

Red Gravimétrica del Territorio Histórico de Gipuzkoa

Gravimetric Network of the Historic Territory of Gipuzkoa

M. J. Sevilla⁽¹⁾, E. Velez⁽¹⁾ y J. Zurutuza⁽²⁾

⁽¹⁾Instituto de Astronomía y Geodesia, Facultad de Matemáticas, Universidad Complutense, 28040 Madrid, sevilla@mat.ucm.es, ejevez@mat.ucm.es

⁽²⁾GEO Lan Donosti SL, Portuette 53 b Of. 314, 20.018 San Sebastián (Gipuzkoa), jz@geolandonosti.com

SUMMARY

In the historical territory of Gipuzkoa, a new gravity network has been settled down. The network will be the reference for the future gravity related geodetic tasks. The network has eleven stations with a maximum distance between two consecutive stations of about 20 km. Also, it is connected with the absolute gravity station of the IAG in Madrid by means of a round trip itinerary with gravity measurements in Madrid, Aranda del Duero, Miranda de Ebro and Donostia with distances between stations of about 150 km. This last station of Donostia has been considered as reference station for the itineraries that configure the net of Gipuzkoa. To obtain the gravity values in the 11 stations, three round trip itineraries have been performed, where the starting and closing measure is the station of Donostia.

The used instrument has been a gravimeter LaCoste & Romberg model GRAVITON-EG-1194. The relative precision of this gravimeter is in the order of the 4 or 5 μGal , that together with the absolute gravity value of the station of the IAG in Madrid, which is known with an absolute precision of $\pm 9.0 \times 10^{-8} \text{ ms}^{-2}$, guarantee a final precision of 10 μGal . The coordinates of the stations have been determined by GPS in the WGS84 system. This, together with the software packages used, ensure that the tidal and derive corrections are within the mentioned precision. A total of 924 gravity observations have been made and the adjustment shows a mean standard error of 2 μGal , very below the theoretical precision, what guarantees the reliability of the results.

1. INTRODUCCIÓN

En el territorio histórico de Gipuzkoa se ha establecido una red gravimétrica que tendrá el carácter de fundamental para futuras operaciones geodésicas. Esta red consta de once estaciones con una distancia máxima entre cada dos estaciones consecutivas de unos 20 km. La red está enlazada con la estación de gravimetría absoluta del IAG en Madrid por medio de un itinerario de ida y vuelta con medidas en Madrid, Aranda del Duero, Miranda de Ebro y Donostia con distancias entre estaciones de unos 150 km. Esta última estación de Donostia ha servido como estación fundamental para los itinerarios que configuran la red de Gipuzkoa. Para obtener la gravedad en los 11 puntos se han establecido tres itinerarios de ida y vuelta todos con cierre en la estación de Donostia.

El instrumento utilizado ha sido un gravímetro LaCoste & Romberg modelo GRAVITON-EG-1194. La precisión relativa de este gravímetro está en el orden de los 4 o 5 μGal , lo que, unido a que la gravedad absoluta en la estación del IAG en Madrid, que se conoce con una precisión absoluta de $\pm 9.0 \times 10^{-8} \text{ ms}^{-2}$ permite garantizar la precisión absoluta final de 10 μGal . Las coordenadas de las estaciones han sido determinadas por GPS en el sistema WGS84. Esto, junto a los modelos y programas utilizados, garantiza que las correcciones de marea y deriva estén en el orden de precisión antes mencionado. En total se han realizado 924 observaciones cuya compensación ha dado un error medio cuadrático del ajuste de 2 μGal , muy por debajo de la precisión teórica, lo que garantiza la fiabilidad de los resultados.

2. DESCRIPCIÓN DE LA ZONA DE TRABAJO

Gipuzkoa limita al Norte con el mar Cantábrico (43°30' N), al Este (1°45' E) con Navarra, al Oeste (2°40' E) con Bizkaia y al Sur (42°50' N) con Araba. Su superficie es de casi 2000 km², presentando un relieve en disposición reticular, con valles muy encajados, por los cuales discurren las vías de comunicación. Los pliegues aparecen muy apretados debido a la proximidad del armazón pirenaico (ver figura 1). El diseño de los itinerarios ha sido diseñado en función de las vías de comunicación.

Respecto a la geología, los materiales predominantes pertenecen al Cretácico inferior, junto con materiales del Jurásico y del Paleozóico (ver figura 2).

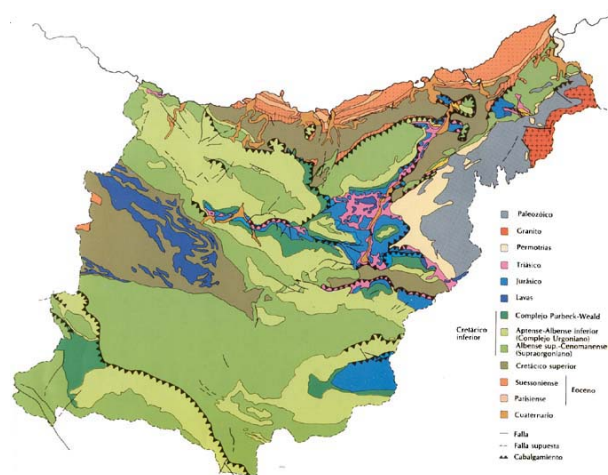


Figura 1 – Mapa geológico de de Gipuzkoa. (Geological map of Gipuzkoa.)



Figura 2 – Red gravimétrica de Gipuzkoa. (Gravimetric network of Gipuzkoa.)

3. ESTACIÓN DE GRAVEDAD ABSOLUTA

La gravedad de base se ha tomado de la estación absoluta de la Facultad de Matemáticas de la UCM en Madrid. El valor de la gravedad en esta estación es de

$$9.79965328 \text{ ms}^{-2} \text{ e.m.c.} = \pm 9.0 \times 10^{-8} \text{ ms}^{-2}$$

Este es el resultado de 4 mediciones realizadas con gravímetros absolutos JILAG-5 (Figura 2) en los años 1989, 1992, 1994 y 1997, las últimas en el nuevo edificio.

La primera medición de la gravedad absoluta en la UCM se realizó entre el 5 y el 11 de mayo de 1989 en colaboración con el Instituto de Geodesia de Helsinki. Se hicieron dos determinaciones absolutas de la aceleración de la gravedad. Estas observaciones fueron efectuadas con un gravímetro absoluto de caída libre denominado JILA (Joint Institute for Laboratory Astrophysics) desarrollado por el Dr. Faller en Boulder, Colorado, Estados Unidos (Makinen Et al., 1990).

Las observaciones se realizaron en los sótanos de la Facultad de Matemáticas y en una dependencia cedida por el Patrimonio Nacional en las proximidades de la estación geodinámica del Valle de los Caídos. Entre estos puntos existe una línea de calibración observada con 6 gravímetros relativos y calculada en función de una referencia convencional. El punto fundamental del Valle se incorpora a la IAGBN (Internacional Absolute Gravity Basestation Network).

La estación de Madrid tiene unas coordenadas de 40.450692 de latitud norte, -3.724042 de longitud oeste y 638.791 metros de altitud ortométrica. La estación del Valle tiene unas coordenadas de 40° 38' 57".1 de latitud norte, -4° 08' 35".9 de longitud oeste y 1212.4 metros de altitud ortométrica. El resultado en esta estación es $g = 9.79884900 \text{ ms}^{-2}$.

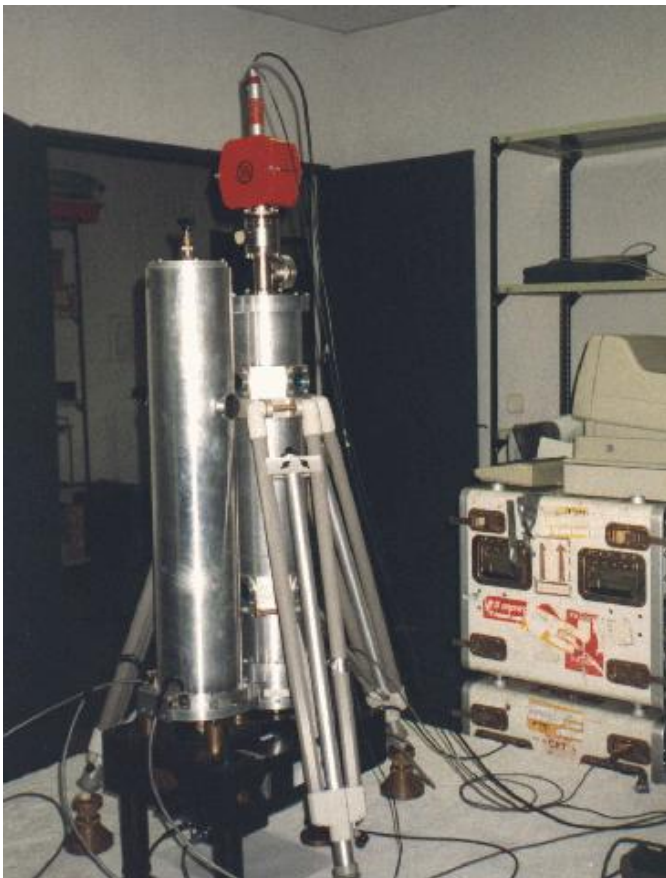


Figura 3 – Estación base absoluta del IAG (IAG Absolute base station.)

4. INSTRUMENTACIÓN

El equipo de observación es un gravímetro relativo Lacoste&Romberg modelo "GRAVITON-EG" nº 1194. Para la toma de parámetros meteorológicos se utilizó una sonda de temperatura

TESTO y un barómetro analógico THOMEN. Se utilizó un flexómetro para medir la altura del sensor sobre las señales de nivelación, a las cuales están referidas las cotas.



Figura 4 – GRAVITON EG5C. (GRAVITON EG5C.)

El gravímetro Lc&R GRAVITON destaca por ser un gravímetro compacto, ya que tanto el sistema de almacenamiento de datos como el de alimentación están incluidos en la misma unidad. Todo el funcionamiento, configuración y operación del gravímetro está controlado por un ordenador, que se maneja a través del teclado alfanumérico integrado en la parte superior del gravímetro, junto al LCD. Los datos son almacenados en la memoria interna y son descargados vía cable serie a un Pc en formato de hoja de cálculo ("csv"). Otra característica importante es su capacidad de autonivelación y de corrección de la nivelación durante la medida, en caso de ser necesario, de forma automática. Estas características le confieren una capacidad de funcionamiento autónomo que reduce al mínimo la actuación del operador sobre el gravímetro, evitando las perturbaciones que pudiesen afectar a la medida. Destaca también por su alta sensibilidad, con resolución de 0.0001 mGal, y repetibilidad de las medidas entre 1 y 3 microgales. En la tabla adjunta se pueden ver las especificaciones técnicas del equipo.

Tabla 1 – Especificaciones Técnicas (Technical Specifications)

Funcionamiento del sistema	Tipo de Sensor	Muelle metálico de longitud cero
	Resolución	24 bit < 0.0001 mGal bit
	Repetibilidad	0.001 mGal / 0.003 mGal
	Rango	Todo el mundo
	Rango térmico de operación	-10 a 45 °C
Interfaz del sistema	Deriva absoluta	< 1.0 mGal/mes / < 0.5 mGal/mes (envejecimiento)
	Pantalla Digital	Monocromo VGA LCD con luz de fondo
	Almacenamiento de datos	Incluido
	Memoria	512 Mb Flash RAM
	Modo de operación	Automático y experto
	Corrección de marea y	En tiempo real

	compensación barométrica	
	Salidas	RS232, Puerto para teclado externo y USB
Nivelación del sistema	Tipo de nivelación	Autonivelación automática, superior a 13° de rango de inclinación. Ajuste a > 3 segundos de arco (0.0005 mGal)
	Sensor	Cerámica en estado sólido
Batería	Duración	> 8 horas (en condiciones típicas)
	Tipo	9 A/h Gel-Cell
Dimensiones	Tamaño y peso	21.5 x 22 x 31 cm 9 Kg

5. MÉTODO DE OBSERVACIÓN

Después de comprobar la conveniencia de utilizar un método u otro de medida (medidas individuales instantáneas, medidas individuales continuas, registro continuo,...) se optó por dejar el gravímetro en registro continuo en cada punto de observación durante al menos 15 minutos, almacenándose un dato cada minuto, con un filtro de 30 segundos para eliminar el ruido de alta frecuencia. Como el gravímetro da la opción de ver, además del valor instantáneo de la medida de g , la gráfica del registro, podemos controlar visualmente la evolución de la observación durante el tiempo de medida y así poder pre-seleccionar el tramo que utilizaremos para el cálculo.

De esta forma, se realizaron un total de 924 medidas durante toda la campaña. Una vez seleccionado los tramos del registro de mejor calidad de señal en cada punto, y eliminando los datos malos dentro de estos tramos, se han utilizado para el cálculo 909 medidas, con un mínimo de 10 medidas en cada observación

6. DESCRIPCIÓN DE LA CAMPAÑA

En el mes de octubre de 2005, entre los días 16 y 19, se llevó a cabo la campaña de medidas de la red. Con anterioridad a la realización de la campaña se había definido la ubicación de los 10 puntos que iban a formar la red, distribuidos de forma homogénea cubriendo la provincia de Gipuzkoa. Durante el desarrollo de la campaña se decidió reubicar alguna de las estaciones buscando una mejora de la calidad de las observaciones. Así pues, la red ha quedado finalmente definida por las siguientes estaciones (por orden alfabético): *Azpeitia*, *Billabona*, *Deba*, *Donostia*, *Elgeta*, *Ezkoriatza*, *Getaria*, *Irún*, *Ordizia* y *Zumarraga*.

Se programaron un enlace de la estación base de Donosti con la estación absoluta de Madrid y tres itinerarios de ida y vuelta en la zona, con inicio y final en la base Donosti. Se procuró que existiese alguna estación común entre los tres itinerarios, además del punto inicial y final. En la siguiente tabla se muestran los itinerarios realizados cada día. En negrilla las estaciones comunes.

Tabla 2 – Itinerarios gravimétricos (*Gravity Itinerary*)

ITINERARIO	16/10/05	Donosti, Deba, Elgeta, Zumarraga , Ezkoriatza
ITINERARIO	17/10/05	Donosti, Getaria, Azpeitia, Zumarraga , Ordizia, Billabona
ITINERARIO	18/10/05	Donosti, Donosti-IGN, Billabona , Irún

Durante los traslados de Madrid a San Sebastián, el primer y último día, se realizaron observaciones, además de en los puntos de partida y llegada, en dos puntos intermedios, Aranda de Duero y

Miranda de Ebro, ambos situados en las estaciones de tren de cada localidad y pertenecientes a la red gravimétrica del IGN.

Así pues, durante la campaña se ha medido en 14 puntos, con un total de 38 observaciones distribuidas según se muestra en la siguiente tabla.

Tabla 3 – Observaciones (*Observations*)

Estación	IDA	IT-I	IT-II	IT-III + VUELTA	TOTAL
Azpeitia			2		2
Billabona			2	2	4
Deba		2			2
Donosti	2	2	2	3	9
Elgeta		2			2
Ezkoriatza		2			2
Getaria			2		2
Irún				2	2
Ordizia			2		2
Zumarraga		2	2		4
Donosti-IGN				1	1
Madrid	1			1	2
Aranda	1			1	2
Miranda	1			1	2
TOTAL	4	10	12	11	38

7. CÁLCULO DE ITINERARIOS

Las medidas de cada estación quedaron registradas junto a los valores de los tiempos de medida, entre otros datos (Ver apéndice 1), y se agruparon por estaciones en los diferentes itinerarios. Los datos quedaron ordenados cronológicamente. En cada itinerario individual se realizó la corrección por marea y seguidamente se determinó la deriva del gravímetro en el itinerario. Las derivas resultantes y los desviaciones típicas se muestran en la Tabla 4

Tabla 4. Derivas gravímetro (*Gravimeter drift*)

ITINERARIO	DERIVA	DESVIACIÓN TÍPICA
Enlace	-0.00625	0.00438
I	-0.00240	0.00301
II	-0.00622	0.00388
III	-0.00232	0.00211

8. CORRECCIONES APLICADAS

El tratamiento de las correcciones a las medidas del gravímetro y cálculos subsiguientes se ha hecho con los métodos estándar de la gravimetría de precisión (Sevilla, 1994, Camacho y Vieira 1990).

- Corrección por efecto marea métodos directo y desarrollo de CARTWRIGHT-TAYLER 484.
- Corrección por fuerza gravitacional variable de la atmósfera: - 0.30 $\mu\text{Gal/mlbar}$ Presión estándar 880. mlbar
- Corrección por gradiente vertical de la gravedad para la altura del gravímetro sobre la estación: -3.086 $\mu\text{Gal/cm}$

9. RESULTADOS

En primer lugar recopilamos los datos que se muestran en la Tabla 5

Tabla 5 – Resumen de observaciones (*Summary of Observations*)

Número de itinerarios	4
Número de estaciones del enlace	3
Número de estaciones de la red	11
Número total de observaciones	924
Observaciones eliminadas	15
Número de observaciones válidas	909

Para el ajuste de utilizaron los métodos de las medias repetidas y la compensación por mínimos cuadrados. Los resultados de las gravedades asignadas a cada estación fueron idénticos por ambos métodos debido a la alta precisión de las observaciones y al pequeño número de estaciones. Un resumen de resultados se ve en la Tabla 5

Tabla 6 – Resumen de resultados (Summary of Results)

Número de observaciones	38
Número de estaciones repetidas	243
Número de ER en IT diferentes	5
Número de itinerarios	4
Número de estaciones	14
Desviación típica a posteriori	1.77 μ Gal

La lista total de resultados para cada estación se muestra en el Apéndice 2.

Además de los cálculos de las gravedades medidas en cada estación se han calculado las gravedades teóricas con la fórmula de Somigliana (Sistema de Referencia GRS80), los gradientes verticales hasta el orden cuatro y, al disponer de las altitudes ortométricas de

las estaciones, también se han calculado las anomalías aire libre y Bouguer incompletas.

Para tener una idea del cambio de gravedad entre los valores de la Red Gravimétrica del IGN (con origen en el IGSN-71, sistema Potsdam 1971) y los de los mismos puntos referidos a la estación absoluta de IAG en Madrid, hemos calculado las diferencias para dos estaciones que se muestran en la Tabla 7.

Tabla 7 – Comparación de sistemas (System comparison)

Estación	Grav. IGN	Grav. IAG	Diferencia
Miranda	980251,62	890251,911	0,291
S. Sebastián	980438,73	980439,172	0,442

10. REFERENCIAS

- CAMACHO, A.G. y R. VIEIRA (1990): Predicción de la corrección de marea en la península Ibérica. Física de la Tierra No. 2, U.C.M. pp. 111-148. Madrid.
- MAKINEN, J., R. VIEIRA, A. G. CAMACHO y M. J. SEVILLA (1990): Absolute Gravity Measurements in Madrid. *Bureau Gravimétrique International. Bulletin D'information* N° 67, pp. 168-172. Toulouse (Francia).
- SEVILLA, M. J. (1994): Análisis de observaciones gravimétricas y cálculo de anomalías. *Publicaciones del Instituto de Astronomía y Geodesia*. N° 188, (64 páginas). Instituto de Astronomía y Geodesia (UCM.CSIC). Madrid,

Apéndice 1 – Datos de observación resumidos (Observation data resumed)

STATION	DATA	ROWS	TIME (GMT)	MEAN(mgal)	sd(yEr±)	se(yEr±)	Min	Max	Range	Sum	N
MADRID	RAWGRAV	[1:17]	11:06:29	3619,46768	0,00379	9,1826E-4	3619,4582	3619,4723	0,0141	61530,9505	17
ARANDA	RAWGRAV	[19:34]	15:36:18	3725,25178	0,00447	0,00112	3725,2431	3725,2583	0,0152	59604,0284	16
MIRANDA	RAWGRAV	[36:53]	17:56:47	3906,1444	0,00548	0,00133	3906,135	3906,1522	0,0172	66404,4548	17
DONOSTI	RAWGRAV	[55:73]	21:02:15	4091,181579	0,0034	7,80706E-4	4091,18082	4091,18241	0,0159	77744,5001	19
DONOSTI	RAWGRAV	[4:22]	06:29:09	4091,96008	0,00645	0,00148	4091,9488	4091,9735	0,0247	77747,2416	19
DEBA	RAWGRAV	[26:40]	08:12:22	4089,43193	0,00421	0,00109	4089,425	4089,4385	0,0135	61341,479	15
ELGETA	RAWGRAV	[46:58]	09:25:46	3996,67845	0,00281	7,79597E-4	3996,6741	3996,6813	0,0072	51956,8199	13
ZUMARRAGA	RAWGRAV	[65:81]	10:25:50	3998,63542	0,00554	0,00134	3998,6243	3998,6433	0,019	67976,8022	17
ESCORTIAZA	RAWGRAV	[95:115]	11:42:17	4000,86905	0,00418	9,1166E-4	4000,8597	4000,8757	0,016	84018,25	21
ESCORTIAZA	RAWGRAV	[130:147]	13:23:36	4000,89796	0,00641	0,00151	4000,8865	4000,9062	0,0197	72016,1633	18
ZUMARRAGA	RAWGRAV	[158:173]	14:33:42	3998,69821	0,00563	0,00141	3998,6879	3998,7054	0,0175	63979,1713	16
ELGETA	RAWGRAV	[182:196]	15:35:48	3996,72067	0,00631	0,00163	3996,711	3996,7314	0,0204	59950,8101	15
DEBA	RAWGRAV	[210:221]	16:55:08	4089,45969	0,00638	0,00184	4089,4523	4089,4707	0,0184	49073,5163	12
DONOSTI	RAWGRAV	[232:241]	18:21:02	4091,9485	0,0018	5,69795E-4	4091,9445	4091,9502	0,0057	40919,485	10
DONOSTI	RAWGRAV	[6:24]	06:39:08	4091,9789	0,00759	0,00174	4091,9624	4091,9887	0,0263	77747,5991	19
GETARIA	RAWGRAV	[27:47]	08:27:14	4080,88194	0,00451	9,83857E-4	4080,8701	4080,8869	0,0168	85698,5207	21
AZPEITIA	RAWGRAV	[53:73]	09:38:51	4059,99515	0,00395	8,62019E-4	4059,9868	4060,0017	0,0149	85259,8982	21
ZUMARRAGA	RAWGRAV	[76:94]	10:48:02	3998,66893	0,00565	0,0013	3998,6546	3998,6757	0,0211	75974,7097	19
ORDIZIA	RAWGRAV	[97:115]	11:45:30	4026,18992	0,0093	0,00213	4026,173	4026,2013	0,0283	76497,6084	19
BILLABONA	RAWGRAV	[118:136]	12:35:16	4065,48145	0,00673	0,00154	4065,4652	4065,4907	0,0255	77244,1475	19
BILLABONA	RAWGRAV	[140:161]	14:25:51	4065,52504	0,00925	0,00197	4065,5072	4065,5381	0,0309	89441,5508	22
ORDIZIA	RAWGRAV	[168:186]	15:19:17	4026,30304	0,0067	0,00154	4026,2919	4026,3149	0,023	76499,7577	19
ZUMARRAGA	RAWGRAV	[194:210]	16:11:55	3998,72995	0,00524	0,00127	3998,7217	3998,7374	0,0157	67978,4092	17
AZPEITIA	RAWGRAV	[216:233]	17:15:26	4060,03416	0,00613	0,00144	4060,0218	4060,0428	0,021	73080,6149	18
GETARIA	RAWGRAV	[245:261]	18:22:06	4080,90706	0,00186	4,49913E-4	4080,9045	4080,9104	0,0059	69375,4201	17
DONOSTI	RAWGRAV	[266:284]	19:24:09	4091,89671	0,00512	0,00117	4091,8875	4091,9065	0,019	77746,0374	19
DONOSTI	RAWGRAV	[11:38]	06:44:29	4091,92224	0,00788	0,00149	4091,9074	4091,936	0,0286	114573,8226	28
DONOSTI-IGN	RAWGRAV	[46:70]	07:35:26	4093,42735	0,00457	9,32252E-4	4093,4173	4093,4373	0,02	98242,2564	24
DONOSTI	RAWGRAV	[73:95]	08:18:27	4091,92271	0,00654	0,00136	4091,912	4091,9319	0,0199	94114,2223	23
BILLABONA	RAWGRAV	[103:117]	09:14:06	4065,55615	0,00418	0,00108	4065,5487	4065,5613	0,0126	60983,3422	15
IRUN	RAWGRAV	[124:150]	10:25:36	4104,28413	0,00466	8,96949E-4	4104,2729	4104,2929	0,02	110815,6714	27
IRUN	RAWGRAV	[158:177]	11:30:24	4104,28323	0,00669	0,0015	4104,2713	4104,2955	0,0242	82085,6647	20
BILLABONA	RAWGRAV	[181:189]	12:30:08	4065,50124	0,00463	0,00154	4065,4928	4065,5073	0,0145	36589,5112	9
DONOSTI	RAWGRAV	[226:240]	15:24:32	4091,91713	0,0046	0,00119	4091,9082	4091,9224	0,0142	61378,7569	15
MIRANDA	RAWGRAV	[241:259]	17:49:38	3906,14784	0,00934	0,00214	3906,1315	3906,1597	0,0282	74216,8089	19
ARANDA	RAWGRAV	[272:291]	20:29:22	3725,16692	0,00205	4,58618E-4	3725,1642	3725,1711	0,0069	74503,3383	20
MADRID	RAWGRAV	[304:326]	23:29:49	3619,47074	0,00274	5,71965E-4	3619,4667	3619,4758	0,0091	83247,827	23

Apéndice 2 – Resultados definitivos (Final results)

NUM	NOMBRE	LATITUD	LONGITUD	ALTITUD	GRAVEDAD	A.A.L
9001	MADRID	40.450692	-3.724042	638.791	979965.328	-47.601
9002	ARANDA	41.668628	-3.696697	779.000	980071.009	-7.796
9003	MIRANDA	42.690406	-2.940947	463.000	980251.911	-16.372
3	DONOSTIA	43.320883	-1.982658	7.279	980437.687	-28.114
1	DEBA	43.294733	-2.353678	5.364	980435.170	-28.860
5	ELGETA	43.136908	-2.487506	468.109	980342.456	35.454
9	ZUMARRAGA	43.087917	-2.320289	355.360	980344.450	7.087
8	EZKORLATZA	43.015969	-2.529200	284.590	980346.689	-6.013
2	GETARIA	43.303119	-2.204436	28.499	980426.601	-31.048
6	AZPEITIA	43.185675	-2.261344	84.520	980405.736	-24.020
10	ORDIZIA	43.052664	-2.179103	146.736	980372.016	-26.532
7	BILLABONA	43.185283	-2.052658	57.650	980411.286	-26.726
1003	DONOSTI-IGN	43.317450	-1.977783	6.080	980439.172	-26.689
4	IRUN	43.337833	-1.788944	21.083	980450.029	-13.044