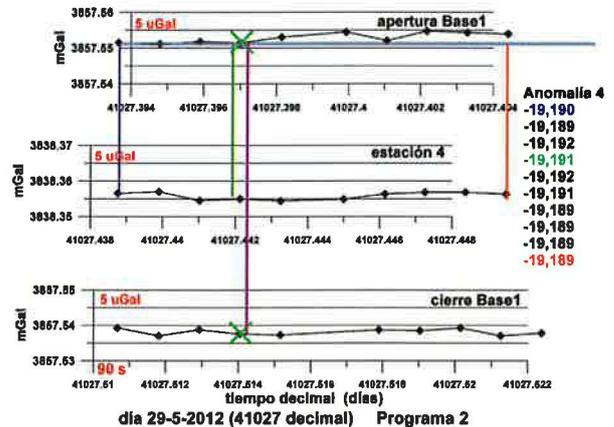


Figura 5- Ejemplo de la influencia del ciclo seleccionado en el valor de la anomalía cuando las lecturas son muy estables. (Example of the error in the anomaly evaluation for stable readings)

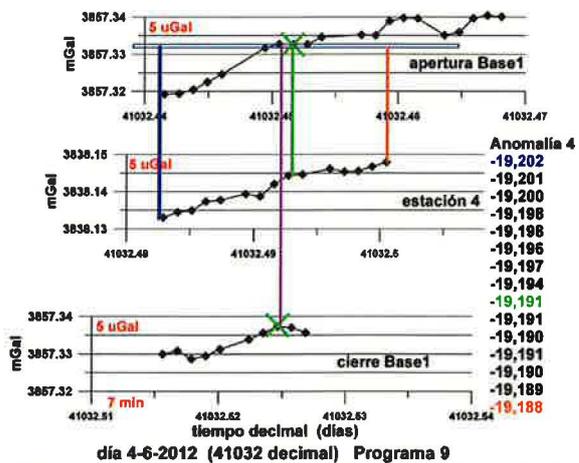


Figura 6- Ejemplo de la influencia del ciclo seleccionado en el valor de la anomalía cuando las lecturas son inestables. (Example of the error in the anomaly evaluation for unstable readings)

La casuística de posibles situaciones es incontrolable, no permitiendo definir una operativa de trabajo incuestionable. Es decir, que dada la gran desigualdad del comportamiento del gravímetro en cada ocasión, no es factible adoptar un único criterio para la selección de lecturas representativas de la gravedad con el error que en teoría permite su precisión instrumental, por lo que el proceso contiene cierta carga de subjetividad, y se ve condicionado por el número de ciclos efectuado. La selección de lecturas en la apertura en Base es fundamental por depender de ella el cálculo de todas las anomalías del programa, pudiendo invalidarlo si no son lo suficientemente correctas. De las observaciones efectuadas puede concluirse que la gravedad leída en la base evoluciona

por la deriva secular y de trabajo, cuya comprobación permite identificar situaciones anómalas, en las que los errores de selección pueden ser mayores. La comparación de la estabilización de los ciclos de lecturas en la medición inicial y final en base permite apreciar su influencia en el cálculo de la deriva, que afectará al cálculo de las anomalías de todas las estaciones del programa.

#### 4. EVALUACIÓN DE ERRORES

En la evaluación del error que pueden tener las anomalías, tanto estación-base como su variación temporal o anomalías 4D, hay que tener en cuenta cada uno de los factores que intervienen en su medición y cálculo. Debido a la resolución nominal del gravímetro y condiciones metroológicas (parámetro SD de desviación estándar proporcionado por el instrumento) cualquier lectura puede estar acompañada de un error de  $\pm 1\mu\text{Gal}$ . La posible desviación de la compensación de la deriva estática (parámetro DRIFT) respecto a su efecto real, así como la deriva diaria o secular no tiene ninguna repercusión en la determinación de las anomalías. La deriva de trabajo puede tener un error implícito de  $\pm 2\mu\text{Gal}$ , al ser el resultado de una diferencia de valores con precisión de  $\pm 1\mu\text{Gal}$ . La deriva o ratio de estabilización instrumental puede influir notablemente en el error que se introduzca en las anomalías, pero no puede evaluarse dicho error más que al comparar las anomalías medidas en programas distintos (repeticiones de control). El valor de las correcciones de marea y de carga oceánica depende del método de cálculo seguido. En estas campañas se ha comprobado que no es necesario tener en cuenta las variaciones de presión. Puede atribuirse al conjunto de las correcciones externas la posible introducción de errores en el valor final de cada lectura del orden de  $\pm 0.5\mu\text{Gal}$  como máximo. Considerando el conjunto de todos los factores, la gravedad calculada puede tener un error intrínseco de  $\pm 1.5\mu\text{Gal}$  en base y de  $\pm 3.5\mu\text{Gal}$  en las estaciones, por lo que el valor de la anomalía (diferencia de lecturas entre estación y base) puede tener un error intrínseco de  $\pm 5\mu\text{Gal}$ . Como resultado, la diferencia de anomalías en dos épocas (anomalía 4D) puede ir acompañada de un error intrínseco de  $\pm 10\mu\text{Gal}$ .

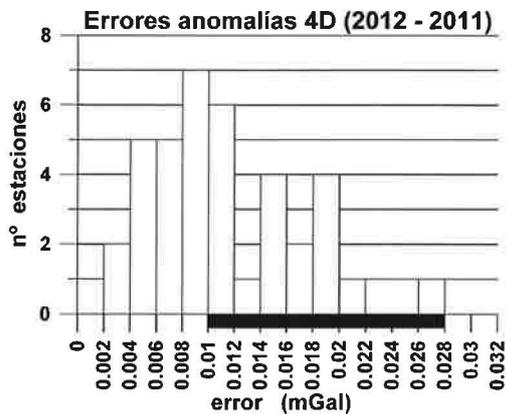


Figura 7- Distribución de errores de la anomalía 4D. (Distribution of the 4D anomaly error)

Se han efectuado varias repeticiones de control de las medidas en cada estación, en general 3 en la campaña de 2011 y 2 en la de 2012, obteniéndose los correspondientes valores de anomalías, que, una vez depuradas dan lugar a un único valor final para cada estación y para cada campaña. El error de esta anomalía final viene dado por la mitad de la diferencia máxima entre los valores aceptados para su cálculo; su valor medio es de  $7\mu\text{Gal}$  en 2011 (con valor inferior a  $5\mu\text{Gal}$  para el 45 % de las estaciones), y  $4\mu\text{Gal}$  en 2012 (con valor inferior a  $5\mu\text{Gal}$  para el 77 % de las estaciones). Puede considerarse por lo tanto que ambas campañas han cumplido el objetivo perseguido en el diseño de su metrología, aunque evidentemente existen estaciones donde se supera la precisión deseable, y ha sido mejor el resultado de la campaña de 2012.

de cada anomalía en cada campaña. Su histograma (Figura 7) presenta una distribución con dos poblaciones: la mayoría tienen un error entre 0 y  $12\mu\text{Gal}$ , con valor medio entorno a los  $8\mu\text{Gal}$ , existiendo, bien diferenciada, otra población con error entre 12 y  $22\mu\text{Gal}$  (media de  $18\mu\text{Gal}$ ). El 47 % de las estaciones supera el error intrínseco de  $10\mu\text{Gal}$ . De acuerdo con el análisis de errores, la mayor fiabilidad de las anomalías 4D la tienen las de amplitud superior a  $10\mu\text{Gal}$  (error intrínseco) y que estén acompañadas por un error de repetición inferior a  $10\mu\text{Gal}$ . Esta condición la cumplen las anomalías de las estaciones 1, 6, 8, 10, 12, 15, 16, 19, 23 y 26, señaladas en la Figura 8. Aunque no cumplan esta condición, pueden considerarse también de aceptable fiabilidad, por la buena agrupación de sus datos de campo, las anomalías de las estaciones 21, 22, 24, 29 y 38.

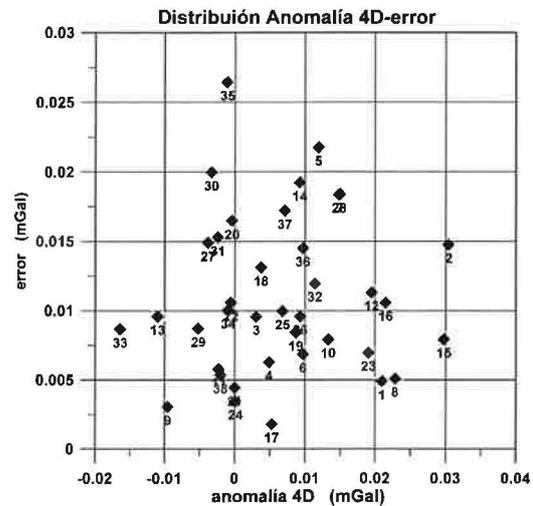


Figura 8- Clasificación de las anomalías 4D en el espacio error-amplitud. (Classification of the 4D anomaly's in the error-amplitude space. The stations selected are indicated by a circle).

#### 5. INTERPRETACIÓN DE LAS ANOMALÍAS 4D

En la Figura 2 se indica la distribución por perfiles o itinerarios en que se han organizado las mediciones. La variación de las anomalías 4D sobre los mismos están representadas en la Figura 9, resaltándose en relleno azul las anomalías positivas (aumento de gravedad en 2012 respecto de 2011) con valor superior a  $10\mu\text{Gal}$ . Se ha superpuesto el error para cada estación, indicando con un círculo las estaciones que cumplen las condiciones de mayor grado de confianza (anomalía  $\geq 10\mu\text{Gal}$ , error  $\leq 10\mu\text{Gal}$ ). Para el primer itinerario puede interpretarse que en el entorno de las estaciones 1-2 y 8 existe en 2012 una mayor acumulación de agua en la zona más próxima a la superficie del suelo; hacia el sur del perfil no hay apenas diferencia entre la gravedad medida en 2011 y en 2012, sin que haya zonas singulares de acumulación de agua, debiendo encontrarse ésta a mayor profundidad que en la parte norte del perfil.

En el perfil 3, también con orientación Norte-Sur, existe un buen grupo de estaciones de mayor fiabilidad, siendo todos los valores de anomalía positivos (excepto en la estación 13), lo que puede interpretarse como una zona de mayor concentración de agua en el subsuelo próximo, sobre todo en la zona de las estaciones 15 a 16.

En el perfil 2, que transcurre en dirección Oeste-Este, el valor de la anomalía 4D es prácticamente nula, salvo en los extremos (estaciones 10 y 23), en los que puede interpretarse una presencia más próxima de las zonas con agua. En el resto del perfil son especialmente fiables las estaciones 21, 22 y 24, todas ellas en la brecha de La Nava.

Los perfiles 4 y 5 forman una alineación en dirección SO-NE desde la estación 25 a la 34, girando a NO-SE hasta el final, estación 38. La cota es continuamente ascendiente, salvando un fuerte desnivel de más de 500 m hasta la estación 31, desde donde

anomalías, que no pasan de -20 mGal en el resto de los perfiles, llegan aquí a más de -160 mGal. Las anomalías 4D son todas ellas, salvo en la estación 26, de magnitud inferior al error, y por lo tanto de baja fiabilidad; positivas en ambos extremos, presentan una zona sin casi cambios en la porción central. En la Figura 10 se han marcado las zonas anómalas, indicando con línea discontinua las de menor grado de confianza.

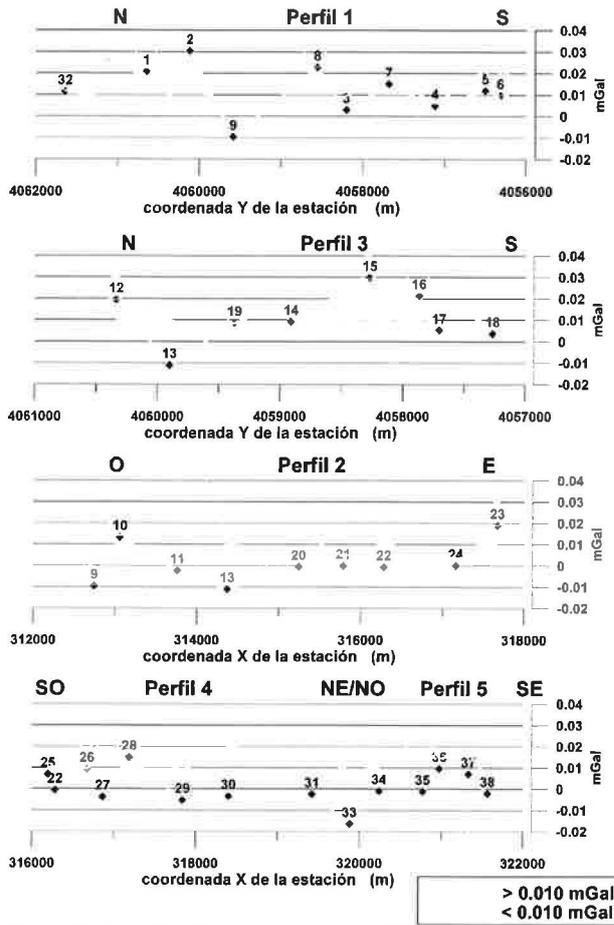


Figura 9- Anomalia 4D y error para los itinerarios medidos. (4D anomaly and error for the measured itineraries)

Las zonas anómalas deben entenderse no estrictamente limitadas a la posición de las estaciones, sino que su origen puede encontrarse en áreas más extensas, indicando lugares de menor permeabilidad y/o mayor porosidad. Su situación corresponde con las partes más llanas de los perfiles prospectados, o bien en zonas de valle, con algunas excepciones. Su posición respecto de la cartografía geológica de superficie (Figura 10), pone de manifiesto que estas zonas se localizan fundamentalmente sobre el recubrimiento del Mioceno Inferior (formación "Brecha de la Nava") y la subyacente formación de calizas y margocalizas del Jurásico Inferior de facies Sinemuriense y Hettangiense. Otras zonas se sitúan sobre áreas especialmente fracturadas (estaciones 36-37) o en contactos de cabalgamiento (estación 28).

La zona de trabajo donde se ha llevado a cabo este experimento presenta una situación muy especial para la realización de estudios de microgravimetría 4D, ya que en principio no reúne ninguna de las condiciones idóneas para este tipo de trabajos por su extensión, topografía, red viaria y gran potencia de la zona no saturada. No obstante, pensamos que la metodología desarrollada es de aplicación en otras circunstancias. En función de todo el proceso metodológico y de cálculo seguido, y dado el escaso número de estaciones especialmente fiables, debe entenderse que el resultado

de lo que es posible medir con microgravimetría en una zona de estas características.

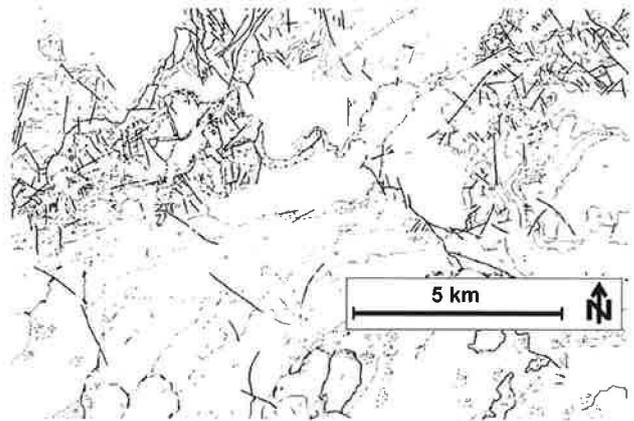


Figura 10- Posición de las zonas anómalas. Las estaciones en color rojo son las de mayor fiabilidad. (Position of anomalous zones. Stations in red are the most reliable ones)

## 6. SÍNTESIS DE METODOLOGÍA DESARROLLADA

En este trabajo se ha desarrollado una metodología para llevar a cabo campañas de microgravimetría relativa 4D con el objetivo de detectar las posibles anomalías producidas por la variación del contenido en agua en la zona no saturada de un karst. No se trata de un trabajo de tipo académico ni teórico, con la utilización de medios desproporcionados (p.e. bases de gravimetría absoluta con gravímetros superconductores SG), sino que se ha perseguido la puesta a punto de una metodología compatible técnica y económicamente con la realización de estudios aplicados. A continuación se sintetizan los aspectos más relevantes, ordenados por los siguientes conceptos:

- consideraciones previas
- preparación de la campaña
- operatividad del gravímetro
- correcciones externas
- errores intrínsecos
- adquisición de datos
- proceso de datos

### 6.1 CONSIDERACIONES PREVIAS

- La variación de porosidad/permeabilidad controla la variación de densidad

Se asume que la diferencia entre las anomalías de gravedad medidas en la misma estación en dos periodos será debida a la variación en la distribución de masa de agua local entre dichos periodos, lo que lleva implícito que la distribución de la porosidad/permeabilidad no es homogénea en el área prospectada (existe un contraste lateral de porosidad/ permeabilidad).

#### - Zonas de influencia

Entre el 52 % y el 80 % de las causas de origen hidrogeológico que ejercen influencia sobre la gravedad se generan en un radio de unos 50 m entorno del gravímetro, y el 90 % de la señal proviene de un área con un radio de unos 1000 m.

#### - Amplitud y longitud de onda de las posibles anomalías

Es aconsejable efectuar una modelización previa de las anomalías que pueden generarse, teniendo en cuenta la recarga, porosidad, dimensiones y profundidad de las posibles acumulaciones de agua. En función de ellas se puede determinar la distancia entre estaciones más adecuada al objetivo, así como una primera evaluación de las posibilidades de detección.

#### - Condicionantes de la zona

microgravimetría relativa 4D se dan cuando las anomalías (diferencia de gravedad entre las estaciones y la base) no son superiores a 10 mGal, ya que ello minimiza el error producido por la imprecisión de la constante de calibración. Esto conlleva desniveles inferiores a 50 m.

- El número de estaciones a utilizar debe ser posible medirlo en campañas cuya duración garantice que no se producen variaciones de gravedad por movimientos de masa locales, ni en la base ni en las estaciones (p.e. debido a grandes lluvias durante la campaña), para poder referir todas las observaciones a un tiempo común.
- Si quiere conocerse la variación de la gravedad en periodos de tiempo inferiores a la duración de una campaña de mediciones, se trata de un tema de monitorización o medición continua de la gravedad simultáneamente en todas las estaciones, lo que se sale de las posibilidades prácticas de un estudio real.

## 6.2 PREPARACIÓN DE LA CAMPAÑA

### - Situación de la base

- No debe emplearse nada más que una base para el inicio y fin de los programas de lectura.
- La base debe situarse en un lugar donde sea previsible que la gravedad no varíe por importantes modificaciones de su entorno próximo ni por la variación de la existencia de agua en el subsuelo entre los diferentes periodos de medición.
- No debe estar demasiado alejada de las estaciones gravimétricas, a fin de no alargar la duración de los programas de lectura, lo que puede ser difícil de reconciliar con la condición anterior.
- Preferentemente, su cota no debería ser muy diferente de la de las estaciones, para minimizar la amplitud de las anomalías.
- A fin de controlar que en la base no se produzcan variaciones de gravedad entre ambos periodos de medida, o poder tener en cuenta los cambios, deben situarse otras dos bases auxiliares, midiendo las diferencias entre ellas en ambas campañas.

### - Situación de las estaciones

- Deben seleccionarse emplazamientos estables e inalterables en el tiempo, sin que sea necesario cuidar la mejor nivelación topográfica del entorno (si no se necesita el cálculo de la Anomalía de Bouguer).
- Deben señalizarse los puntos donde se apoyan las patas del trípode en la primera lectura de cada estación en la primera campaña, diferenciando la pata con altura bloqueada.
- De cada estación se hará una descripción y fotografía que permita su identificación.
- No es necesario que las coordenadas topográficas sean exactamente las del punto donde reposa el gravímetro, si no va a efectuarse un cálculo de la Anomalía de Bouguer, lo que permite situar la antena GPS en un lugar próximo (a uno o dos metros) y medir simultáneamente al gravímetro, economizando tiempo.
- El tiempo de desplazamiento entre el lugar de residencia y la zona de trabajo debe ser minimizado.

## 6.3 OPERATIVIDAD DEL GRAVÍMETRO Scintrex CG5

### - Calibración del gravímetro

- Si han transcurrido más de dos años desde la última calibración del gravímetro, debe calibrarse, preferentemente en la misma base de calibración utilizada anteriormente.
- La operación de calibración no puede efectuarse con precisión mejor del orden del 0.01 al 0.02 %.

tendrán en cuenta.

- La exactitud en el valor de la constante de calibración no es un factor importante en microgravimetría, siendo los errores de 0  $\mu$ Gal para anomalías 4D de hasta 1 mGal.
- Sin embargo, la posible variación de la constante de calibración con el tiempo tiene una especial importancia en microgravimetría 4D, ya que si entre las medidas en dos épocas ha variado la constante pero no se ha modificado su valor en el gravímetro, se obtendrá un falso valor de la diferencia de gravedad entre ambas campañas, dando lugar a falsas interpretaciones. Una variación del 0.10 % conlleva un error de 10  $\mu$ Gal en la anomalía 4D, para anomalías estación-base de 10 mGal.

### - Nivelación

- Debe bloquearse una de las patas del gravímetro para que no pueda modificarse la altura del sensor, situando esta pata siempre en el mismo lugar de cada estación.
- Cuando la inclinación (parámetro TILT X Y) es superior 40-50°, el sistema de corrección automática por software no proporciona valores de gravedad correctos.

### - Influencia de los golpes

Un golpe al gravímetro puede provocar un salto permanente en las lecturas. Aunque en condiciones estáticas son fáciles de notar, los golpes puede darse fundamentalmente durante el transporte del gravímetro en la campaña de medición (baches, piedras, curvas, etc.), por lo que solo pueden apreciarse según sea su magnitud, sobre todo si dan lugar a una diferencia muy anómala en el cierre de las lecturas en base. Saltos menores pueden ser fácilmente confundidos con la deriva de trabajo. En cualquier caso, de producirse, no serán observables en las lecturas en las estaciones, aunque repercutirán en el error de las anomalías calculadas por lecturas repetidas en programas distintos.

### - Temperatura

- Existe una deriva de largo término debida a los cambios regulares de temperatura diaria. Para mediciones relativas esta componente quedará incorporada a la deriva de trabajo.
- Se ha comprobado que el gravímetro corrige correctamente los cambios de temperatura, sin que estos se manifiesten en las lecturas de la gravedad: su influencia en el periodo de estabilización del instrumento no es por lo tanto importante.

### - Filtro sísmico

La producción de micro-sismos es continua, pudiendo ser en parte responsables de las oscilaciones de  $\pm 2 \mu$ Gal de las lecturas. Como no es posible registrar en ausencia de este fenómeno natural, la utilización del filtro sísmico puede ser conveniente, máxime cuando es también eficaz para amortiguar el efecto del viento. Los sismos de gran intensidad son claramente notables tanto por las oscilaciones de las lecturas como por el fuerte incremento en la desviación estándar SD, impidiendo el funcionamiento correcto del gravímetro durante varias horas o días. En buenas condiciones de ruido ambiental la SD no debe ser superior a 0.030 mGal.

### - Deriva instrumental

- En el comportamiento del muelle sensor del gravímetro pueden diferenciarse varios tipos de deriva o evolución de las lecturas corregidas de efectos externos: 1/ la deriva estática, o evolución de las lecturas en un punto fijo sin mover el gravímetro, en periodos de al menos 24 horas. 2/ la deriva secular, por lecturas efectuadas en un punto fijo cada 24 horas, tras un reposo de al menos 8 horas del gravímetro. 3/ la deriva de trabajo, por lecturas efectuadas en un punto fijo cada 3-8 horas, moviendo el gravímetro constantemente entre las lecturas, y 4/ la deriva de

- sucesivos cada pocos minutos.
- La deriva estática (DRIFT) es del orden de 0.300 mGal/día y es siempre positiva; la deriva secular puede valer de 0 a 0.100 mGal/día y cambiar de signo; la de trabajo tiene un rango de 0 a 0.500 mGal/día, siendo normalmente negativa, y la de estabilización puede llegar a más de 1 mGal/día, normalmente positiva (los valores aquí indicados son para el gravímetro Scintrex CG5 nº 9122, observados durante las campañas de la Sierra de las Nieves en 2011 y 2012; en otras condiciones los valores pueden ser diferentes). Esta especial complejidad del comportamiento mecánico de estos gravímetros hace necesario el diseño de una operatividad adecuada a las precisiones requeridas en microgravimetría.
- La imprecisión en el cálculo del parámetro DRIFT no introduce errores en las anomalías, ya que la variación a que da lugar durante el tiempo que se tarda en hacer una medida en las estaciones es despreciable o puede ser asumida por la corrección de la deriva de trabajo, dada la linealidad de la deriva estática.
- La deriva secular no afecta al cálculo de las anomalías, siendo no obstante de utilidad para el control del gravímetro y como elemento de ayuda para la selección de los programas con menos desviaciones.
- Puesto que la corrección de la deriva de trabajo se hace de forma proporcional al tiempo transcurrido desde la apertura del programa hasta la lectura en una estación, su valor absoluto aumenta en función del tiempo; sin embargo resulta prácticamente constante para todas las lecturas de los ciclos registrados en una estación, por lo que no contribuye a ecualizar el ritmo de estabilización del gravímetro.
- La deriva que puede llegar a tener mayor repercusión en la precisión final es la de estabilización, no considerada en gravimetría ordinaria.

#### -Estabilización del gravímetro

- Por periodo de estabilización se entiende el tiempo transcurrido desde que se estaciona el gravímetro hasta que sus lecturas evolucionan según el efecto Luni-Solar (LS) y de carga oceánica (CO). Es solamente apreciable en condiciones de registro estáticas de larga duración.
- El periodo de estabilización puede ser superior a las 4 h, llegando hasta 8 h.
- Las lecturas de unos pocos ciclos raramente serán estables en este sentido, aunque puedan presentar oscilaciones inferiores a  $\pm 2 \mu\text{Gal}$  entorno de un valor medio.
- El ratio o deriva de estabilización es bastante diferente en cada ocasión. El comportamiento del instrumento está fuertemente ligado al tipo de movimiento a que haya sido sometido previamente a su puesta en estación.
- La deriva de estabilización suele ser más elevada durante los primeros ciclos de lectura, suavizándose normalmente a lo largo del tiempo de registro.
- Durante el registro de cinco a diez ciclos (unos 10-20 minutos) los valores del efecto LS y de CO son prácticamente constantes para todas las lecturas, sin que tengan por lo tanto una importancia relevante en la evolución de las mismas. Las correcciones de variaciones externas son necesarias en los cálculos del programa porque afectan al valor de la anomalía de la gravedad, al ser diferentes en los tiempos de lectura en base y en estación.
- Los cambios bruscos de temperatura se estabilizan (variable TEMP) en menos de 50 minutos, por lo que el largo periodo de estabilización de las lecturas no puede atribuirse a una adaptación a la temperatura ambiente.
- Para estudios de microgravimetría relativa, a diferencia de la gravimetría absoluta, no es preciso conocer el valor absoluto de las correcciones; solo es necesario corregir la diferencia de las variaciones de gravedad entre los tiempos de lectura de apertura en base y en cada estación.
- Aunque en determinadas horas, y para intervalos cortos (unas horas), la variación debida al efecto de carga oceánica puede considerarse lineal, por lo que si no se efectuara su corrección quedaría incorporada en la deriva de trabajo del gravímetro, es conveniente aplicarla siempre antes del cálculo de la deriva de trabajo.
- La diferencia de corrección por variación de la presión atmosférica durante la duración de un programa es normalmente despreciable, por lo que puede obviarse esta corrección. Si su variación es lineal con el tiempo, quedará incorporada a la deriva. Para su control es suficiente con los datos proporcionados en observatorios meteorológicos situados hasta 30 km de la zona de trabajo.
- La corrección regional hidráulica, por su naturaleza, es la misma para la base y para la estación, y su valor es prácticamente constante durante un tiempo muy superior (meses) al de un programa de lecturas, por lo que no es necesario efectuar esta corrección. La incertidumbre que plantea el cálculo de los efectos del agua a grandes distancias son del mismo orden de magnitud que las diferencias obtenidas con diferentes modelos.
- La variación de corrección por movimiento polar es despreciable para las diferencias de tiempo contempladas en una campaña de medidas.
- Las diferencias entre la corrección Luni-solar CLS calculada por diferentes modelos depende del día y hora, pudiendo llegar a ser de hasta 1.5  $\mu\text{Gal}$ , excepto el modelo de Longman, que proporciona valores hasta 4  $\mu\text{Gal}$  inferiores a los modelos ETGTAT y Berger, que por cuestiones conceptuales deben ser usados preferentemente.
- Las diferencias entre la corrección por carga oceánica CCO calculada por diferentes modelos depende del día y hora, pudiendo llegar a ser de 4  $\mu\text{Gal}$  (aunque normalmente no sobrepasa 0.5  $\mu\text{Gal}$ ), por lo que su selección puede resultar más crítica que para la CLS.
- El alto gradiente de variación del efecto LS podría, en principio, explicar en algún caso las variaciones de las lecturas del gravímetro cuando se opera con segmentos de medición de larga duración (superiores a los 20 minutos), lo que no parece ser el caso de los gradientes de variación del efecto CO, unas treinta veces inferiores.
- La cota prácticamente no afecta al valor de la CLS (para diferencias de hasta 700 m), mientras que diferencias de latitud y longitud en distancias de 20 km pueden dar lugar a variaciones superiores a 0.4  $\mu\text{Gal}$  según el momento del día, idénticas para los métodos de Berger y ETGTAB.
- El método de Schwiderski de CCO puede ser utilizado calculando las correcciones para una posición y cota media de la zona, sin cometer errores superiores a  $\pm 0.1 \mu\text{Gal}$ ; con el método Csr podrían utilizarse unas coordenadas únicas, pero sería conveniente emplear al menos dos grupos de cotas para no introducir un error de  $\pm 1 \mu\text{Gal}$  en desniveles de 700 m; con el modelo Fes sería conveniente utilizar las coordenadas y cotas correspondientes al menos para dos sectores de la zona si las distancias superan los 20 km y los desniveles los 700 m, siendo posiblemente el método más adecuado.
- A pesar de efectuar las correcciones de variaciones externas, subsisten desviaciones-oscilaciones de las lecturas del gravímetro del orden a los  $\pm 2 \mu\text{Gal}$ , y que son debidas a otros fenómenos aparentemente externos al

oscilaciones son debidas a la influencia de las ondas mecánicas ambientales y de sismicidad sobre el periodo del sistema oscilatorio del sensor del gravímetro, así como a desviaciones entre las correcciones efectuadas y los valores reales de variación externa de la gravedad.

- Los efectos de marea y de carga oceánica pueden ser utilizados como elementos de control de que las lecturas del gravímetro evolucionan o no de acuerdo con las variaciones reales de gravedad, utilizando para ello las lecturas desprovistas de corrección LS y CO.

#### 6.5 ERRORES INTRÍNSECOS

- Cada anomalía viene acompañada de un posible error intrínseco, que depende de la **precisión instrumental** ( $\pm 1 \mu\text{Gal}$ ) y de la precisión de las correcciones de las **variaciones externas** de la gravedad, estimada en  $\pm 0.5 \mu\text{Gal}$ .
- Las lecturas en base pueden estar afectadas por un error intrínseco de  $\pm 1.5 \mu\text{Gal}$ .
- La deriva de trabajo asignada a cada estación puede estar afectada por un error intrínseco de  $\pm 2 \mu\text{Gal}$ , por ser el resultado de una diferencia de lecturas.
- Las lecturas en las estaciones pueden estar afectadas por un error de  $\pm 3.5 \mu\text{Gal}$ , al incorporar el de la deriva.
- El valor de la anomalía (diferencia de lecturas estación-base) puede tener un error intrínseco de  $\pm 5 \mu\text{Gal}$ .
- La diferencia de anomalías o anomalía 4D puede tener un error intrínseco de  $\pm 10 \mu\text{Gal}$ .
- El error experimental de cada anomalía viene dado por sus repeticiones de control, cuyo valor máximo aceptable es el error intrínseco.

#### 6.6 ADQUISICIÓN DE DATOS

##### - Desplazamientos

- El gravímetro debe ser desplazado a la región de trabajo al menos con 48 horas de antelación al comienzo de los programas de lectura.
- El transporte del gravímetro debe hacerse con especial cuidado, sobre todo en caminos en mal estado, baches, curvas, frenadas, aceleraciones, etc.
- Idealmente, los tiempos de desplazamiento entre estaciones deben ser lo más iguales posible.
- El vehículo de transporte debe dejarse siempre en el mismo sitio en cada estación, a una distancia mínima de 5 m.

##### - Puesta en estación

- Debe seguirse siempre la misma rutina de estacionamiento del instrumento.
- Una vez nivelado el gravímetro, deben registrarse al menos dos ciclos de lectura, tras los cuales se revisará la nivelación y se lanzarán los ciclos de trabajo.

##### - Número y duración de los ciclos

- Mientras que en los trabajos de gravimetría ordinaria se suele registrar un solo ciclo, en microgravimetría debe efectuarse un mínimo de 5 ciclos de 90 segundos. El utilizar un número más elevado de ciclos se ha verificado que no garantiza una mejor estabilización, dado que el comportamiento del instrumento no es siempre el mismo. Una mayor duración del ciclo solo debe ser contemplada como método para minimizar los efectos del ruido.

##### - Repeticiones de control

- Cada estación debe ser leída al menos en dos programas independientes, siendo preferible tres repeticiones.
- Es recomendable utilizar los ficheros generados por el gravímetro tipo \*.txt, empleando la variable LINE para identificación del número de repetición de una estación, y activar el registro de temperatura externa en la variable ALT.

duración sea como máximo de tres a cuatro horas. No debe dedicarse un programa exclusivamente a repeticiones de control.

##### - La base para el inicio y fin de los programas debe ser única

- Las lecturas más críticas son las efectuadas en la base, ya que de ellas depende tanto el cálculo de la deriva como el de las propias anomalías.

#### 6.7 PROCESO DE DATOS

##### - El proceso de datos consta de las siguientes etapas:

- Cálculo de la CLS y CCO en mGal cada dos minutos, de acuerdo con unas coordenadas y cota que representen las condiciones de la estación.
- Sustitución de la CLS de Longman por la CLS según ETGTAB, interpolada al tiempo exacto de lectura de cada ciclo.
- Inclusión de la CCO por FES, interpolada al tiempo exacto de lectura de cada ciclo.
- **Selección del ciclo de lectura** de cada determinación en base y estación.
- Cálculo de la deriva de trabajo con los ciclos seleccionados en base para apertura y cierre de programa.
- Aplicación de la deriva de trabajo a todos los ciclos leídos en cada estación del programa.
- Cálculo de las anomalías por diferencia entre todos valores leídos en cada estación y el seleccionado para la apertura en base.
- La anomalía asignada a la estación es la calculada para el ciclo seleccionado en cada estación.
- **Análisis y selección de las anomalías obtenidas por repetición de control y cálculo del valor final y su error.**
- **Cálculo de la anomalía 4D y su error.**
- **Evaluación de la fiabilidad de las anomalías 4D.**

##### - Método de selección del ciclo de lectura

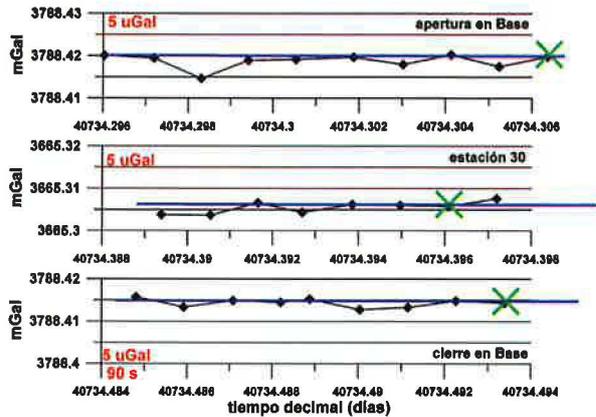
La medición en una estación consiste en registrar varios ciclos, debiendo adoptar un único valor como el que representa la gravedad en ese punto. En gravimetría ordinaria, en la que raramente se efectúa más de un ciclo de lecturas y sólo se considera la cifra de las cmGal, la rutina de campo hace que la lectura se tome siempre aproximadamente al mismo tiempo desde que se instala el aparato, obteniéndose precisiones de  $\pm 0.010 \text{ mGal}$ . Este sería el criterio adecuado si el comportamiento del instrumento fuera aceptablemente el mismo en todas las lecturas; puesto que se ha observado que esto no es así cuando se considera la precisión requerida en microgravimetría, se ha diseñado un sistema para selección de las lecturas, basado en dos tipos de criterios:

- Si la lectura tiende a estabilizarse, o incluso es estable (en el sentido de valores con oscilaciones de  $\pm 1-2 \mu\text{Gal}$ ) durante al menos tres ciclos de lectura consecutivos, se puede adoptar un valor correspondiente a dicho intervalo o su promedio.
- Si las lecturas no se estabilizan, debe comprobarse que el ratio de variación sea aproximadamente el mismo en la estación y en la apertura en base, adoptando entonces las lecturas correspondientes al mismo tiempo desde el inicio de los ciclos.

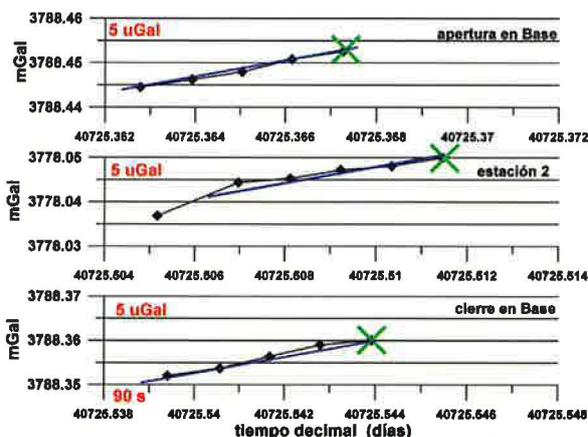
La mejor forma para apreciar el comportamiento del gravímetro y seleccionar las lecturas es a través de su visualización gráfica, utilizando siempre la misma escala para todos los programas.

En el ejemplo de la Figura 11 tanto las lecturas en base como en la estación son muy estables, siendo indiferente el ciclo que se elija para los cálculos, mientras que en casos como el de la Figura 12, en

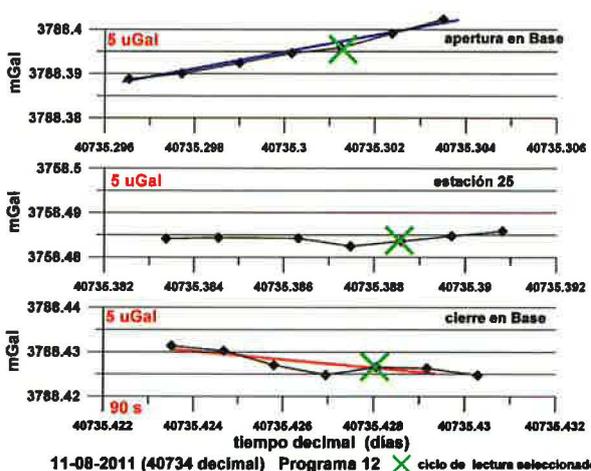
seleccionar el ciclo correspondiente al mismo tiempo de estacionamiento; en el ejemplo de la Figura 13 la selección es mucho más subjetiva, combinando los criterios anteriores.



11-08-2011 (40734 decimal) Programa 12 X ciclo de lectura seleccionado  
Figura 11-Ejemplo de selección de lectura cuando la deriva de estabilización es muy pequeña: no hay ciclo preferente. (Example of low stabilization drift)



2-08-2011 (40725 decimal) Programa 1 X ciclo de lectura seleccionado  
Figura 12-Ejemplo de igual estabilización en la apertura y cierre en base y en la estación: preferencia a seleccionar el ciclo por igual tiempo al inicio de la medición. (Example of the same stabilization drifts at all readings)



11-08-2011 (40734 decimal) Programa 12 X ciclo de lectura seleccionado  
Figura 13-Ejemplo de programa en que las derivas de estabilización son diferentes en apertura, en cierre y en estación. Preferencia a seleccionar el ciclo en el grupo con menor variación. (Example of different stabilization drifts at any reading)

### estación

Para seleccionar los programas que se incluyen en el cálculo de la anomalía final de cada estación se pueden seguir los siguientes criterios, por orden de preferencia (especialmente cuando existan más de dos repeticiones por estación):

- Que el valor de la anomalía calculada en los diferentes programas tenga poca dispersión.
- Debe darse preferencia a la selección de los programas cuya anomalía se halla calculado para mediciones con pendientes de la deriva de estabilización muy suaves y del mismo signo en base y estación, ya que esta condición elimina la ambigüedad en la selección del ciclo de lecturas, optimizando el cálculo de la deriva de trabajo y el de la anomalía.
- De no darse el caso anterior, se puede dar preferencia a la igualdad de pendiente de lectura en la apertura en base y en la estación, ya que permite seleccionar los valores para el mismo tiempo, lo que proporciona mayor confianza al cálculo de la anomalía.
- A falta de otro criterio, será preferente la igualdad de pendientes de lectura en la apertura y cierre en base, que garantiza un cálculo más fiable de la deriva, aunque difiera en las estaciones.
- Una vez rechazados los programas menos fiables, la anomalía final se calcula por promedio de las restantes.
- El error de la anomalía final de cada campaña viene dado por la mitad de la diferencia entre los valores máximo y mínimo utilizados para su cálculo.

La menor dispersión del valor de las anomalías calculadas para todos los ciclos no es el mejor criterio para seleccionar el programa, ya que una pequeña dispersión puede ser debida a lectura en estación muy estable con lectura en base no estable, mientras que una gran dispersión puede darse aun cuando las derivas de estabilización sean iguales en base y estación.



Figura 14- Ejemplo de la representación gráfica utilizada como apoyo al proceso de selección de anomalías y determinación del valor final. (Example of graphics to be used in the campaign anomalies selection)

La representación gráfica, según el esquema de la Figura 14, de las anomalías obtenidas para todos los programas es un método de ayuda aconsejable en el proceso de selección. Para cada estación están representados:

- Rombos negros: valores de las anomalías calculadas para todos los ciclos de lectura en la estación de cada programa (diferencia entre cada lectura y el valor seleccionado para la apertura en base). Su dispersión no es forzosamente un índice del mayor o menor ratio de estabilización en base y/o estación, por lo que debe considerarse simultáneamente al gráfico de lecturas.
- Aspa verde: valor de anomalía seleccionada (diferencia entre lectura seleccionada en la estación y en la apertura en base).
- Se indica con la palabra “no” las anomalías rechazadas como resultado del análisis de los programas

