

1878

GEOMETRÍA y FÍSICA
en la cumbre del MULHACÉN,
observaciones del Instituto Geográfico
(1878-1931)



1931

MARIO RUIZ MORALES
Real Sociedad Geográfica

No es muy conocido el hecho de que durante la Revolución francesa tuvo lugar una iniciativa científica que llegaría a cambiar el mundo, al haber logrado superar el caos metrológico por entonces imperante. Tras varios proyectos baldíos, resultó determinante la Comisión creada por la Academia de Ciencias de París en febrero de 1791, de la que formaban parte los matemáticos franceses más relevantes de la época. De entre todos ellos ha de recordarse a Jean-Charles de Borda (1733-1799), por haber sido él quien propuso el metro como patrón universal de todas las medidas lineales; asociándolo finalmente a la diezmillonésima parte del cuarto de meridiano terrestre¹. De esa forma quedó el metro indefectiblemente unido a la forma esférica de la Tierra, decidiéndose la medición del mayor desarrollo del arco correspondiente para evaluar el metro con la mayor exactitud posible.

Con tal fin se prolongó el meridiano de Francia a ambos lados de la capital, y más adelante hasta la isla de Formentera, coincidiendo con la guerra de la independencia. Cuando Carlos Ibáñez e Ibáñez de Ibero (1825-1891), estaba midiendo la base central de Madrideojos (1853-1859), se produce un encuentro entre él y Aimé Laussedat (1819-1907), enviado por la Academia de Ciencias de París para que informase sobre esa operación geodésica; el encuentro fue decisivo pues ambos se mostraron de acuerdo en solicitar a sus respectivos gobiernos prolongar aún más el meridiano anterior hasta enlazarlo con las costas africanas, a través de la red triangular establecida sobre el litoral del litoral del S.E. andaluz. El propio Ibáñez dio cuenta de sus intenciones, veinte años después:

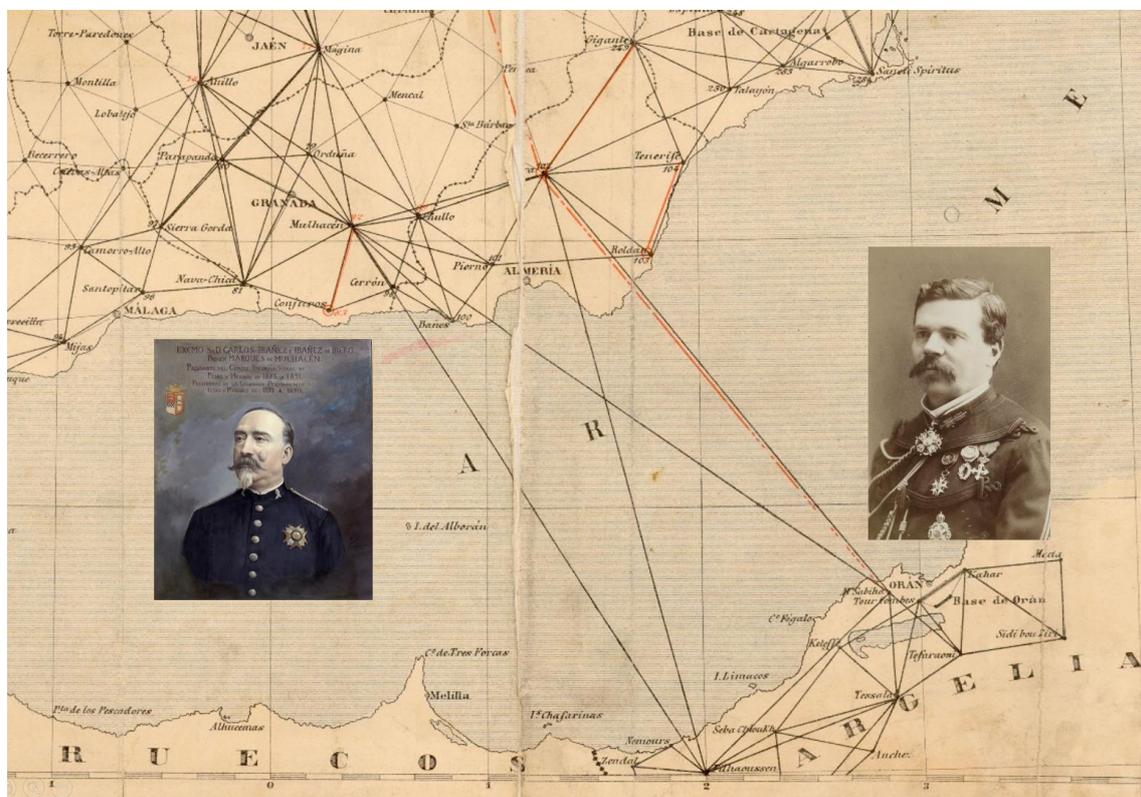
«...con motivo de la medición de la base central de España en las llanuras de Madrideojos, uno de nosotros, el entonces Coronel Ibáñez, y el Capitán francés Laussedat, que había venido a España con objeto de seguir la marcha de tan importante operación, se ocuparon, de común acuerdo, en la posibilidad de llevar a cabo el enlace geodésico de ambos continentes, recordando que más de una vez los Oficiales españoles, al hacer el reconocimiento de los picos más elevados del Sur de la Península, habían distinguido desde uno de ellos el contorno de la tierra africana».

¹ La implantación del Sistema Métrico Decimal no fue inmediata ni siquiera en Francia, si bien es cierto que en sus inicios lo usaron científicos y burócratas, además de una generación de escolares que llegó a estar familiarizada con el mismo, gracias a un sistema educativo fuertemente unificado y controlado; solo quedó definitivamente establecido en el año 1837. En España, Isabel II sancionó la ley que entró en vigor el 19 de julio de 1849, decretando la implantación del sistema métrico decimal para su pleno funcionamiento administrativo a partir de 1853 y para el resto de ciudadanos en 1860.

Por parte francesa también se tenía la certeza de que las cumbres de Sierra Nevada eran visibles desde el litoral africano, así lo manifestaba Francois Perrier (1833-1888) en la memoria que leyó ante la Academia de Ciencias el 18 de noviembre de 1872:

«Les crêtes des sierras espagnoles sont visibles à l'œil un, par les temps favorables de tous les points géodésiques du premier ordre compris entre Oran et la frontière du Maroc, en recoupant les sommités principales de ces crêtes dentelées, j'ai constaté que deux d'entre elles, dont la forme est très caractérisée, restaient toujours visibles, et pouvant ainsi fournir une base d'appui pour passer d'Espagne en Algérie au moyen de triangles gigantesques, dépassant en longueur tous ceux qui ont été tentés jusqu'ici».

FIGURA 1



Cuadrilátero del enlace geodésico entre España y Argelia. *Red Geodésica Fundamental y de primer orden de España, por el Instituto Geográfico y Estadístico*. Escala del original 1: 1500000. Año 1899. Las líneas rojas continuas indican que se determinó su acimut, y las discontinuas que se calculó la diferencia de longitudes entre sus dos extremos. El circulito rojo se situó en el vértice en que se obtuvo su latitud. Se han superpuesto las imágenes de C. Ibáñez (i) y de F. Perrier (d).

F. Ferrier y C. Ibáñez², sobre todo, fueron los artífices principales del enlace intercontinental, que con tanto acierto dirigieron, una vez que los gobiernos de España y Francia decidieron ponerlo en marcha. Los preceptivos reconocimientos previos se llevaron a cabo en el verano de 1878, a propuesta del segundo, una vez concretados los vértices del cuadrilátero. Mulhacén y Tetica, en España, Filhaoussen y M'Sabiha, en Argelia. C. Ibáñez designó al geodesta Fernando Monet y Urionagoena³ (¿-1914) para que hiciese una primera observación en los dos vértices españoles, aunque también debería ligar el lado que formaban con la red geodésica de primer orden⁴. Cincuenta y seis días tuvo que permanecer el geodesta en la cumbre del Mulhacén, desde el 4 de agosto al 28 de septiembre. Uno de sus cometidos fundamentales fue dirigir, mediante un heliógrafo, la luz solar hacia los dos vértices argelinos, desde donde debería ser visada por los militares franceses. En cuanto a sus observaciones, solo consiguió divisar la luz procedente de Filhaoussen la víspera de su partida hacia la Tetica de Bacares⁵, el día 27 de septiembre. Fue entonces cuando midió el ángulo formado por las direcciones materializadas por el Mulhacén y los dos vértices anteriores; resultando un valor de $72^{\circ} 29'$ y una distancia cenital⁶ de $91^{\circ} 31'$. En ningún instante la luz procedente del vértice M'Sabiha.

Los resultados conseguidos en el resto de los vértices del cuadrilátero, muy acordes con los que se obtendrían al año siguiente durante la campaña definitiva, confirmaron el hecho de que entre abril y octubre en raras ocasiones habría intervisibilidad diurna; únicamente se podrían divisar coincidiendo con el orto o el ocaso del Sol, antes o después de la lluvia. Por otra parte, se comprobó que el uso de los heliotropos no era recomendable; de modo que resultaba imprescindible el empleo de señales luminosas

² C. Ibáñez gozaba de un merecido prestigio internacional desde que midió la base de Madrudejos. En 1870 fue nombrado Director del Instituto Geográfico, en 1874 fue elegido Presidente de la Asociación Internacional de Geodesia y en 1875 alcanzó la Presidencia del Comité internacional de Pesas y Medidas.

³ Había ingresado en el Instituto Geográfico como Coronel de Estado Mayor.

⁴ Realmente no fue F. Monet el primero en efectuar una observación geodésica en el vértice Mulhacén. La primera observación, propiamente dicha, se realizó, sobre un pilar construido en la parte más elevada del pico, durante el día 14 de agosto del año 1863. Dicha operación estaba integrada dentro de las propias de la Red Geodésica de España, que se había iniciado unos años antes con la medición de la base central de Madrudejos, en la provincia de Toledo. El Mulhacén era el vértice central del hexágono formado por Parapanda, Orduña, Chullo, Cerrón, Conjuros y Navachica; midiéndose los ángulos formados por las seis direcciones radiales correspondientes. En los años siguientes se van configurando el resto de los triángulos que tenían al Mulhacén como vértice común, cuya observación permitió calcular su altitud de 3481 m de un modo bastante más riguroso que los anteriores procedimientos barométricos.

⁵ Allí se instaló el día 10 de octubre.

⁶ Da idea de la pendiente de la visual, se trata del ángulo que forma con la vertical física (complementario de su altura sobre el horizonte).

nocturnas muy potentes. El periodo observacional era pues muy limitado: antes del fin de agosto eran impracticables por la reverberación del cielo argelino y hacia finales de septiembre, con la llegada de los primeros fríos, la nieve podría cubrir de repente la cima del Mulhacén. Trasladas sus conclusiones a los respectivos gobiernos, se produjo el oportuno intercambio de notas diplomáticas en marzo de 1879. El enlace estaba por tanto formalmente decidido, designándose en la misma fecha a C. Ibáñez y a F. Perrier como directores del mismo. De acuerdo con sus directrices, se efectuaron las recomendaciones siguientes: I) Los geodestas operarían en sus propios territorios, II) las observaciones serían simultáneas en los cuatro vértices, III) durante el día se emplearían heliotropos y durante la noche luz eléctrica en las cuatro estaciones del cuadrilátero y IV) todo el instrumental sería idéntico, así como los métodos de observación.

FIGURA 2



Grabado del vértice geodésico del Mulhacén. Se observa en la cumbre la tienda de la observación y a su izquierda dos de las casetas construidas para la observación del año 1879. La imagen que lo acompaña es la del geodesta Joaquín María Barraquer y Rovira (1833-1906), responsable último de las observaciones angulares en dicho vértice .

De inmediato se procedió a preparar tanto los instrumentos, y accesorios necesarios para la observación, como la ejecución de las obras imprescindibles para el transporte e instalación de los mismos. Centenares de soldados y obreros fueron destinados a ese menester durante meses, en España y en Argelia, para abrir los caminos que llevarían a los cuatro vértices. Mientras que en Argelia, el personal podría guarnecerse en tiendas de campaña o en aldeas próximas, en el Mulhacén y en el Tetica resultaba obligado construir abrigos sólidos; el geodesta Juan Borrés Segarra⁷ partió de Madrid el 5 de junio con esa misión. En primer lugar, concluyó el camino de acceso al vértice almeriense, así como dos casetas, desplazándose después al Mulhacén para hacer lo propio, llegando allí el 28 de junio. Hacia finales del mes de julio todo el material de observación y campamental salió de Madrid y de Paris, para llegar a su destino casi un mes después. Para ello tuvieron que superar toda clase de obstáculos, sobre todo al adecuar el acceso y la estación asociada a ese último vértice, el caso es que para entonces: «Las cuatro estaciones del cuadrilátero estaban instaladas y los observadores en sus puestos⁸».

Las dificultades que presentaba el vértice Mulhacén hicieron que Carlos Ibáñez quisiera participar personalmente en las observaciones que se harían desde él, o al menos reconocer la instalación y comprobar el funcionamiento de los instrumentos y maquinarias anexas. Con esa intención se presentó en el campamento del vértice el día uno de septiembre. Sin embargo, resultó vano su empeño, tal como él mismo explicaba en el resumen de la operación que presentó a la Real Academia de Ciencias Exactas Físicas y Naturales⁹:

«Y a verlo fui a Mulhacén, como punto de mayor peligro, por si mi presencia allí hubiera sido en cualquier concepto necesaria, e impulsado además por la ambición científica de escribir, en los cuadernos de campaña tan memorable, algunas observaciones propias, hechas desde la cumbre altísima de la Alpujarra: más ni mi cooperación personal y auxilio moral se necesitaban, ni pude satisfacer

⁷ A la sazón Comandante de Ingenieros del Ejército.

⁸ En el mes de abril de 1879 se la había asignado al geodesta y coronel Barraquer la dirección de las operaciones sobre el territorio español, dependiendo de él los geodestas Vicente López Puigcerver (1844-1911), Borrés, así como Príamo Cebrian Yusti (1847-¿). Barraquer sería el observador principal del vértice Mulhacén y López Puigcerver el del Tetica, auxiliado por Clodoaldo Piñal y Rodríguez (1844-1912). En Argelia, el comandante Jean Antoine Léon Bassot (1841-1917), ayudado por los capitanes Sever y Koszutski, se responsabilizó de las observaciones en el vértice Filhaoussen; mientras que F. Perrier se responsabilizó de las relativa al M'Sabiha, contando con capitanes Defforges y Derrien como asistentes.

⁹ *Enlace geodésico y Astronómico de Europa y África. Notas presentadas a la Real Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, por sus individuos D. Carlos Ibáñez y D. Miguel Merino.* Madrid.1880.

tampoco el disculpable deseo, que constituía el segundo objeto de mi viaje. Tan pronto como llegué a la cima de la cordillera, el 1º de Septiembre, desatóse un temporal furioso de aguas, vientos y nieves; oscurecióse por completo el horizonte; descendió a 10 bajo cero el termómetro centígrado, y todo quedó paralizado. Con algunos ratos de bonanza, tres días permanecimos así, sin poder hacer más que rectificar la situación de los aparatos, poner en movimiento las máquinas, producir la luz eléctrica, y simular y ensayar el trabajo futuro de observación, en la previsión de cuantas contingencias pudieran, por diversidad de motivos, presentarse. A los tres días de estancia en aquellos lugares, tuve con harta dolor que abandonarlos, para trasladarme a la ciudad de Ginebra, donde muy en breve debía reunirse bajo mi presidencia la Asociación Internacional de Geodesia».

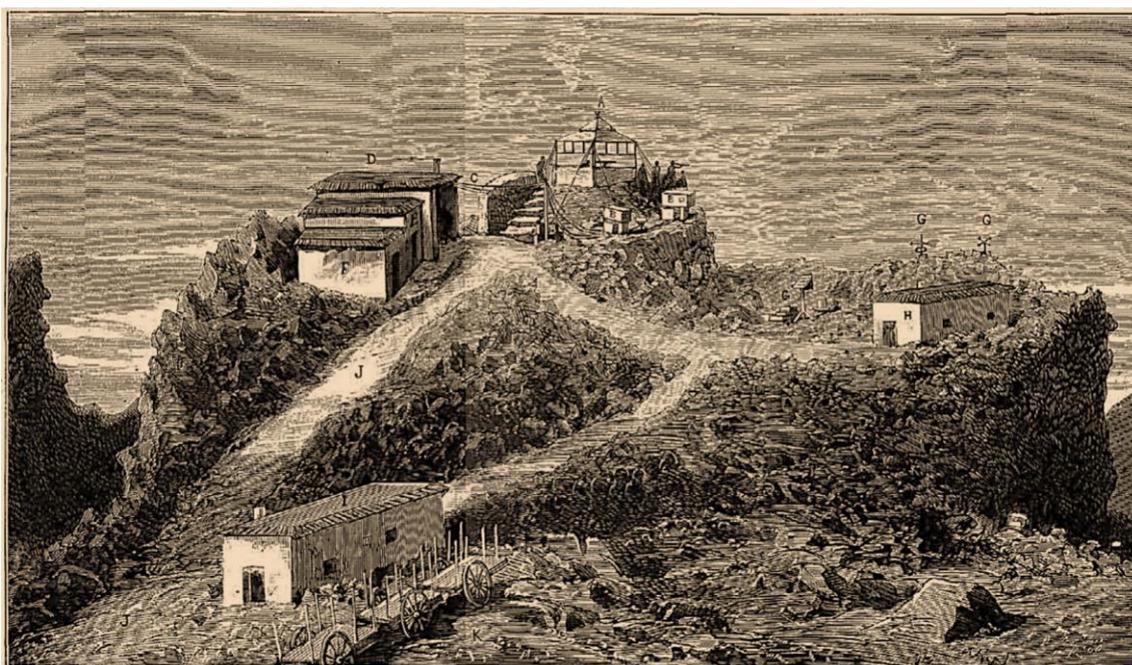
Carlos Ibáñez sería recibido en el vértice por Joaquín M. Barraquer, el cual estaba allí desde el 27 de agosto y ya había dispuesto la instalación de todas las máquinas e instrumentos, dejando todo listo para el comienzo de los trabajos. No obstante, durante la mayor parte del periodo que permanecieron los operadores en el Mulhacén el tiempo fue bueno y podían otear el horizonte africano con la necesaria paciencia. Desde la salida del Sol ya estaban preparados los heliotropos apuntando a los tres vértices restantes y en cuanto que oscurecía los haces luminosos iluminaban los lados que lo unían con los vértices argelinos; a pesar de ello no aparecía señal alguna. Más de veinte días transcurrieron hasta que el 9 de septiembre, después de una copiosa lluvia que limpió la atmósfera, fueron visibles las señales eléctricas procedentes de los cuatro vértices del cuadrilátero. Ese mismo día comenzaron las observaciones, pues fueron visibles durante la noche las luces procedentes de los otros tres vértices. Así continuaron durante las noches de los días 11, 12 y 13. Las interrupciones impuestas por el mal tiempo hicieron que no pudieran reanudarse hasta los días 16 y 17. El día 21 J. Barraquer tuvo que trasladarse a Madrid, pero las observaciones pudieron continuar durante los días 22, 23 y 29, dejando de ser visibles todas las señales a partir de ese último día¹⁰. La espera de los geodestas en el vértice Mulhacén concluyó el día 3 de octubre, al recibir un telegrama enviado desde Madrid por J. Barraquer, anunciando el fin de la campaña, felizmente ultimada al haber finalizado también los trabajos en Tetica, M'Sabiha y Filhaoussen. La unión geodésica entre Europa y África ya

¹⁰ En el Tetica finalizaron el 30 de septiembre, en M'Sabiha el 1 de octubre y en el vértice Filhaoussen el 30 de septiembre.

era una realidad, y el día 9 de octubre se abandonó definitivamente el campamento del Mulhacén.

Inmediatamente después, F. Perrier y el astrónomo Miguel Merino y Melchor (1831-1905) transformaron respectivamente los vértices de M'Sabiha y Tetica en observatorios astronómicos provisionales, con la intención de obtener en ellos la latitud, el acimut de una dirección¹¹ y la diferencia de longitudes entre ambos lugares; de esa forma el enlace anterior además de geodésico fue también astronómico. Lamentablemente no se tuvo la precaución de fotografiar el campamento geodésico instalado en el vértice Mulhacén, solo se acompaña la Memoria correspondiente del sencillo grabado que se reproduce en las páginas previas. No obstante, el lector puede hacerse una idea bastante cabal gracias al cuidadoso grabado que publicó la celebrada revista *La Ilustración Española y Americana* (Año XXIV. Nº IX), el 8 de marzo de 1880, y que figura junto a estas líneas.

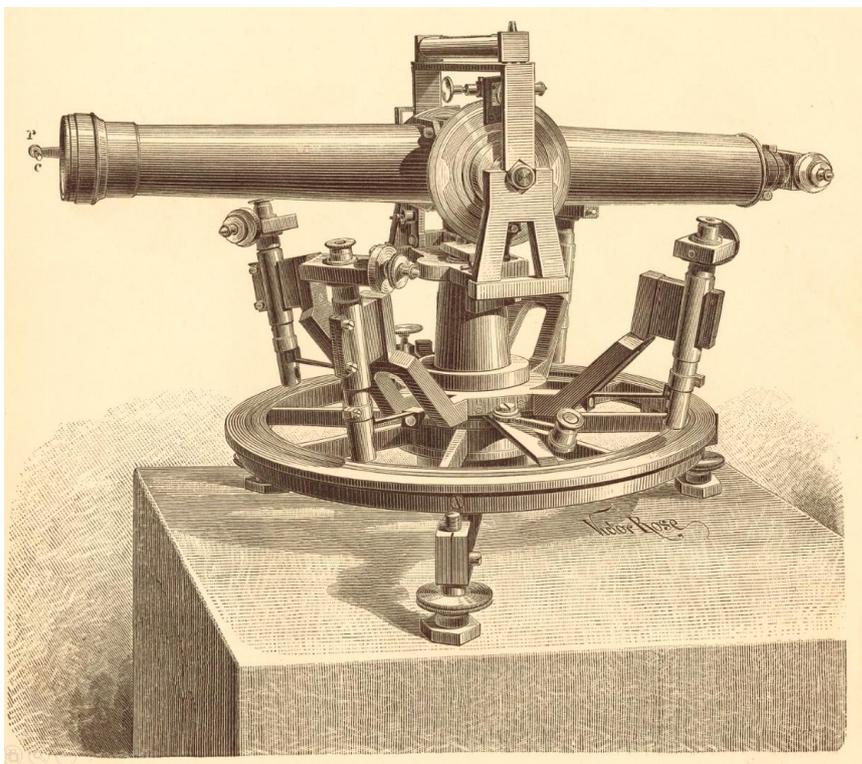
FIGURA 3



Campamento geodésico en el vértice Mulhacén, aspecto que presentaba a finales del mes de agosto de 1879. En él se identificaron los siguientes elementos: A. Tienda de observación; B. Reflectores para dirigir la luz eléctrica; C. Alumbres conductores; D. Cobertizo para la máquina de vapor y aparatos electromagnéticos; E y F. Habitación de los maquinistas y depósito del material de reserva; G. estación meteorológica; H. habitación de los geodestas; I. Id. de los auxiliares y destacamento de tropas; J. camino practicado para la subida de material; K. Carretas empleadas en los transportes.

¹¹ El operador en el vértice argelino fue el capitán Defforges.

En cada uno de los vértices, los geodestas tuvieron que concretar el valor angular de las diferentes direcciones observadas, para calcular en función de ellas el valor de los ángulos formados por los ángulos y las diagonales del cuadrilátero de enlace. Una vez obtenidos los valores más probables de los mismos, se determinaría el desarrollo de los cuatro lados y de las dos diagonales; en función del lado Mulhacén Tetica, obtenido a su vez a partir de la longitud de la base de Madridejos y de los triángulos geodésicos que la ligaban al mismo. El instrumento matemático con el que se efectuaron tales mediciones fue un teodolito de anteojo central, construido en los prestigiosos talleres parisinos de los hermanos Brunner¹². Aunque se le conociera con la denominación formal de *Cercle Azimutal Réitérateur*, constaba además de un pequeño círculo vertical de 10 cm de diámetro, el cual facilitaba las punterías, a una altura determinada, en la dirección de las señales luminosas. En cualquier caso, sus elementos esenciales eran un gran limbo graduado de 42 cm de diámetro, un anteojo y cuatro microscopios montados alrededor de un eje común, de manera que dicho limbo y la alidada no se tocaban en ningún punto, pudiendo girar alrededor del mismo de forma totalmente independiente el uno del otro. **FIGURA 4**



Bella imagen del Círculo Acimutal Reiterador, construido en los talleres de los hermanos Brunner. El dibujo con rayado cilíndrico fue firmado por Victor Rose.

¹² El fundador de la firma fue Jean Brunner (1804-1862), al que le sucedieron sus hijos Emile (1834-1895) y Leon (1840-1841), quienes acuñaron el nombre *Brunner frères*

La metodología observacional obligaba a efectuar las medidas en diferentes sectores del limbo, realizándose sesenta y una series, de ocho punterías, a cada una de las señales. J. Barraquer fue el encargado de dirigir el anteojo a cada vértice y de efectuar la puntería correspondiente, así como de tomar las lecturas del tambor ocular; mientras que los otros dos oficiales, Borrés y Cebrián, leían el índice y los microscopios del limbo¹³. Una vez ajustados estadísticamente los datos observados (lecturas angulares), se obtuvieron los valores expuestos a continuación:

DIRECCIONES MÁS PROBALES¹⁴

Tetica-----	0° 0' 0".0000
Filhaoussen-----	287 30 31.3151
M'Sabiha-----	309 59 22.8944

En función de tales valores y de los homólogos determinados en los otros tres vértices pudieron calcularse primeramente los valores de los ángulos formados por los lados y las diagonales del cuadrilátero de enlace, así como las longitudes de todos ellos. Carlos Ibáñez presentó ante la Real Academia de Ciencias Exactas Físicas y Naturales los valores siguientes:

Mulhacen—Tetica.....	82827 ^m ,6
Mulhacen—M'Sabiha.....	269847 ,8
Mulhacen—Filhaoussen. . .	269927 ,2
Tetica—M'Sabiha.....	225713 ,6
Tetica—Filhaoussen . . .	257413 ,0
Filhaoussen—M'Sabiha.....	105178 ,4

Valores de los lados y diagonales del cuadrilátero de enlace.

Al concluirse con éxito una empresa tan ambiciosa como singular, nunca hasta entonces se habían observado triángulos con lados próximos a los 270

¹³ Ambos se alternaron en el manejo del anteojo, al efectuar las observaciones posteriores a la partida de J. Barraquer.

¹⁴ Esos valores se modificaron ligeramente al reducirlos al centro de la estación y al eje de los vértices visados, teniendo en cuenta que las distancias al centro fueron las siguientes: reflector dirigido a M'Sabiha (6^m.920), reflector dirigido a Filhaoussen (6^m.905), colimador dirigido a Tetica (4^m.140).

km y casi tangentes a la superficie del mar, España se situó de nuevo en los anales de la geodesia. Las repercusiones en el mundo científico no se hicieron esperar, en el mes de diciembre de ese mismo año 1879 se publicó el artículo *La jonction géodésique et astronomique de l'Europe et de l'Afrique*, cuyo autor fue Adolphe Hirsch (1830-1901), astrónomo director del Observatorio de Neuchâtel (Suiza). La información que aportó fue tan concreta, que debió de habérsela proporcionado alguno de los protagonistas; así se deduce al ser el firmante Secretario de la Asociación Geodésica Internacional y presidir esta Carlos Ibáñez. En honor a él escribió lo siguiente: «Es así como el General Ibáñez, tras veintiún años de gestiones personales y oficiales, ha visto coronado con éxito un proyecto que será referente en la historia de la geodesia¹⁵».

FIGURA 5



Interesante fotografía de los componentes de la Asociación Geodésica Internacional, junto a algunos de sus familiares, durante la inauguración del Observatorio de Niza. En ella figuran además de C. Ibáñez y F. Perrier, otros de los geodestas que participaron en el enlace hispano argelino; también se ha identificado al autor del artículo anterior (A. Hirsch) y a H. Perrotin, director del citado Observatorio.

No hay duda por tanto de que el general español fue el principal divulgador de tan relevante enlace geodésico, máxime cuando también presidía el Comité Internacional de Pesas y Medidas, desde que fuera creado por la Convención del Metro en 1875. Carlos Ibáñez tuvo pues la doble satisfacción, geodésica y metrológica, de haber codirigido el referido enlace. Por una parte, contribuyó decisivamente a que se pudiese prolongar el arco del meridiano terrestre desde las Islas Shetland, al Norte del Reino Unido,

¹⁵ C'est ainsi que le général Ibanez, après vingt et un ans de démarches personnelles et officielles, a vu couronné du succès le plus complet un projet qui marquera dans les annales de la géodésie.

hasta las costas argelinas; con la posibilidad de extenderlo aún más a través del continente africano. Gracias a ello se pudo calcular con mayor certidumbre el aplastamiento polar de la Tierra y por tanto el semieje ecuatorial del elipsoide de revolución que le sirve de modelo, con el mérito añadido de poder estudiar la simetría de su figura en latitudes tan meridionales como la de Ciudad del Cabo. En segundo lugar, ha de destacarse su contribución metrológica, puesto que de esa forma se pudo definir el metro con mayor fiabilidad¹⁶.

Todos los datos ya referidos, junto a los pormenores del enlace geodésico y astronómico fueron incluidos en una publicación internacional rigurosa preparada al efecto: *Jonction géodésique et astronomique de l'Algérie avec l'Espagne, exécutée en commun en 1879, par ordre des gouvernements d'Espagne et de France, sous la direction de M. le général Ibañez,... pour l'Espagne, M. le colonel Perrier,... pour la France*. Imprimerie Nationale. Paris. MDCCCLXXXVI; luego traducida al español e integrada en las memorias del Instituto Geográfico y Estadístico. Indudablemente, con ella aumentó aún más el prestigio del director del Instituto Geográfico y Estadístico. El gobierno de España tardó diez años en sumarse al homenaje, a través del Real Decreto del 7 de febrero de 1889, por el que se le concedió Título de reino con la denominación de Marqués de Mulhacén; el cual fue firmado por la Reina regente del Reino María Cristina de Habsburgo-Lorena el día 11 de junio en el palacio de Aranjuez.

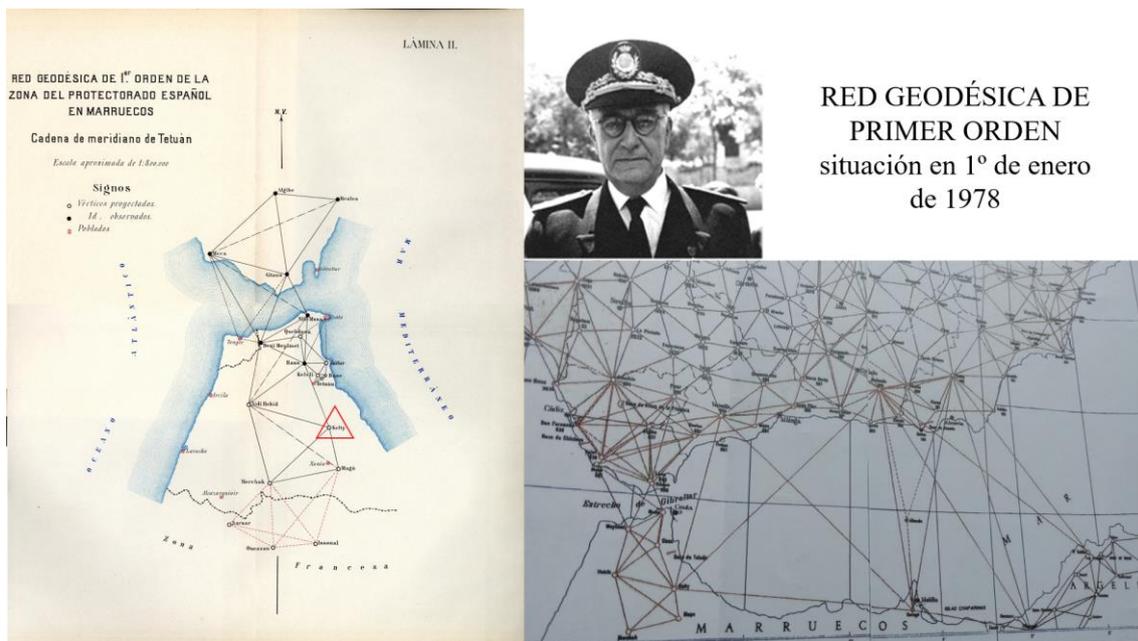
En aquel entonces, Carlos Ibáñez ya residía en Niza¹⁷ y había dimitido como director del Instituto, aunque nunca se aceptase su petición; su salud ya era muy delicada y su ánimo escaso, según se desprende de la carta que escribió a su amigo Laussedat el 21 de diciembre de 1889: «Aún continúo en la misma situación administrativa que cuando dejé París, es decir mi dimisión no ha sido aceptada ni he recibido el menor reconocimiento oficial ni privado». A pesar de su triste situación, ostentó con legítimo orgullo el

¹⁶ Como homenaje a tan relevante personaje científico, me parece oportuno reproducir el último párrafo de la Nota Necrológica incluida por la revista Gaceta Industrial y Ciencia Eléctrica el día 10 de marzo de 1891: «Baste y sobre con lo que precede para dejar sentado que el General Ibáñez, como dice una Real orden de 23 de Octubre de 1875, es una de las glorias científicas de España, y para que su nombre, ya imperecedero por las obras que ha publicado, despierte sentimientos hidalgos de respeto y de admiración en sus compatriotas, que en la vida de aquel sabio han de aprender no más á dónde puede conducir un claro talento al servicio de una gran voluntad y ayudado por el infatigable amor al trabajo, que era la virtud más saliente del fallecido General, virtud siempre y en todas partes loable; pero más en España que en ninguna otra nación, ya que nuestro peculiar modo de ser raramente nos inclina á practicarla».

¹⁷ Allí fue acogido por Henri Joseph Anastase Perrotin (1845-1904), astrónomo director del Observatorio de Niza y amigo personal de Carlos Ibáñez e Ibáñez de Ibero.

título de Marqués de Mulhacén; plasmándolo en alguno de sus escritos, aunque ocasionalmente lo hiciera solo con el nombre de Mulhacén¹⁸.

Al finalizar la campaña anterior se abre un prolongado paréntesis que tarda en cerrarse más de cincuenta años, al acometerse otra serie de enlaces geodésicos. De entre todos ellos merecen ser destacados aquí los grandes cuadriláteros del Mar de Alborán, observados a lo largo de los años 1931, 1932, 1933 y 1934; los operadores de campo que los ejecutaron ya no fueron geodestas sino ingenieros geógrafos, el Cuerpo del Instituto Geográfico y Estadístico que los sustituyó a partir de su creación en el año 1900. Todos estos trabajos fueron supervisados desde el Servicio de Geodesia, al frente del cual se encontraba el ingeniero geógrafo Manuel Domínguez Vázquez (1866-1939). Dentro de la última campaña indicada tuvo lugar la segunda expedición científica al Mulhacén, otra vez organizada por el referido Instituto Geográfico. **FIGURA 6**



Cadena geodésica a lo largo del meridiano de Tetuán, sobre la que se marcó la posición del vértice dividido desde el Mulhacén. Se presenta también un fragmento del mapa de la red geodésica en el que figuran los cuadriláteros de enlace sobre el mar de Alborán. Se ha superpuesto la imagen de Fernando Gil Montaner, con el uniforme de gala propio del Cuerpo de ingenieros geógrafos.

¹⁸ En la actualidad ostenta el título un tataranieta de Carlos Ibáñez e Ibáñez de Ibero, llamado Alexandre Albert Otto Dupont-Willemin. he aquí la disposición legal: «De conformidad con lo previsto en el Real Decreto de 27 de mayo de 1912, este Ministerio, en nombre de S.M. el Rey, ha tenido a bien disponer que, previo pago del impuesto correspondiente, se expida, sin perjuicio de tercero de mejor derecho, Real Carta de Sucesión como Marqués de Mulhacén, a favor de don Alexandre Albert Otto Dupont-Willemin, por fallecimiento de su padre, don Albert Louis Henri Dupont-Willemin. Madrid, 20 de mayo de 2022.–La Ministra de Justicia, María Pilar Llop Cuenca».

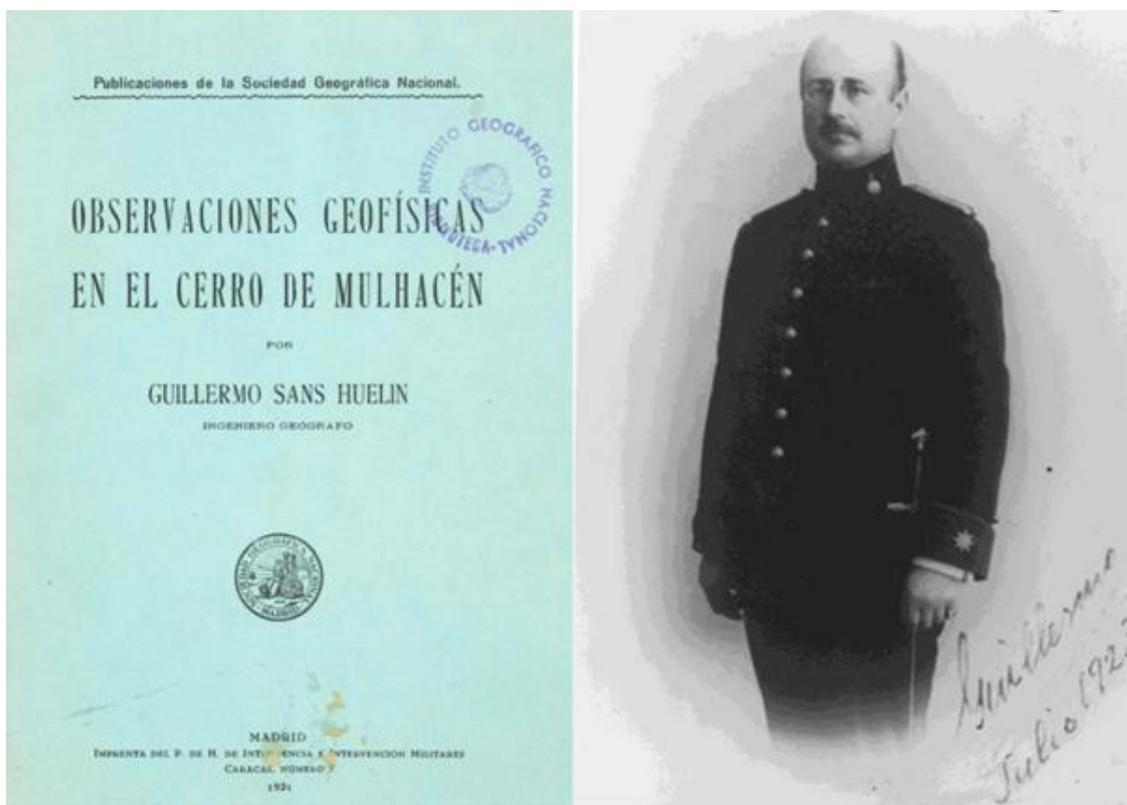
En su transcurso se efectuó de nuevo el enlace intercontinental dirigido, como los otros, por el ingeniero geógrafo Fernando Gil Montaner (1887-1954), quien previamente (1931) tuvo que reconstruir el vértice en un punto próximo al pilar que había ocupado el primitivo, el cual había desaparecido muchos años atrás¹⁹. Tras un minucioso cálculo de la estación excéntrica se llegó a la conclusión de que la posición del antiguo vértice estaba dada, desde el nuevo pilar de observación, por un acimut de 59° 14' 24'' y una distancia de 3.919 m. En las observaciones angulares, comenzadas en julio de ese mismo año, participaron otros dos ingenieros geógrafos: Ramón Darda Valenzuela y Luis Cadarso González; los cuales lograron divisar el vértice africano del Gurugú, conformándose de esa manera el enlace geodésico de España con Marruecos. En esa ocasión se divisaron también, desde el Mulhacén, el vértice de la isla de Alborán, el vértice Gurugú y el vértice Kelty perteneciente a la cadena que discurría a lo largo del meridiano de Tetuán. Los trabajos se repetirían años después, en la década de los cincuenta, dentro de un programa destinado a ampliar la base complementaria de Almería.

En la cumbre del Mulhacén se efectuaron además dos series de observaciones relacionadas una con la geodesia dinámica, también llamada gravimetría, y otra con la geofísica; ambas tuvieron lugar durante la segunda quincena del mes de agosto del año 1931. En la primera de ellas se determinó la intensidad de la fuerza de la gravedad, por parte de la brigada gravimétrica del Instituto Geográfico Catastral y Estadístico²⁰ dirigida por el ingeniero geógrafo Guillermo Sans Huelin (1881-¿). El instrumental se instaló en la caseta que habían utilizado los geodestas en 1879, aunque

¹⁹ El vértice Mulhacén fue el mojón común a los términos Municipales de Capileira, Güejar Sierra y Trevélez. Así se hizo constar en el acta de deslinde levantada al efecto: «Reunidos el día 24 de julio de 1931 en el sitio denominado Mulhacén los señores que con sus respectivos cargos y representación abajo se expresan, previa citación hecha por el ingeniero jefe de la tercera brigada topográfica de la provincia de Granada...*Primer mojón*. Se reconoció como tal un montón de piedras de forma cilíndrica cuyas dimensiones son: un metro de diámetro en su base por un metro y ochenta centímetros de altura. Se encuentra situado en el sitio denominado Mulhacén en lo más alto de la divisoria, en terreno erial de propietario desconocido por los señores presentes. este mojón tiene horizonte en todos sentidos y es vértice geodésico de primer orden...». Junto a la firma de los representantes de los Ayuntamientos de Capileira y de Trevélez (los de Güejar Sierra no asistieron) figura la del Topógrafo del Instituto Geográfico que redactó el acta: Joaquín Pastor Sánchez. Tanto él como Justo Trotonda, otro topógrafo del Instituto, fueron los encargados del levantamiento topográfico de la línea límite entre los Términos Municipales de Capileira y de Trevélez; siendo conformado el cuaderno de campo por el referido Jefe de la tercera Brigada, el ingeniero geógrafo José de la Viña Navarro (1889-¿).

²⁰Esa era entonces la denominación formal del Instituto Geográfico.

hubo que proceder a su reconstrucción²¹, como explicó con todo detalle el citado ingeniero²²: **FIGURA 7**



El ingeniero geógrafo Guillermo Sans Huelin, en 1923, junto a la portada de su obra sobre las observaciones practicadas en el vértice Mulhacén, durante la segunda quincena del mes de agosto del año 1931.

«Para la instalación de los aparatos y albergue del personal se utilizó la construcción que sirvió de vivienda a los geodestas del Instituto Geográfico en el mes de septiembre de 1879, en ocasión del enlace geodésico de España con Argelia. Dicha construcción, de muros gruesos (80 cm), y cuya primitiva techumbre plana de lajas pizarrosas, al estilo del país, fue remplazada en años posteriores, al ser transformada en ermita²³, en tejado de chapa de cinc a dos aguas sobre la correspondiente armadura de madera, se encontraba muy deteriorada, salvo los muros, pues le faltaban diez y siete vigas de la armadura y la casi totalidad de la cubierta de cinc, así como la única puerta de acceso. Hubo, pues, que proceder, como operación preliminar, a la reparación del pequeño

²¹ El material necesario fue transportado en mulos desde Órgiva, en dos etapas. En la primera se alcanzó Capileira, pasando por Pampaneira y Bubión. En la segunda etapa se recorrió en cinco horas menos cuarto el trayecto entre Capileira y el Mulhacén.

²² *Observaciones Geofísicas en el Cerro de Mulhacén*. Boletín de la Sociedad Geográfica Nacional. Tomo LXXI. Año 1931. pp: 497-509). También fue editado por el Patronato de Huérfanos de Intendencia e Intervenciones Militares, en ese mismo año.

²³ «Durante los últimos años y antes de que se viniera abajo la techumbre por el peso de la nieve, se acostumbraba a celebrar anualmente una función religiosa el 5 de agosto bajo la advocación de Nuestra Señora de las Nieves, con gran concurrencia de vecinos de los pueblos más cercanos».

edificio, cuyas dimensiones interiores, 7.6 por 2.6 metros, aunque reducidas, permitían el montaje de los diversos aparatos gravimétricos y la colocación de las camas de campaña para el personal de la brigada».

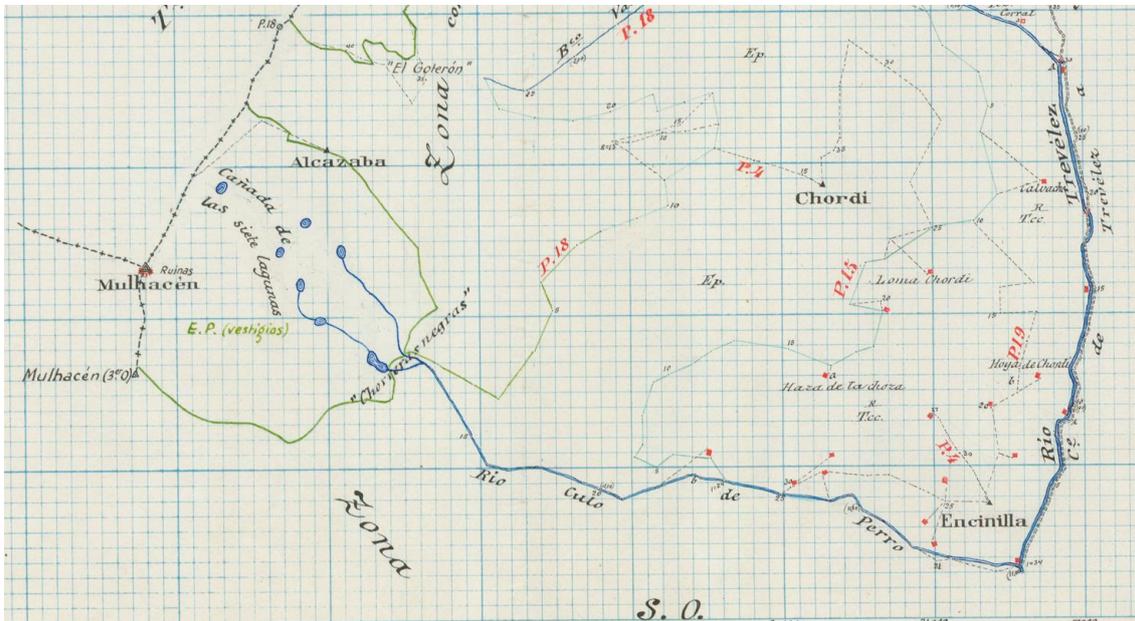
Para la instalación de todo el instrumental requerido hubo que adecuar el interior del antiguo refugio de los geodestas, comenzando por construir junto al altar un pilar para situar sobre él el aparato de péndulos²⁴, colocando junto a este el reloj Strasser con péndola de medio segundo. Asimismo, se preparó una mesa pequeña, en la que se situó el aparato de observación de las coincidencias de los péndulos y de la péndola del reloj. A continuación, se instaló el cronógrafo Favag, de punzones, para el registro de los segundos del reloj y de las señales horarias transmitidas por las emisoras extranjeras. Cerca de la entrada estuvo el aparato de radio que recibía dichas señales, tendiendo la antena, en dirección SO-NE, entre el techo de la habitación y la esquina de otra de las construcciones del año 1879. «La audición de emisoras...como Torre Eiffel, Burdeos y Rugby fue excelente, así como la de la mayoría de las estaciones europeas de *broadcasting*, que se percibían con casco con la intensidad de un altavoz y que proporcionaba, después de cenar y concluida ya la tarea diaria, un magnífico recreo para los que habitábamos aquellas ingentes soledades».

Las observaciones pudieron efectuarse con normalidad por las buenas y excepcionales condiciones meteorológicas, haciendo que la temperatura del interior no variase más de cinco grados, logrando obtener por tanto buenas series de lecturas pendulares concordantes entre sí. El Sol lució a diario, marcando el termómetro exterior temperaturas que fluctuaron entre 20° y 27°.5, y a la sombra, durante el día, de 9°.5 a 15°. De madrugada la mínima correspondió al 31 de agosto con 2°.8 sobre cero. La presión barométrica leída en un altímetro compensado Goulier se mantuvo prácticamente constante en torno a los 510 milímetros. G. Sans Huelin dejó constancia de que se notaba fatiga al menor esfuerzo, por esa disminución de la presión atmosférica, junto a una aceleración de las pulsaciones; aunque también cantase algunas excelencias:

«La visibilidad no fue en general buena durante la temporada de permanencia en el Cerro y solo un par de días se distinguieron las montañas africanas. Sobre el Mediterráneo se vio permanentemente un mar de nubes. Sin embargo, hubo tardes en que se pudo apreciar la inmensidad del panorama que se abarca desde

²⁴ Identificados después con los números 104, 105, 106 y 107.

aquel observatorio, único para conocer la orografía andaluza, panorama que se calcula comprende sesenta mil kilómetros cuadrados a simple vista. También disfrutamos de algunas soberbias puestas y salidas de Sol, con el efecto sorprendente del inmenso cono de sombra proyectado por el Cerro sobre el horizonte». **FIGURA 8**



La Cañada de las Siete Lagunas, donde nace el Río Culo de Perro. Fragmento de la Planimetría del Término Municipal de Trevélez, firmada por el Topógrafo del Instituto Geográfico Francisco López Vázquez, el 29 de febrero de 1932. Las ruinas que figuran en el vértice Mulhacén parecen indicar que los trabajos de campo se realizaran antes de dicha reconstrucción, aunque se firmasen en la fecha señalada.

El relator decidió iluminar su amena exposición con siete fotografías extremadamente valiosas para la historia de la gravimetría, téngase en cuenta que por aquel entonces la estación gravimétrica del Mulhacén era la de mayor altitud de Europa, (≈ 3480 m), y una de las más elevadas del mundo; solo superada por tres de la India²⁵. La primera de ellas fue tomada cuando se inició el ascenso al vértice y ofrecía una bonita panorámica de Capileira²⁶, «al que le prestan carácter las techumbres horizontales de sus casas...Se construyen estos tejados planos colocando sobre una vigería muy tupida de trocos, apenas descortezados, lajas de pizarra que se recubren a su vez con una capa de arcilla magnesífera, llamada *launa* por los naturales de la comarca, y que mezclada con agua constituye un verdadero cemento impermeable».

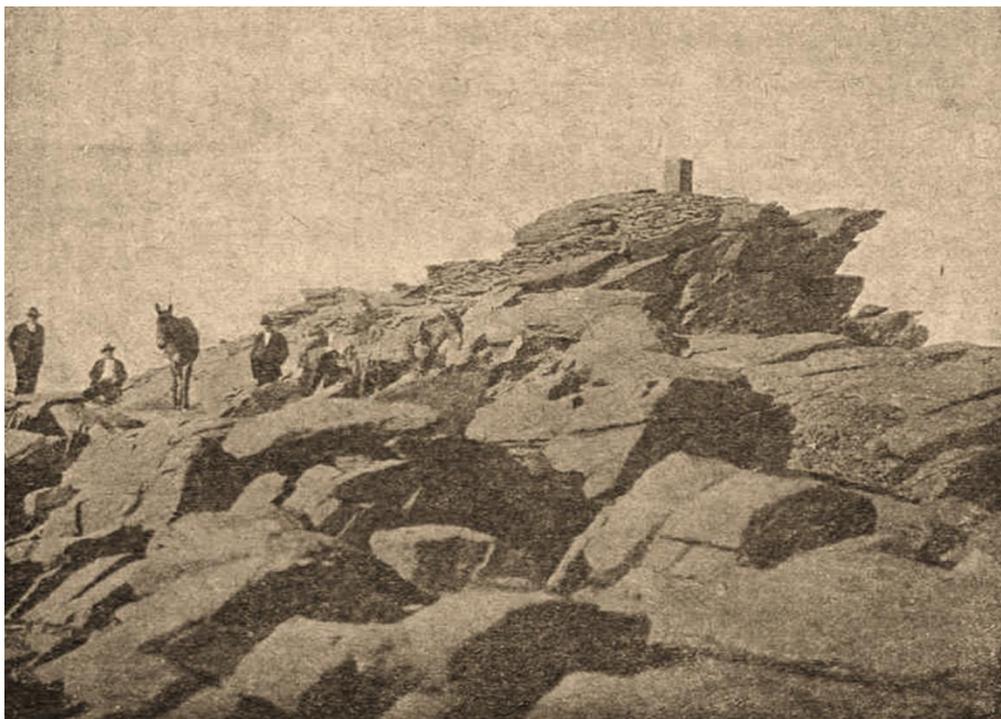
²⁵ Observadas por Bertram Beresford Osmaston (1868-1961), que tuvieron una altitud de 3777, 3903 y 4057 metros, respectivamente.

²⁶ G. Sans Huelin ya había tratado de aclarar el origen de ese topónimo

La segunda fotografía representó el entorno del vértice Mulhacén, destacando el pilar prismático cuadrangular construido en el mes de julio de 1931 por los ingenieros geógrafos Dorda y Cadarso, ya mencionados. Sobre él se estacionó el teodolito de primer orden con el que divisaron vértices del litoral africano, como el situado en el Monte Gurugú (próximo a Melilla), iniciándose así el nuevo enlace geodésico de España con Marruecos. **FIGURA 9** y **FIGURA 10**



Panorama de Capileira. *Observaciones Geofísicas en el Cerro de Mulhacén*, (1931)



El nuevo vértice Mulhacén, sustituto del construido en el año 1879. *Observaciones Geofísicas en el Cerro de Mulhacén*, (1931)

La tercera fotografía presenta una vista de la caseta construida para los geodestas que participaron en la Campaña del año 1879, tal como quedó después de la reparación. G. Sans Huelin la resumió en los siguientes términos:

«para ello se empleó chapa acanalada de cinc en sustitución de la chapa plana del mismo metal, cuyos restos eran aún visibles, y se cerró el acceso a la misma con sólida puerta de madera de pino claveteada, sin llave y provista de cerrojo interior y exterior, con lo que se facilita la utilización ulterior del edificio como albergue para los excursionistas al encontrar la entrada libre».

Las fotografías cuarta y quinta no son tan significativas como las anteriores, si bien se recoge en la primera de ellas el entorno tan irregular del suelo en que se asentaba el vértice geodésico, «constituido por grandes rocas sueltas de pizarra trabajadas y fisuradas por una erosión secular», apareciendo también una vista parcial del pabellón que se acababa de reconstruir. La segunda fotografía era la clásica estampa contemplada desde la cúspide del Mulhacén, con la cumbre del Veleta en el centro de la misma. G. Sans Huelin hizo una ajustada descripción del panorama dividido:

«...La laguna que se ve en el fondo del paisaje es la Laguna de la Caldera, asentada en el centro de un gran circo, remoto glaciar cuaternario en opinión de los geólogos. Tiene esta laguna, que tuvimos ocasión de visitar a nuestro descenso del Cerro, un diámetro superior a los 250 metros, con una altitud de 3060 metros, y se le consideraría que ocupaba el fondo de un cráter si no fuese por la naturaleza pizarrosa del terreno...Desde la Laguna de la caldera subían el agua en cántaros hasta el Cerro, a los geodestas y demás personal que intervinieron en el enlace de España con Argelia».

La fotografía número seis es quizás la más representativa de todas las seleccionadas por G. Sans Huelin, en tanto que figuran a la entrada del pabellón, en que fueron instalados los instrumentos de observación, los componentes del equipo encargado de manejarlos, a saber: «de izquierda a derecha y de pie, el Topógrafo don Félix Creus, el Ingeniero D. Luis Cifuentes, y el autor de estas líneas, y sentado el portamira D. Alejandro Monroy». **FIGURA 11 y FIGURA 12**



Albergue del vértice Mulhacén, reconstruido en el año 1931; destaca la chapa acanalada colocada en su cubierta. *Observaciones Geofísicas en el Cerro de Mulhacén, (1931).*





FIGURA
12

Fotografías, cuarta (s) y quinta (i).

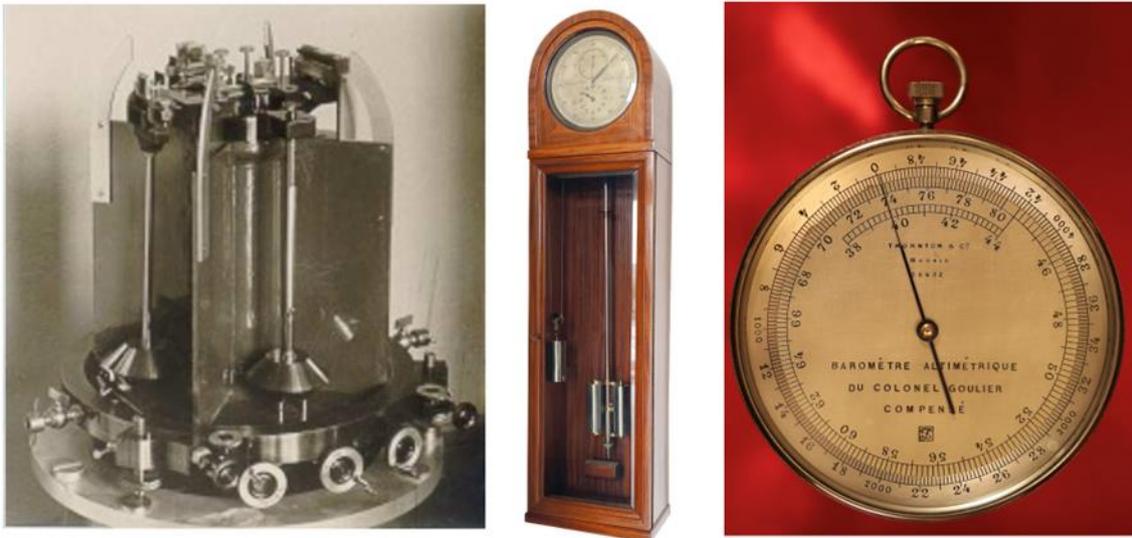


FIGURA 13

Los componentes de la brigada gravimétrica, del Instituto Geográfico Catastral y de Estadística, delante de la caseta recién reconstruida. El director de la misma, Guillermo Sans Huelin, es el último que está de pie y a la derecha (con chaleco y boina). *Observaciones Geofísicas en el Cerro de Mulhacén*, (1931).

La séptima y última fotografía, seleccionada por el autor, refleja nuevamente las múltiples fracturas de las rocas en las proximidades del vértice; observándose al fondo las cumbres que dominan la altiplanicie del Marquesado del Cenete, «por la que los sismólogos señalan el paso de la línea sismotectónica Guadix-Almería y que ha sido objeto de una investigación gravimétrica realizada por el que suscribe con la balanza de torsión Eötvös- Schweydar del Instituto Geográfico durante los meses de Junio y Julio últimos».

FIGURA 14



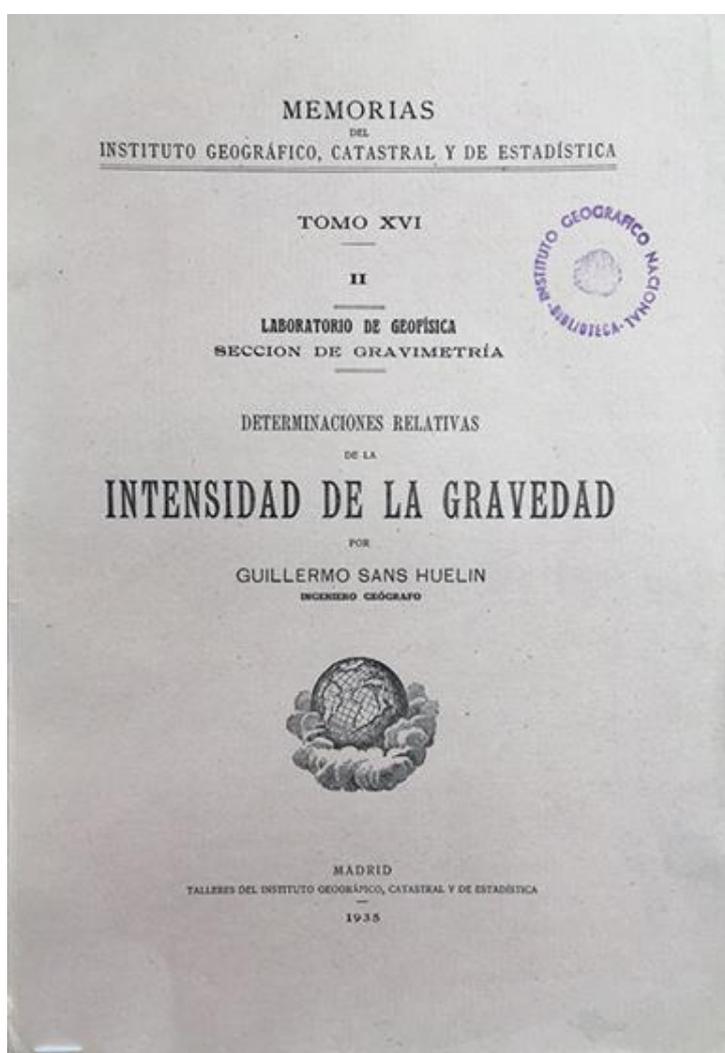
Instrumento pendular de Robert von Sterneck (1839-1910), junto a un reloj construido por Johann Strasser y al barómetro altimétrico del Coronel Charles-Moÿse Goulier (1818-1891).

Es un tanto sorprendente que en este artículo sobre el vértice Mulhacén, no incluyera el autor algunos de los datos obtenidos en su cumbre e incluso un adelanto del valor esperado para la aceleración de la gravedad. Si bien es cierto que las observaciones realizadas en él formaban parte de un programa más amplio, desarrollado a todo lo largo de la campaña de 1931, y que los cálculos definitivos requerían un periodo de tiempo más prolongado; todo parece indicar que G. Sans Huelin quiso informar de inmediato sobre sus actividades en una estación gravimétrica singular y tan señalada para la historia de las ciencias de la tierra en España. El mismo resumía el objeto de esa campaña, con estas palabras:

«En el año 1931 alternaron las observaciones con balanza de Torsión Eötvös-Schweydar en las Llanuras del Marquesado, altiplanicie de cota media de 1000 metros al norte de Sierra Nevada, con un perfil transversal de estaciones de péndulo a través de esta, integrado por las cuatro estaciones siguientes: Guadix,

vértice de primer orden -Mulhacén-, Capileira y Órgiva. Se proyectó dicho perfil, de orientación SO-NO, para estudiar la variación de g sobre macizo montañoso tan importante, pudiendo considerarse como formando parte de este perfil a la estación de Motril, en la costa mediterránea, observada en 1921».

Los pormenores de los datos obtenidos en esa campaña y de los cálculos consiguientes fueron objeto de la siguiente publicación: *Determinaciones relativas de la Intensidad de la Gravedad*, por Guillermo Sans Huelin (Ingeniero Geógrafo); publicada en 1934 por los talleres del Instituto Geográfico Catastral y de Estadística²⁷.



²⁷ También se incluyeron los de la campaña de 1932, con estaciones en Lorquí (Murcia) y en el fuerte Taquigriat (Marruecos) próximo al vértice Gurugú. Este trabajo es la segunda parte de otro, con el mismo título, también incluido en el tomo XVI de las Memorias del Instituto Geográfico. En esa primera parte se detallaron los trabajos gravimétricos efectuados durante las campañas de 1929 y 1930. Esta publicación fue editada asimismo en forma de separata.

Antes de referir los datos gravimétricos observados, es obligado comentar, aunque sea sumariamente, los principios básicos que informan la metodología seguida para su captación. Las medidas clásicas de la intensidad de la gravedad fueron pendulares, siendo dos los métodos empleados. En primera aproximación se evaluaba en función de la fórmula del péndulo simple, es decir partiendo de la relación existente entre la longitud del péndulo, su periodo de oscilación y la propia gravedad. O en términos analíticos: $T = 2\pi (L/g)^{1/2}$, equivalente a $g = 4\pi^2 L/T^2$. Cuando la evaluación se realizaba en un determinado lugar y usando exclusivamente un equipo pendular, la medición era absoluta. Otra posibilidad era diferencial, o relativa, en tanto que se fijaba el valor de la magnitud en función de otro dado; requiriéndose por tanto un mínimo de dos estaciones gravimétricas. En ese segundo caso se plantearían dos ecuaciones: en la primera se cumpliría que $g_1 = 4\pi^2 L_1 T_1^2$ y en la segunda $g_2 = 4\pi^2 L_2 T_2^2$, de modo que resulta evidente la relación $g_1/g_2 = L_1 T_1^2 / L_2 T_2^2$; consiguientemente, en el supuesto de que las longitudes de los dos péndulos fuesen idénticas, la intensidad de la gravedad en la segunda estación se podría expresar, en función de la obtenida en la primera, mediante la expresión $g_2 = g_1 T_2^2 / T_1^2$. En Granada, la primera medida de la intensidad de la gravedad fue absoluta y se localizó la estación gravimétrica en una sala del Colegio de los Escolapios; siendo Eduardo Escribano García²⁸ (1862-¿) el geodesta, del Instituto Geográfico y Estadístico, encargado de la operación. La medición se efectuó en el año 1897, resultando el valor de $9.796933 \text{ ms}^{-2} \pm 0.000052$. La siguiente medida fue ya relativa y es a la que nos estamos refiriendo.

En todas las campañas gravimétricas, ya referidas, se usó como estación auxiliar de referencia el Pabellón de Geofísica sito en el Parque del Retiro, en cuya sala de Gravimetría se observaron los péndulos al principio y final de los trabajos de campo. Los valores de la gravedad (g) correspondientes a las estaciones observadas se han calculado partiendo del valor deducido por enlace triple con el Observatorio Astronómico, a saber: $g = 979.983 \text{ gal}$; se recuerda que el gal es una de las unidades en que se expresa la aceleración, equivale a cm/s^2 y honra la memoria de Galileo. En el cuadro que se inserta a continuación aparecen los datos de observación, inmediatos y reducidos,

²⁸ En el año 1912 fue vocal de la Sociedad Matemática Española, en su calidad de Ingeniero Geógrafo, presidida entonces por José Echegaray.

junto a las correcciones para obtener los valores de las duraciones de oscilación²⁹.

ESTACIÓN DE MULHACEN															
FECHAS	Péndulos.	Hora sidérea.	Presión atmosférica reducida.	Tensión del vapor de agua.	Temperatura del péndulo.	Amplitud media de oscilación.	Movimiento del reloj.	Período de las coincidencias.	Duración de la oscilación observada.	REDUCCIONES $\times 10^{-7}$					Duración de la oscilación reducida.
										Por la amplitud.	Al vacío.	A la temperatura de 0° C.	A tiempo sidéreo.	Por balance del sostén.	
30 Agosto.....	104	8 28	509,75	1,7	11,05	11,9	+ 2,40	140,975	0,5017797	- 4	- 434	- 532	+ 139	- 67	0,5016899
30 id.	105	9 33	509,85	2,3	11,30	12,2	+ 2,40	134,185	8701	- 4	- 437	- 535	+ 139	- 63	7801
30 id.	106	10 47	509,90	2,8	11,65	11,9	+ 2,40	138,685	8092	- 4	- 427	- 558	+ 139	- 67	7175
30 id.	107	11 57	509,95	3,0	12,05	12,2	+ 2,40	134,155	8705	- 4	- 428	- 570	+ 139	- 63	7779
30 id.	104	13 5	509,95	3,3	12,44	11,7	+ 2,40	140,340	7878	- 4	- 432	- 598	+ 139	- 67	6916
30 id.	105	14 14	509,85	3,3	12,74	11,6	+ 2,40	133,820	8752	- 4	- 434	- 604	+ 139	- 63	7786
30 id.	106	15 23	509,70	3,8	12,89	11,8	+ 2,40	138,200	8155	- 4	- 425	- 618	+ 139	- 67	7180
30 id.	107	16 33	509,55	3,3	12,84	12,1	+ 2,40	133,970	8731	- 4	- 427	- 607	+ 139	- 63	7769
30 id.	104	17 41	509,60	3,2	12,69	11,7	+ 2,40	140,635	7840	- 4	- 431	- 611	+ 139	- 67	6866
30 id.	105	18 51	509,75	3,3	12,64	11,6	+ 2,40	133,810	8753	- 4	- 434	- 599	+ 139	- 63	7792
31 id.	106	5 57	509,50	3,3	11,10	12,2	+ 2,74	139,080	8020	- 4	- 427	- 532	+ 159	- 67	7169
31 id.	107	7 12	509,65	3,5	11,10	11,9	+ 2,74	134,530	8653	- 4	- 429	- 525	+ 159	- 63	7791
31 id.	104	8 19	509,90	3,4	11,25	11,9	+ 2,74	140,995	7794	- 4	- 434	- 539	+ 159	- 67	6909
31 id.	105	10 28	509,80	4,3	11,65	12,2	+ 2,74	134,255	8691	- 4	- 435	- 552	+ 159	- 63	7796
31 id.	106	12 46	509,50	4,1	12,30	12,2	+ 2,74	138,780	8079	- 4	- 425	- 589	+ 159	- 67	8153
31 id.	107	13 56	509,40	4,0	12,55	12,1	+ 2,74	134,175	8702	- 4	- 427	- 594	+ 159	- 63	7773
31 id.	104	15 4	509,30	4,4	12,69	11,3	+ 2,74	140,655	7837	- 3	- 431	- 611	+ 159	- 67	6884
31 id.	105	16 14	509,10	4,5	12,74	11,6	+ 2,74	134,005	8726	- 4	- 433	- 604	+ 159	- 63	7781
31 id.	106	17 21	509,00	3,5	12,69	12,1	+ 2,74	138,690	8091	- 4	- 424	- 608	+ 159	- 67	7047
31 id.	107	18 30	509,20	3,0	12,64	12,0	+ 2,74	134,055	8719	- 4	- 427	- 598	+ 159	- 63	7786

Determinaciones Relativas de la Intensidad de Gravedad (página 39). G. Sans Huelin.

²⁹ Las correcciones por balanza de sostén que figuran en el cuadro, para las parejas de péndulos 104-106 y 105-107, se calcularon como promedio de tres determinaciones.

A continuación, presentó G. Sans Huelin los datos correspondientes a la invariabilidad de los péndulos, los valores de la gravedad y la precisión de las observaciones. Haciendo saber que los valores los obtuvo aplicando la fórmula siguiente:

$$g = g_m \left[1 - 2 \frac{s - s_m}{s_m} + 3 \left(\frac{s - s_m}{s_m} \right)^2 + \dots \right]$$

siendo g el valor de la gravedad que se pretende hallar en una estación cualquiera, g_m es el valor de la gravedad en Madrid (el ya citado de 979.9839, s es el valor de la oscilación en la estación de que se trate, obtenido con un determinado péndulo y s_m el valor de la duración de la oscilación en Madrid, obtenido con el mismo péndulo. Los errores, E_g , correspondientes a tales valores de g , se obtuvieron por medio de la fórmula $E_g = \pm 2 E g_m/s_m$, siendo E el error medio total en cada una de las estaciones.

Una vez obtenidas las diferencias entre las duraciones de oscilación de los péndulos: 104-105, 104-106, 104-107, 105-106, 105-107 y 106-107, se calcularon los valores de la gravedad para cada péndulo resultando para la estación del Mulhacén los siguientes:

104.....979.098, 105.....979.097, 106.....979.100 y 107.....979.102,

resultando un valor promedio de 979.099 gal, con un error asociado dado por $E_g = \pm 1.6$ miligal. Aunque se transformara después en 980.170 y 979.792 tras aplicarle las correcciones propias de las anomalías de Faye³⁰ y de Bouguer³¹. Los valores de la gravedad normal, según la fórmula propuesta por Helmert³² en 1901 y la fórmula internacional³³ de 1930, fueron 979.906 gal y 979.921 gal, respectivamente;

Supuesta integrada la gravimetría en la geodesia dinámica, procede afirmar que las observaciones geofísicas sobre el vértice Mulhacén estuvieron exclusivamente relacionadas con el campo magnético, llevándolas a cabo el ingeniero geógrafo Luis Cifuentes Rodríguez (1883-¿), que se acaba de

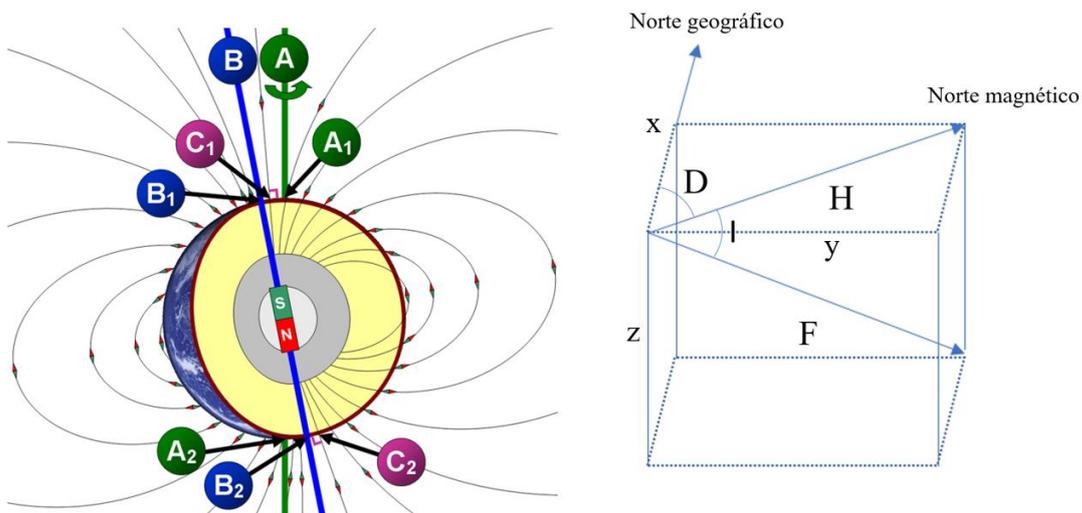
³⁰ Hervé Auguste Étienne Albans Faye (1814 -1902), astrónomo francés.

³¹ Pierre Bouguer (1698-1758), matemático y geodesta francés.

³² Friedrich Robert Helmert (1843-1917), matemático y geodesta alemán. La fórmula que propuso fue la siguiente: $\gamma = 978.030 (1 + 0.005302 \text{ sen}^2\varphi - 0.000007 \text{ sen}^2 2\varphi)$, siendo φ la latitud del lugar.

³³ $\gamma = 978.049 (1 + 0.0052884 \text{ sen}2\varphi - 0.0000059 \text{ sen}^2 2\varphi)$, siendo φ la latitud del lugar.

referir, responsable directo de la brigada magnética³⁴ del Instituto Geográfico Catastral y de Estadística. Dado que el magnetismo terrestre, o geomagnetismo, es una disciplina científica poco divulgada, quizás porque requiere conocimientos avanzados de física, parece oportuno tratar de facilitar su comprensión con algunos comentarios previos. En una primera aproximación producido se puede suponer que el campo magnético interno de la Tierra es generado por una especie de dipolo magnético situado en el centro de la misma, con una inclinación de 11,5° respecto al eje de rotación, siendo el responsable de más del 90% del campo observado. Los polos geomagnéticos son los puntos en los que el eje del dipolo cortaría a la superficie terrestre; tales polos no coinciden exactamente con los reales, los cuales no son diametralmente opuestos. Este campo de origen interno no es constante ni uniforme, sino que presenta una variación lenta en el tiempo que se conoce como variación secular. **FIGURA 15**



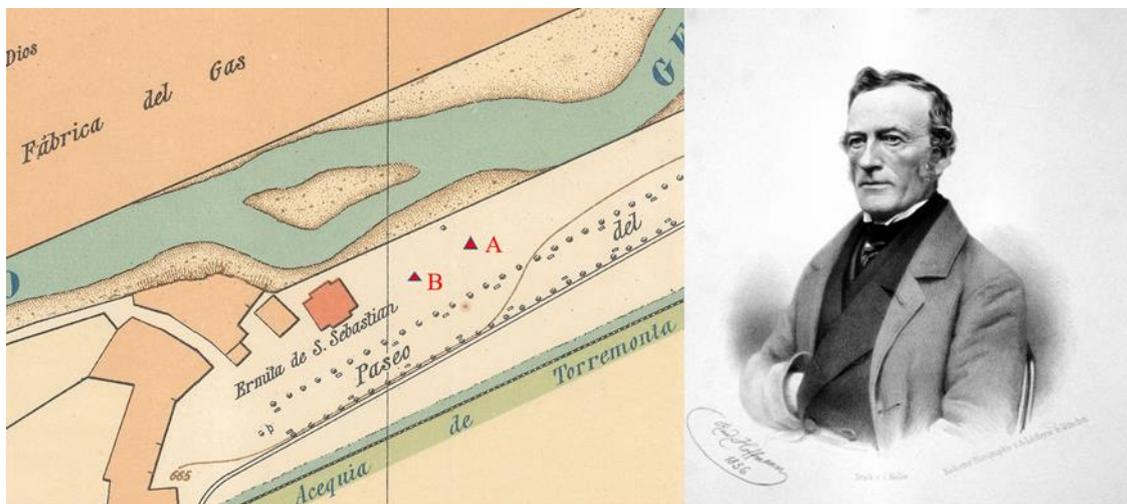
Las componentes del campo magnético y el dipolo terrestre: A) polos geográficos, B) polos geomagnéticos, C) polos magnéticos.

El campo magnético se asimila a un vector (F) localizado dentro de un sistema de referencia topocéntrico y tridimensional localizado en un lugar determinado. En el cálculo vectorial convencional tendría por tanto tres componentes, una sobre cada eje cartesiano; sin embargo, en este caso se consideran otras tres relacionadas con ellas. En primer lugar, la llamada declinación (D), ángulo formado por el eje de las abscisas (x) y la proyección del vector **F** sobre el plano xy; dicha proyección (H) es la meridiana

³⁴ Al iniciarse los trabajos magnéticos en el Instituto Geográfico, se le conocía con el nombre de Brigada del Péndulo.

magnética, diferente de la meridiana geográfica (x). Otra componente sería el ángulo formado por el propio vector y su proyección sobre el horizonte, de ahí que se le llame inclinación (I). La tercera componente coincide con el módulo del vector y se le conoce con el nombre de intensidad total del campo (F).

El objetivo de las observaciones magnéticas es precisamente la determinación de tales componentes y la de sus variaciones con el tiempo; una vez fijados los datos sobre un mapa se podían trazar las líneas correspondientes, para transformarlo en una carta magnética. El sucesivo perfeccionamiento del instrumental empleado, para cada componente, contribuyó naturalmente a optimizar los resultados obtenidos. Los ingenieros geógrafos Ubaldo Azpiazu Artazu (1875-¿) y Rodrigo Gil Ruiz (1878-¿), Jefes de las brigadas del Mapa Magnético, fueron los primeros en publicar una obra básica para entender los orígenes del magnetismo en nuestro país, figurando en él los estadillos necesarios en los que vaciar los datos de observación y proceder a los cálculos correspondientes: Magnetismo Terrestre, su estudio en España, editado por el Instituto Geográfico y Estadístico en 1909. **FIGURA 16**



Johann von Lamont junto a la imagen de la Ermita de San Sebastián, en el plano de Granada (1909) del Instituto Geográfico y Estadístico. A este astrónomo se deben las primeras determinaciones de las componentes del campo magnético, efectuadas en Granada durante el mes de junio del año 1857. Se han situado a estima los dos puntos A y B desde los que hizo las observaciones.

En él resumieron las actividades magnéticas del astrónomo alemán Johann von Lamont (1805-1879), el cual observó un total de 28 estaciones, midiendo la declinación e inclinación magnéticas, así como la intensidad horizontal; valiéndole los resultados para completar en 1858 sus tres cartas magnéticas, para 1º de enero de 1859. Una de tales estaciones se localizó

en Granada³⁵ , junto a la Ermita de San Sebastián, si bien situó los instrumentos en dos emplazamientos (A) y (B); desde ese lugar obtuvo las coordenadas cartesianas (abscisa y ordenada) de la catedral, Virgen de las Angustias, Alhambra (Torre de la Vela) y santa María de la Alhambra. Después de efectuar los cálculos oportunos dedujo que las diferencias entre las componentes del campo magnético de Granada y de Munich fueron las siguientes: Declinación, 4° 39´.2 (A), 27 de junio de 1857, y 4° 38´.9 (B), igual fecha; Intensidad, 0.3488 (A) y 0. 3470 (B); Inclinación, -6° 39´.7 (B).

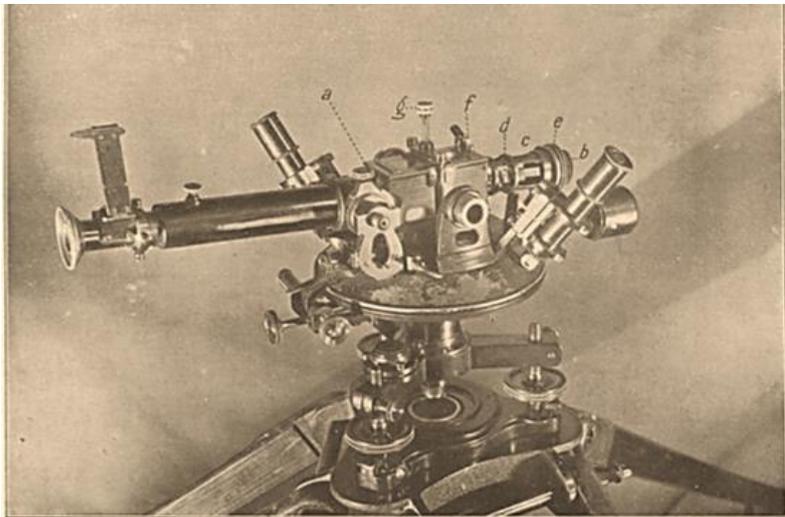
A comienzos del siglo XX el Instituto Geográfico y Estadístico diseñó el plan para la formación del Mapa Magnético de España, en el que se contempló el material, personal y procedimientos más convenientes. En él se incluirían las cartas generales de isógonas (líneas de igual declinación), isoclinas (líneas de igual inclinación) e isodinámicas (líneas de igual intensidad); además de cualquier otra información que se considerase de interés. Pronto se constató la necesidad de que el progreso del estudio del magnetismo en España requería la instalación de Observatorios «que constantemente registren, no sólo sus variaciones normales y periódicas, sino aquellas perturbaciones inesperadas y discontinuas, cuya relación con otros fenómenos naturales se presume e inquiere³⁶» . No obstante, hasta el año 1910 no se abordó definitivamente el citado proyecto, al encargar la compra de instrumentos y comisionar a dos ingenieros geógrafos al Observatorio de Potsdam. Dos años después se redactó la Memoria en que se describían minuciosamente los aparatos adquiridos y se consignaban las instrucciones para los trabajos de campo y gabinete, así como las reglas para la determinación de las constantes en el Observatorio.

En el mes de mayo de ese año 1912 dieron comienzo las observaciones, estando prevista su finalización diez años después. Pero «las dificultades inherentes al funcionamiento de nuestra máquina administrativa hicieron que este plan no se realizase plenamente», no obstante, en el año 1915 se dio por concluida la red de primer orden con 117 estaciones, observadas en cuatro años en vez de los dos presupuestos. La estación número 97 correspondió al vértice geodésico de primer orden localizado sobre la Torre Mocha de la catedral, habiendo sido Rodrigo Gil Ruiz el observador de turno. Los resultados obtenidos fueron: Declinación (D=13° 59´.8,

³⁵ (pp.109-111) Untersuchungen über die Richtung und Stärke des Erdmagnetismus an verschiedenen Punkten des südwestlichen Europas. Munchen 1858.

³⁶ U. Azpiazu y R. Gil: *Magnetismo Terrestre, su estudio en España*. Madrid.1909

Noviembre 1912), Inclinación ($I = 54^\circ 44'.2$, Mayo 1915), Intensidad³⁷ ($H = 24646 \gamma$, Mayo 1915). El instrumental de campo para la realización de las observaciones constaba en esencia de: una base para medir ángulos azimutales, un declinómetro de fibra, dos declinómetros de pivote, un inclinómetro, una caja de oscilaciones y un teodolito astronómico. Posiblemente alguno de tales instrumentos, serían colocados por Luis Cifuentes Rodríguez sobre el nuevo pilar del vértice Mulhacén, en su campaña magnética; desgraciadamente no he podido verificarlo al no haber encontrado la Memoria que debió hacer este ingeniero geógrafo, sobre las medidas efectuadas en el transcurso de la misma. **FIGURA 17**



Declinómetro de pivote. Instituto Geográfico y Estadístico.

INSTITUTO GEOGRÁFICO Y ESTADÍSTICO TRABAJOS DE MAGNETISMO

— BRIGADA —

Estación _____ Equipaje magnético núm. _____ Cr. _____

CÁLCULO DE LA INCLINACIÓN

Día _____ Observador _____ EA _____

AGUJA	TIEMPO OFICIAL	PROMEDIO DE LECTURAS	C.	Σ	OBSERVATORIO DE	DIFERENCIA
	De a					
	De a					
Promedio						
P_m Observatorio de						
Inclinación local en						
de de 191...						

EL INGENIERO GEÓGRAFO,

Estadillo para el cálculo de la Inclinación magnética.

³⁷ La unidad γ equivale a 10^{-9} tesla. Puede definirse el tesla como el campo magnético que ejerce una fuerza de 1 N (newton) sobre una carga de 1 C (culombio) que se mueve a velocidad de 1 m/s dentro del campo y perpendicularmente a las líneas de inducción magnética.

Termino estos breves comentarios manifestando que, en el año 2004, un Catedrático de la Universidad de Jaén recabó mi opinión sobre la viabilidad de reproducir el enlace intercontinental, en colaboración con la Universidad de Argel (si no recuerdo mal), empleando la ya cotidiana técnica del GPS (**Global Positioning System**), el principal exponente de la geodesia espacial. Tras indicarle que me parecía un proyecto sumamente interesante, me vi en la obligación de señalarle la imposibilidad de repetirlo si se querían emplear las mismas señales del año 1879, pues ya ha quedado dicho que la correspondiente al vértice Mulhacén había desaparecido a consecuencia de las inclemencias meteorológicas propias de esas altitudes.

A propósito del cálculo de la altitud mediante los procedimientos de la geodesia espacial, hay que ser extremadamente prudentes a la hora de evaluar la exactitud de los posibles resultados. Si bien es cierto que el cálculo de los desniveles, o diferencia de altitudes, es sumamente fiable con esa novedosa metodología, también lo es el hecho de que es necesario conocer con el debido rigor las denominadas ondulaciones del geoide, siempre en estrecha relación con las determinaciones de la gravedad. De modo que, en regiones de altitud muy elevada, en donde no se conoce con fiabilidad el modelo del geoide (superficie equipotencial del campo gravitatorio terrestre, muy próxima al nivel medio del mar) se debe de ser muy prudente al pronunciarse sobre el verdadero valor de la altitud, uno de los parámetros geodésicos más difícil de determinar con fiabilidad científica.

Ese es el caso del Mulhacén y por supuesto del pico más elevado de la cordillera del Himalaya. Una cumbre identificada en un principio como Pico XV por los geodestas ingleses y luego denominado Everest, a propuesta de Brian Houghton Hodgson (1800-1894) en 1856, en honor de Sir George Everest (1790-1866), principal responsable de todos los levantamientos topográficos de aquella región. Aunque sea a título de curiosidad, indicaré que desde 1847 a 1992 se obtuvo la altitud del Everest en trece ocasiones, unas veces el valor precedente era inferior al posterior y otras ocurría lo contrario.

Agradecimientos

Los expreso por su amable y desinteresada colaboración, a María Artes Rodríguez (Biblioteca del Hospital Real. UGR), a Marta Montilla Lillo (Instituto Geográfico Nacional) y a Antonio María Álvarez Arias de Saavedra (Biblioteca de la Escuela de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. UGR).