

Los sismógrafos del Observatorio de Cartuja

Josep Batlló Ortiz
Departament de Matemàtica Aplicada I. UPC

Dedicaremos este capítulo al análisis y estudio de los sismógrafos construidos en el observatorio de Cartuja. Sismógrafos plenamente españoles como le gustaba remarcar insistentemente al principal diseñador de los mismos, Manuel María Sánchez-Navarro Neumann, director que fue de este observatorio desde 1906 a 1932. Y afirmación, además, plenamente acertada porque, bajo su dirección, este observatorio desarrolló una línea de estudio y construcción que dio frutos plenamente originales. Esto le permitió ser considerado en su tiempo como uno de los principales observatorios europeos y, en una época en que la sismología era una ciencia principalmente observacional, con un desarrollo teórico-matemático que, en muchos temas, no había pasado más allá del empirismo, como uno de los centros importantes en la investigación sismológica mundial.

Desafortunadamente, la difusión de la obra realizada en aquella época no fue muy importante, por lo menos, en Europa; aún que, por otra parte, su influencia en Sudamérica si fue remarcable, como veremos. Así, será bueno que en ocasión de este centenario dediquemos unas páginas al análisis detenido de lo que fue la instrumentación sismológica del observatorio de Cartuja y a un juicio de sus cualidades y defectos. Pero antes de pasar a la descripción de los aparatos introduzcamos, aunque solo sea someramente, unas ideas sobre los diferentes tipos de sismógrafos existentes en aquella época y sus pautas de construcción que nos permitirán una mejor comprensión de sus características.

1. Catalogación y descripción de los sismógrafos utilizados en el Observatorio de Cartuja según su diseño y construcción.

En un trabajo anterior y reciente (Batlló and Bormann, 2000) realizamos un esfuerzo para la catalogación y, al mismo tiempo, establecimiento de criterios de clasificación de los sismógrafos que se habían utilizado en los observatorios españoles hasta, aproximadamente, el año geofísico internacional de 1957-58.

Resumiremos en este apartado las conclusiones obtenidas de forma que nos permita llevar a cabo un análisis de los instrumentos utilizados en el Observatorio de Cartuja, hasta los años ochenta, a través de los criterios de diseño y construcción que se utilizaron para su realización.

2. Partes de un sismógrafo

Muy sucintamente, y siguiendo un esquema muy clásico, en un sismógrafo podemos distinguir tres partes principales: sensor, amplificador e inscriptor. El sensor, también llamado sismómetro o geófono, es el elemento que detecta el movimiento del suelo y lo convierte en una señal que podamos registrar de forma conveniente¹. La parte amplificadora es, como su nombre indica, la que amplifica la señal registrada por el sensor debido a que ésta es, por lo general, de magnitud demasiado pequeña para su observación directa. Finalmente, la parte inscriptora, que nos permite obtener algún tipo de gráfica del registro obtenido por el sensor, es decir, el sismograma. En esta última parte se incluye también algún sistema, generalmente llamado cronógrafo, que nos permita la introducción de una referencia temporal en la gráfica y, por consiguiente, podamos conocer a que hora se ha registrado las diversas fase y ondas que componen un registro. Debemos apuntar que, en muchos casos, es preferible tratar conjuntamente la parte amplificadora y la inscriptora, porque físicamente forman un único elemento.

Respecto al sensor diremos que en los sismógrafos clásicos, que abarcan el período comprendido desde finales del siglo XIX hasta el advenimiento de los sismógrafos de banda ancha, no hace muchos años, se basaba, de forma casi exclusiva, en el principio pendular o, físicamente, en un sistema lineal de un grado de libertad con una fuerza recuperadora. Dicho de otro modo, en el movimiento de diversos tipos de péndulos, ya que estos son el ejemplo más clásico de este tipo de sistemas. Recordemos que un péndulo sometido a una fuerza externa (que en nuestro caso vendría dado por la acción de la aceleración del suelo sobre el mismo), y debido a que no se halla firmemente sujeto al marco en donde actúa la fuerza, sino que su unión permite una cierta holgura, traza un movimiento diferencial respecto al movimiento del marco. Este movimiento diferencial, debidamente ampliado y tratado será nuestro sismograma que, dependiendo de las condiciones particulares del sistema, reflejará más o menos fielmente el movimiento del suelo. En ciertos casos es posible recuperar exactamente la forma del movimiento del suelo a partir del movimiento diferencial efectuado por el péndulo.²

3. Catalogación de los sismógrafos

Como ya hemos dicho, la separación de las partes amplificadoras e inscriptoras de los sismógrafos resulta harto difícil en bastantes casos. Por lo tanto, no seguiremos exactamente el esquema anterior, aunque nos referiremos a él siempre que se haga necesario en las descripciones concretas de los instrumentos, y hemos centrado nuestro esquema de clasificación en los sensores (o transductores) y en el tipo de registro. Consideramos que este esquema permite una mejor comprensión del modo de construcción y características principales de los aparatos y, también, una clasificación

¹ En ciencias físicas llamamos, de forma general, transductor al sistema o instrumento que nos permite convertir una magnitud (que en nuestro caso será el movimiento del suelo) en otra que, por lo general, nos resultará más fácilmente medible.

² Para un tratamiento matemático del problema véase, p. e., Thomson (1981)

más sencilla. Respecto a los sensores hemos introducido dos clasificaciones diferentes: una, según el tipo de oscilador (péndulo) empleado y, otra, según se trate de sismógrafos mecánicos o magneto-ópticos. Respecto al tipo de registro, hemos diferenciado si este se realiza sobre papel ahumado, fotográfico, o en tinta sobre papel convencional, que eran los comunes en la época. Discutiremos estos criterios en los siguientes apartados.

Los resultados obtenidos con la aplicación de los anteriores criterios se presentan, de forma sintética, en la tabla 1. En ella se enumeran todos los sismógrafos que funcionaron en la estación de Cartuja, que describiremos en los apartados siguientes, y sus características principales. La información se estructura en columnas. En la primera columna (instrumento) se consigna el nombre convencional del sismógrafo de que se trata. La segunda columna indica la (o las) componente del movimiento del suelo registrada. La palabra horizontal se corresponde con instrumentos que registraban ambas componentes horizontales con la misma plumilla. La tercera columna (Periodo) se refiere a los años en que el instrumento estuvo en activo. Se encuentra en blanco en unos pocos casos en los que no se sabe con certeza si llegó a funcionar o en que periodos lo hizo. La cuarta columna (Tipo) se subdivide en tres, la primera de ellas da información sobre el tipo de sensor utilizado para el sismógrafo (electromagnético –E- o mecánico –M-), la segunda a su principio constructivo, o estructura mecánica, identificado por un número, como se explica en los apartados siguientes y la tercera al tipo de registro utilizado (A- papel ahumado, F- papel fotográfico, T- tinta sobre papel). Finalmente, la quinta columna (Masa) consigna la masa del instrumento.

Veamos a continuación, con más detalle, las tres categorías de clasificación de los instrumentos establecidas.

Por el tipo de transductor

El tipo de transductor empleado en la construcción de los sismógrafos es, quizás, el criterio más simple de clasificación que podemos adoptar. Clásicamente, solo distinguimos dos tipos diferentes, los transductores mecánicos, que convierten el movimiento del suelo en otro movimiento registrable mediante procedimientos totalmente mecánicos, y se utilizan en los llamados sismógrafos mecánicos, y los transductores electromagnéticos, que convierten el movimiento del suelo en una corriente eléctrica que registramos por medio de galvanómetros y procedimientos ópticos (hay otras posibilidades de registro; pero en España solo se utilizó esta). Los sismógrafos construidos según este último procedimiento recibían el nombre de magneto-ópticos, por combinarse en su funcionamiento ambas ramas de la física.

El entretenimiento mucho más costoso y delicado de los sensores electromagnéticos hizo que en España se utilizaran muy pocos. Antes de la guerra civil solo las estaciones de Toledo y Granada se permitieron el uso de estos aparatos (y en Toledo no funcionaron nunca con regularidad). Después de la guerra civil siguió su lenta expansión y a partir de los últimos años cincuenta, con la entrada en servicio de los sismógrafos Hiller-Stuttgart y otros, el registro electromagnético se generaliza y pasa a ser mayoritario en España. Estos instrumentos se encuentran marcados con una (E) en la columna tipo de la tabla 1.

Los restantes sensores utilizados en las estaciones españolas pertenecen al tipo mecánico, siendo los mecanismos de amplificación también de tipo totalmente mecánico para la gran mayoría, utilizando registros de tinta o en papel ahumado, aunque algunos utilizaban procedimientos ópticos y papel fotográfico como veremos en el siguiente apartado. Se encuentran marcados con una (M) en la columna “tipo” de la tabla 1.

Por su estructura mecánica

Ya hemos apuntado, y no vamos a extendernos aquí en ello, que los transductores de los antiguos sismógrafos se basaban indefectiblemente en el principio pendular. Es decir, la capacidad de detección del movimiento del suelo se basa en la medida de los movimientos diferenciales entre una masa, que actúa de péndulo de un oscilador armónico forzado, y su soporte. Las características físicas de un instrumento de este tipo quedan unívocamente determinadas, en el caso de los instrumentos mecánicos, por tres parámetros que son el periodo propio del instrumento, su amortiguamiento y su amplificación estática. En el caso de los instrumentos con sensores electromagnéticos necesitaremos el periodo propio y amortiguamiento del sensor y del galvanómetro de registro, la amplificación máxima, y la constante de acoplamiento entre sensor y galvanómetro.³

Criterios técnicos como el tipo de movimiento a registrar (horizontal o vertical), las frecuencias de interés, etc., y otros externos como las disponibilidades económicas y de personal de los observatorios, o ideas en boga en cada momento, fijan la elección del tipo de instrumento a utilizar y del tipo de oscilador armónico inherentemente a él ligado.

Siguiendo de cerca los criterios establecidos en la antigua tradición (por ejemplo: los trabajos del director de Cartuja, Sánchez-Navarro (1919a; 1920), o de A. Sieberg, 1923) y en los criterios de catalogación de sismógrafos establecidos por la antigua Asociación Internacional de Sismología (Rothé, 1940) y frustrados por la guerra mundial, hemos distinguido, según sus criterios constructivos, hasta nueve tipos diferentes de aparatos que han prestado servicio en España (hay más tipos; pero no se han encontrado ejemplos de ellos en España, por lo que los hemos ignorado). El resultado de este estudio, que a continuación describimos, puede resumirse gráficamente en la figura 1. Cada una de las nueve viñetas que la componen se refiere a un dibujo esquemático de los tipos siguientes:

1. *Péndulos cónicos*. También llamados bifilares u horizontales. Es el tipo de péndulo más utilizado en España. Se trata de un péndulo que oscila en un plano cuasihorizontal sostenido por dos puntos (llamados también suspensiones), que determinan su eje de oscilación, cuasivertical. La fuerza recuperadora se obtiene inclinando ligeramente el eje de rotación o colocando el centro de masas en un plano ligeramente inferior al punto de soporte inferior. Los péndulos bifilares de Cartuja, de los que hablaremos largo y tendido durante el capítulo, eran de este tipo.

³ La demostración de estos resultados la encontraremos en cualquier libro de introducción a la sismología (p. e., Udías y Mezcua, 1986; o Bullen and Bolt, 1985).

2. *Péndulos rígidos*. Se basan en el mismo principio que los péndulos cónicos; pero su estructura es totalmente rígida. Tuvieron una cierta popularidad en los principios de la sismometría en España; pero los puntos de suspensión de este tipo de aparatos sufren mucho desgaste haciendo que pierdan pronto sus características y prestaciones de diseño, y con ellas su popularidad. En España encontramos este diseño en los péndulos horizontales Ewing de San Fernando, en los Stiattesi de Cartuja, ambos con registro en papel ahumado, y en los Rebeur-Ehlerst de Toledo, con registro óptico. En los años treinta encontramos (con una nueva solución para los puntos de suspensión que evita su desgaste prematuro) los sismógrafos Canisio de Cartuja y los Alfani horizontales de San Fernando. Ya al final del periodo considerado en el presente trabajo, se produce una generalización del uso de aparatos de este tipo, ya que los Hiller-Stuttgart y los Sprengnether de periodo medio son aparatos de este tipo.
3. *Péndulo Zöllner*. La fuerza recuperadora se consigue como en los péndulos anteriores; pero la suspensión de la masa presenta una estructura diferente como puede apreciarse en el dibujo. No era un tipo muy frecuente de sismógrafo; pero se hizo popular y digno de una plaza fija en los libros de la época por ser el sistema empleado por los Galitzin horizontales. En España encontramos este principio constructivo solamente en los mismos Galitzin de Toledo y en el Javier de Cartuja.
4. *Péndulo vertical*. Es, evidentemente, el principio constructivo más simple para un sismógrafo que registre el movimiento horizontal del suelo (aunque tiene limitaciones insalvables en cuanto a su periodo propio, que viene determinado exclusivamente por la longitud de la plomada). Por este motivo fue un tipo de sismógrafo muy popular. El microsismógrafo Vicentini (presente en siete estaciones sísmicas españolas) fue el instrumento más generalizado de esta familia de sismógrafos. También los péndulos verticales Cartuja eran, como veremos, de este tipo.
5. *Péndulo de torsión*. Se utiliza para el registro de las componentes horizontales y la fuerza recuperadora se obtiene de la torsión del hilo que sostiene la masa. El modelo paradigmático de este instrumento es el sismógrafo Wood-Anderson. Existe una referencia a la construcción de un sismógrafo de este tipo en el observatorio de Cartuja (Due, 1953); pero no se ha podido confirmar ni su presencia ni la existencia de algún registro del mismo.
6. *Péndulo invertido*. También existe un instrumento paradigmático para este tipo de construcción que es el sismógrafo Wiechert astático (Wiechert, 1904) y que en España lo encontramos todavía en uso en Toledo. Cartuja ofreció una versión muy personal de este instrumento en su Berchmans y el Instituto Geográfico y Catastral ofreció una versión nacional muy sobresaliente en el Wiechert-Toledo. Sirve este aparato para el registro de los desplazamientos horizontales del suelo y su fuerza recuperadora reside en los muelles que impiden que su masa, situada por encima del punto de suspensión, vuelque.
7. *Péndulo de barra flexible*. Sirve para el registro de los movimientos verticales (u horizontales, aunque en España nunca se utilizó en los sismógrafos de Observatorios) y su fuerza recuperadora reside en la flexión de la barra que sostiene la masa. Solo se utilizó en los péndulos Vicentini verticales muy extendidos, por

otra parte, en España ya que funcionaron en siete observatorios. En Cartuja se utilizó esta solución para alguno de sus tromómetros.

8. *Péndulo cenital translacional*. Sirve para el registro de la componente vertical del movimiento del suelo. Su fuerza recuperadora reside en su muelle y está diseñado para moverse únicamente en un eje estrictamente vertical. El único sismógrafo adquirido en España de este tipo y en épocas tempranas es el Wiechert vertical de Toledo. A modo de anécdota, y adelantándonos a la narración, comentaremos que es el único tipo de sismógrafo del que no tenemos noticia que el Observatorio de Cartuja construyese o reformase.
9. *Péndulo cenital rotacional*. Es un modelo muy parecido al anterior pero la masa no se mueve verticalmente sino que gira alrededor de un punto de apoyo. Sus ventajas respecto al tipo anterior residen en que se hace mucho más fácil controlar el plano de oscilación de la masa y variar su período propio. Encontramos ejemplos en España en los Wiechert verticales de Alicante y Málaga, en el Mainka vertical de Almería, en el Belarmino de Cartuja y el Galitzin vertical de Toledo y, finalmente, en el sismógrafo vertical Ewing y fotosismógrafo Alfani vertical de San Fernando. Ya en la última hornada de sismógrafos llegados a España durante el período de nuestro interés, encontramos que tanto los Hiller-Stuttgart como los Sprengnether verticales utilizaban este principio.

Por el tipo de registro

Si clasificamos los sismógrafos españoles por el tipo de soporte en que se inscribía el sismograma, nos encontramos con tres únicos tipos de registro. El registro sobre banda de papel ahumado, preferido y utilizado en la gran mayoría de instrumentos mecánicos instalados, tanto por su alta resolución como por su relativa comodidad de uso, aunque era un poco sucio (indicado con una A en la tabla 1). El registro con tinta sobre banda de papel blanco, utilizado por muy pocos aparatos en España (solo el microsismométrógrafo Agamennone del observatorio Fabra y el pequeño péndulo vertical de 86 kg de Cartuja), aparte de los instrumentos de sismología aplicada, y que indicaremos con una T en la tabla 1. Y, finalmente, el registro sobre banda de papel fotográfico, utilizado por todos los sismógrafos electromagnéticos y por algunos de los mecánicos (ninguno de ellos en el Observatorio de Cartuja), indicado por una F en la misma tabla.

4. La dedicación a la sismología del Observatorio de Cartuja

En los capítulos previos de este libro ya se ha narrado los orígenes del Observatorio y las causas que motivaron su creación. El caso es que su originario nombre, “Observatorio Astronómico, Geodinámico y Meteorológico de Granada” expone a las claras que uno de sus objetivos fundacionales era el estudio de los movimientos de la corteza terrestre o geodinámica.

El motivo concreto de esta dedicación no parece residir, ciertamente, en que sí los jesuitas

“no sienten muy segura bajo sus pies la tierra que pisan, y sobre sus cabezas ven que se arremolinan los vientos y amenazan violentas tempestades, nada tiene de extraño que alcen sus miradas al cielo, para ver si con poderosos telescopios alcanzan a descubrir por esos mundos de Dios otro planeta que para ellos tenga condiciones de habitabilidad más aceptables que el nuestro”

como afirmaba su primer director, J. Granero (1902a), contestando a los detractores de la fundación de un Observatorio por parte de la Compañía de Jesús, un tanto belicosamente y con evidente sorna. Más en serio, nos decía en el mismo artículo que

“a los estudios geodinámicos da aquí especial interés la vecindad de las colinas, que en años pasados parecieron ser centros de los terremotos que tanto afligieron a estas comarcas; y para la instalación de los aparatos seismográficos, ofrece notable ventaja la condición del terreno, que nos facilita el establecerlos sobre viva roca.”

Este interés, que parece importante en palabras del primer director, resulta matizado por la posterior afirmación de Sánchez-Navarro (1915) de que Granero, aconsejado por el célebre sismólogo Guido Alfani “montó en él, y más que con otro carácter a título de ensayo, cuatro potentes sismógrafos”. Y todavía cae en un plano más bajo cuando otro de sus directores, A. Due, escribe una nota para la Revista de Geofísica (Due, 1958) en el cincuentenario de la estación sismológica de Cartuja considerando este periodo el que va desde 1908 a 1957, es decir, desde que la estación fue separada orgánicamente del resto del observatorio y afirma que, aunque el observatorio se fundó en 1902 “puede decirse con verdad que hasta seis años más tarde no existió la Estación sismológica de Cartuja”.

Respecto a la primera afirmación, cabe decir que la instalación de “sismógrafos potentes”, como dice su autor, denota, en todo caso, un “ensayo” de importancia y con largas miras. Asimismo, debemos recordar que en aquel tiempo la sismología instrumental se hallaba todavía en un estadio de definición todavía precario y, en este sentido, todos los observatorios se hallaban en la misma fase “experimental”. Finalmente, y como veremos más adelante, desde el momento de su fundación fue, casi sin interrupción, la estación con la instrumentación más completa de España y la segunda en toda la península en disponer de registro continuo, solo precedida por el observatorio de la Marina en San Fernando (Cádiz) en 1898. Respecto a la afirmación de Due, sin dejar de ser cierta, como veremos, no deja de parecernos simplemente desafortunada. Por lo tanto, y desde nuestra óptica, no deja de sorprendernos un tanto, a pesar de todos los defectos que pudiera presentar una instalación pionera como era esta en España, la tendencia al demérito de esta primera instalación de registro sísmico del observatorio de Granada por parte de sus directores posteriores.

El resultado cierto es que la sección geodinámica del Observatorio de Granada, luego estación sismológica de Cartuja, resultó, a la postre, la que realizaría la que consideramos principal contribución científica de aquella institución, que trasciende el

ámbito peninsular, y la que, asimismo, se ha perpetuado hasta nuestros días bajo el nombre actual de “Instituto Andaluz de Geofísica y Prevención de desastres sísmicos”.

Así, el Observatorio de Cartuja ha sido, en una rápida valoración histórica, un observatorio principalmente sismológico y, dentro de este campo, una de sus más importantes contribuciones reside en sus aportaciones a la instrumentación sísmica, tanto española como mundial.

Dedicaremos lo que queda de este capítulo a un análisis detallado de la instrumentación sismológica que se utilizó en el Observatorio de Cartuja, desde su creación hasta su integración en la Universidad de Granada.

5. Antecedentes del registro sísmico en Andalucía. Contexto histórico científico.

La creación de la sección geodinámica del Observatorio de Cartuja no responde a un hecho más o menos casual y debemos enmarcarla en el contexto de su época. Varias fueron las causas que condujeron a esta decisión. Retrocedamos primeramente al día 25 de diciembre de 1884. En esa aciaga fecha un terremoto de gran intensidad asoló el sudeste español, principalmente las provincias de Málaga y Granada (para un estudio reciente del mismo véase, p. e. López Arroyo *et al.*, 1980). Nunca más desde ese momento ha ocurrido en la península Ibérica un terremoto tan catastrófico y de tales proporciones. Posteriormente, solo se ha visto superado en magnitud (que no en efectos) por el terremoto profundo de 1954, también con epicentro en la provincia de Granada.⁴ Además, aquel terremoto generó un grandísimo interés científico en toda la Europa de su tiempo, y diversos países organizaron, de inmediato, comisiones especiales para su estudio que nos dejaron sus respectivos informes (Fernández de Castro *et al.*, 1885; Tarramelli i Mercalli, 1885; Fouque, 1886).

Independientemente, se genera en esta época, último cuarto del siglo XIX, un renovado interés mundial por el estudio de los terremotos, coincidente, por una parte, con la generalización de experimentos exitosos para su registro, lo que permite por primera vez el estudio más o menos directo del registro del movimiento del suelo durante los mismos. Por otra, coincide con el pleno desarrollo de la geología como ciencia moderna, con la realización de estudios tectónicos que aportan nueva luz sobre la dinámica de la tierra sólida, o geodinámica.

Centrándonos en la ciencia española del momento cabe decir que se hallaba, en este tema, grandemente influenciada por los estudios desarrollados en Italia al respecto (véase Ferrari, 1990 y 1994). En concreto, podemos citar el impacto que la obra de Rossi “la meteorología endógena” causó en aquel entonces (de Rossi, 1876; 1882). Todavía hoy encontramos muchas copias de esta obra en bibliotecas españolas y es citada infinidad de veces en los escritos de la época.

Por otra parte, no hemos encontrado hasta el momento, y en la época inmediatamente anterior al terremoto de 1884, ningún rastro correspondiente a la existencia de algún instrumento de registro sísmico instalado en la España peninsular,

⁴ Existe un magnífico estudio de este terremoto realizado por Chung and Kanamori (1976).

aunque la misma no es totalmente descartable. Solo unos meses antes de la ocurrencia del destructor terremoto de Andalucía, Daniel de Cortázar, ingeniero de Minas y miembro de la Comisión del Mapa Geológico, en su discurso de ingreso en la Real Academia de Ciencias de Madrid (de Cortázar, 1884), clamaba por el despliegue en España de una red de observatorios geodinámicos, a semejanza de los existentes en Italia⁵ y, por la misma época, el observatorio de Manila, regido por la compañía de Jesús, entonces en la colonia español de las Islas Filipinas, ya disponía de registro sísmico instrumental (este empezó, por lo menos, en una fecha tan temprana como 1867), había obtenido un resonante éxito con su estudio de los terremotos acontecidos en Manila durante el verano de 1880 (Batlló, 2002), y también había propuesto la creación de una red de estaciones sísmicas en Filipinas. Por lo tanto, no resulta desencaminado pensar que la situación estaba ya madura en España para la existencia de estaciones sísmicas, o geodinámicas como, siguiendo las corrientes italianas, se llamaban en la época.

Volviendo a la argumentación anterior, queda claro, como no podía ser de otra manera, el revulsivo que supuso el terremoto de Andalucía de 1884 para los estudios sismológicos. En lo que concierne al registro instrumental, detectamos la presencia de instrumentos construidos con medios “de fortuna” inmediatamente después de la ocurrencia del mismo. Con toda seguridad, hallamos uno en el puerto de Málaga, instalado por el ingeniero director de las obras del mismo, Mario Jona y cuya descripción podemos encontrar en López Arroyo *et al.* (1980). También Rodríguez de la Torre (1999) ha detectado la posible presencia de otros instrumentos de este tipo en Granada y Armilla. Con estos rudimentarios instrumentos se registraron algunas de las réplicas del terremoto principal y, por primera vez en España, algunas que no fueron percibidas por la población; es decir, los primeros terremotos registrados únicamente de forma instrumental en la península.

Pasada la profunda impresión causada por el terremoto, parece que los ánimos se enfriaron bastante y no apreciamos un gran desarrollo de la instrumentación sísmica en España. Seguramente esto se debe, si no totalmente, por lo menos en parte, a la “calma sísmica” que sucedió al terremoto de Andalucía, ya que no encontramos ningún terremoto realmente digno de mención en la península hasta el siglo XX. Sin embargo, se dieron algunos pasos y ya en 1887 el Observatorio de la Marina en San Fernando adquirió algunos aparatos sencillos en Inglaterra (González, 1995; Rodríguez de la Torre, 1999) y, poco después, el observatorio Astronómico de Madrid, entonces a cargo de las observaciones meteorológicas en España, instaló algunos sismoscopios en el mismo observatorio y en el Instituto de Málaga (Marcolain, 1888; Merino, 1905).

Todos estos instrumentos eran del tipo sismoscopio⁶ salvo el sismógrafo Ewing del Observatorio de San Fernando, y no tenemos, por otra parte, constancia de ningún registro de este último. Ya en 1898 el mismo Observatorio de San Fernando instaló en sus dependencias un sismógrafo, del tipo llamado Milne, de registro continuo, integrado en la red mundial desplegada por la British Association for the Advancement of Science

⁵ También podemos ver en este discurso hasta donde había calado en el autor, que luego formaría parte de la comisión española encargada del estudio del terremoto de Andalucía, las ideas propugnadas por de Rossi en su “Meteorología Endógena”. Asimismo, en la respuesta a este discurso, dada precisamente por Fernández de Castro, que sería presidente de la misma comisión, podemos apreciar como este último estaba al corriente de los contenidos de los últimos tratados de geología del momento.

⁶ Es decir, instrumentos que dejaban constancia de la ocurrencia de un terremoto; pero que de ninguna manera nos proporcionaban ningún registro del movimiento del suelo durante el mismo.

bajo la dirección del mismo John Milne (Prían, 1992). Fue el primer aparato de registro continuo instalado en la península del que tenemos constancia y el boletín de “observaciones sísmicas” publicado por el mismo observatorio a partir del mismo año es el primer boletín de este tipo en España.

Como último antecedente del observatorio de Cartuja mencionaremos que la propia Compañía de Jesús y, en concreto, los jesuitas españoles no eran unos recién llegados al campo de la geofísica y de los observatorios geofísicos en particular. Las experiencias anteriores no se habían realizado en la España peninsular sino en sus colonias, como ha estudiado Roca (1992). En 1865 los jesuitas de la misión de Filipinas fundaban el Observatorio meteorológico de Manila que, como ya hemos comentado, acumulaba una larga experiencia en el campo sismológico (Saderra Masó, 1895; 1915). También, por la misma época, la Compañía de Jesús fundaba un observatorio meteorológico en el colegio de Belén, en la Habana (Gutiérrez-Lanza, 1904) que, si bien no se dedicó a la sismología hasta entrado el siglo XX (Gutiérrez-Lanza, 1914), acumulaba una gran experiencia en el tratamiento de temas geofísicos.

Continuando con la situación de la sismología en la península, desde el inicio del registro sísmico en San Fernando no tenemos noticia de ningún nuevo observatorio sísmico en España hasta 1902, en que se funda el observatorio de Cartuja, objeto de nuestro interés, con su sección geodinámica. Ya en el momento de su fundación, los instrumentos instalados aquí ofrecían unas prestaciones claramente superiores a las capacidades de los instrumentos existentes en San Fernando, con lo cual se ponía a la cabeza del registro sísmico instrumental en la península. Posteriormente, en 1904, se funda en España un nuevo observatorio que dispone de una sección sísmica. Se trata del Observatorio del Ebro (Cirera, 1906), también bajo la dirección de la compañía de Jesús y con una instrumentación original que ofrece, en aquel momento, unas prestaciones ligeramente superiores a las de Cartuja. No dudamos, por otra parte, que en la instalación de sus aparatos sísmicos jugó un papel importante la experiencia ya acumulada por el propio Observatorio de Cartuja en sus primeros años de funcionamiento.

Cabe citar aquí que este es también el momento en que se instala el primer sismógrafo en el territorio continental de Portugal. Se trata de otro de los instrumentos de la red de Milne instalado en la universidad de Coimbra (1904).

En 1906 un nuevo observatorio se añade a la lista de los ya existentes en España, se trata de la sección sísmica del observatorio Fabra, de Barcelona. En este caso, la instrumentación es comparable, a duras penas, con la de Cartuja. Y a partir de 1909 nos encontramos con la instalación de las estaciones de la red sísmica del estado, empezando por Toledo (cuya historia y evolución podemos seguir en la obra de Payo y Gómez Menor, 1998); pero dejaremos aquí esta relación puesto que no es nuestro objetivo presente el relatar la historia y evolución del registro sísmico en España y además, como veremos, en ese momento ya había comenzado un proceso de evolución de la instrumentación sísmica del Observatorio de Cartuja. El lector interesado podrá encontrar más datos sobre la historia y evolución de las estaciones sísmicas en España en, p. e., López Arroyo *et al.* (1990), Batlló and Bormann (2000) o Mezcuá and Batlló (2003).

6. Los primeros sismógrafos

Una vez decidida la instalación de una sección geodinámica, quedaba todavía la elección de unos aparatos adecuados a los objetivos planteados. Ya hemos dicho anteriormente que los albores del siglo XX fueron una época de definición de la instrumentación sismológica. En ese momento, y aunque los objetivos se estaban clarificando ya rápidamente, todavía se presentaban algunas dudas sobre qué parámetros había que medir (desplazamientos, rotaciones, etc.) y de qué forma. Esto generaba la existencia de una variada panoplia de aparatos de registro sísmico basados en muy diferentes principios.

De una forma muy esquemática, a modo de resumen del estado de la evolución de la instrumentación sísmica de la época, podemos definir tres corrientes principales en su diseño y construcción: la *italiana*, con una tradición acumulada ya próxima a los cien años (véase, p. e., Ferrari, 1992a y Ferrari, 1994); muy interesada en el registro de los terremotos locales y regionales, con una gran tradición experimental en el registro del movimiento del suelo; pero con unas bases teóricas físico-matemáticas más bien pobres o, por lo menos, no desarrolladas con el mismo acierto que la instrumentación misma. La *británico-japonesa*, iniciada en el último cuarto del siglo XIX al incorporarse John Milne, James A. Ewing y otros sismólogos ingleses a la Universidad de Tokio. Sus principales representantes se hallaban también muy interesados en el estudio de los terremotos locales (aunque luego Milne, ya vuelto a Gran Bretaña, evolucionaría hacia el estudio de la sismicidad global), y sus trabajos cuentan con grandes dosis de experimentación instrumental; pero utilizando unas bases matemáticas mucho más consistentes. Finalmente, podemos definir una tradición alemana, desarrollada también en el último cuarto del siglo XIX; mucho más dirigida en principio al estudio de los movimientos y fuerzas de la corteza terrestre relacionados con la geodesia (campo gravitatorio, inclinaciones, etc.) y que les llevó, quizás de manera un poco casual y en pocos años, al estudio de los telesismos. En esta corriente no encontramos tanta variedad de instrumentos; pero, en general, desde los primeros momentos nos hallamos ante aparatos de una eficiencia alta para los estándares de la época y cuyos registros sirven a la realización de estudios con un contenido físico-matemático considerable. Dewey and Byerly (1969) nos describen los principales instrumentos que caracterizaron a cada corriente y su evolución.

Volviendo al observatorio de Cartuja, y entre toda esta maraña de instrumentos y posibilidades que hemos bosquejado, nos habla el propio director, Granero (1902b), de “l’embarras du choix” que suponía la elección de los más apropiados. Puesto que, en un primer momento, no encontramos en el Observatorio de Cartuja a nadie con una experiencia previa importante sobre el tema, es lógico que se pidiera información y consejo a especialistas sobre el tema. En concreto, Granero pidió consejo a tres científicos, y a la vez sacerdotes, de reconocido prestigio. Estos fueron el jesuita Josep Algué, director del observatorio de Manila, el escolapio Guido Alfani, del observatorio Ximeniano de Florencia y el sacerdote Raffaello Stiattesi, director del Observatorio Geodinámico de Quarto Castello, también cercano a Florencia.

Del consejo de estos sismólogos se decidió la adquisición e instalación de tres (o cuatro, según se mire) instrumentos. Una pareja de péndulos horizontales Stiattesi, aptos

principalmente para el registro de las componentes horizontales de los telesismos, un microsismógrafo Vicentini para las componentes horizontales de los terremotos cercanos y una componente vertical del mismo Vicentini para el registro de los movimientos verticales del suelo. Naturalmente, y puesto que los tres consejeros pueden inscribirse dentro de la tradición sismológica “italiana”, no es de extrañar que la elección recayera también sobre sismógrafos de construcción italiana.⁷

Visto en perspectiva, no fue una elección muy acertada. El esquema elegido fue el correcto, estrictamente dentro de la ortodoxia del momento y sin dejarse llevar por posibles innovaciones no suficientemente validadas. Por una parte, se dispuso un grupo de aparatos que cubrían las oscilaciones de periodo largo y más aptos para el registro de telesismos (los péndulos Stiattesi) y, por otro, un segundo grupo adaptado al registro de frecuencias más altas y, por tanto, más adaptado para el registro de terremotos locales y regionales (microsismógrafos Vicentini para las componentes horizontales y vertical). La validez de este criterio en esa época está fuera de duda y fue el mismo que seguirían el Observatorio del Ebro (Batlló i Ugalde, 2000) en 1904, las estaciones de la red sísmica nacional a partir de 1909 (Mier, 1910) y otros tantos observatorios mundiales; pero los modelos concretos de aparatos elegidos no fueron tan acertados.

Péndulos Stiattesi

Los péndulos Stiattesi instalados en Cartuja se hallan detalladamente descritos en Granero (1902b) y Sánchez-Navarro (1907a). Este tipo de péndulos, según la clasificación expuesta más arriba, era de los llamados rígidos. Constaba el equipo de dos componentes idénticas, instaladas de forma que registrasen los movimientos del suelo en dirección N-S y E-W respectivamente y su registro se inscribía sobre una única banda de papel de 3 m de largo. La masa oscilante de cada uno sumaba 208 kg y era de los llamados por su autor, de modelo mediano.⁸ Eran instrumentos de grandes dimensiones y sus puntos de suspensión (inferior y superior) distaban 3.40 m. El centro de la masa se encontraba a una distancia de 1.75 m de la línea que unía los puntos de suspensión. Las imágenes [Stiattesi 1](#) y [Stiattesi 2](#) del CD-Rom nos muestran su aspecto y no permite hacernos una idea de sus dimensiones. Su período propio variaba entre 16 y 30 s, no disponían de amortiguamiento y su amplificación estática era de 20 a 30 veces. Unas palancas metálicas amplificaban el movimiento de las masas y lo inscribían en la banda de registro con una velocidad de avance de 8.5 mm/min. Esta era de papel ahumado, como la gran mayoría de las utilizadas en el observatorio de Cartuja. Además, entre las dos palancas existía una tercera que, mediante los impulsos que recibía de un electroimán activado por un reloj, marcaba cada minuto, en la banda, las marcas de tiempo que permitían luego la lectura de los registros. El principal problema de estos péndulos residía en que se trataba de un instrumento que requería un cuidado continuo en lo referente al control de centrado y periodo de oscilación de la masa. Era, por lo tanto, un instrumento bastante inestable en sus constantes.

⁷ Tradición que también seguirían, en un primer momento, los observatorios del Ebro y Fabra. No fue así con Toledo que, con su vocación de estación central, fue dotada con aparatos que podemos inscribir en las tres corrientes.

⁸ En el momento de su instalación existían péndulos iguales en varios puntos de Italia y en Río de Janeiro. También el mismo Stiattesi había construido péndulos del mismo tipo y de hasta 500 kg de masa. De ahí el calificativo de “medianos”.

Microsismógrafos Vicentini para la componente horizontal y vertical

El microsismógrafo Vicentini, de periodo propio de oscilación mucho más corto, y destinado con preferencia al registro de las componentes horizontales de los terremotos cercanos, se halla muy sucintamente descrito en Granero (1902b) y con más detalle en la referencia original de Pacher (1897). No se trata, en este caso, del clásico microsismógrafo Vicentini que funcionó en casi todos los observatorios sismológicos españoles, sino del modelo modificado por Pacher y que en muchas referencias se conoce como microsismógrafo Vicentini-Pacher. Asimismo, no fue construido en los talleres de la Universidad de Padua, sino en Quarto Castello, bajo la dirección de Stiattesi. Su estructura encaja totalmente en lo que hemos llamado péndulos verticales. Concretamente, estaba compuesto por una masa de 308 kg (mucho mayor que la del modelo más usual) y con un período propio de 2.2 s y amplificación de 155 veces. Su velocidad de registro era de 15 mm/min. No disponía de amortiguamiento y su principal problema residía en que su registro no descomponía el movimiento del suelo en dos componentes horizontales perpendiculares sino que, mediante un pantógrafo, directamente aumentaba el movimiento del péndulo vertical en el plano horizontal, que dibujaba en una única traza, obteniéndose registros tan curiosos como el que representamos en la figura 2. Cabe decir que un instrumento con estas características de registro ya era considerado en 1902 como fuera de lugar por bastantes especialistas (aunque estos se contaban principalmente en las corrientes alemana e inglesa); pero suponemos que el consejo de Alfani, que disponía de uno igual en Florencia, debió ser decisivo.

La dotación de sismógrafos del observatorio se completaba con el microsismógrafo Vicentini para el registro de la componente vertical (ótramente llamado péndulo susultorio en la terminología de la época). También Granero (1902b) lo describe muy sucintamente; pero podemos encontrar referencias más detalladas en Pacher (1897) o Ferrari (1992b). Era un péndulo de barra flexible. Su masa era de 48 kg, período propio de 0.85 y amplificación de 116 veces. El registro de este instrumento se inscribía en la misma hoja que el del Vicentini Pacher, y entre las dos trazas existía una tercera correspondiente al cronógrafo, como en los péndulos Stiattesi. Las imágenes [Vicentini1](#) y [Vicentini2](#) muestran diferentes aspectos de los 2 péndulos Vicentini.

El primer encargado o director de la sección sísmica fue el jesuita Ramón Ramírez y, aparte de los instrumentos mencionados, teníamos conocimiento por una única referencia (Torallas, 1924) que en esa época la estación también disponía de un sismoscopio, muy ingenioso según nos consta, y diseñado por el mismo Ramírez.

Indagando un poco más en el tema, encontramos que en el boletín del Observatorio de Granada del mes de Febrero de 1903, que incluye una breve referencia a los instrumentos de la sección geodinámica del mismo, nos pone de manifiesto un detalle que hasta ahora ignorábamos, y es que el microsismógrafo Vicentini poseía un sistema de doble velocidad. Anteriormente pensábamos que el sismoscopio localizado en Granada se utilizaba solo para que accionase un timbre o algún otro dispositivo, de manera que alertase al personal que en esos momentos estaba en el observatorio que se estaba registrando un temblor. Este tipo de avisadores era corriente en los antiguos observatorios. Pero, la existencia de la doble velocidad de registro cambia el sentido de este aparato. Los mecanismos de doble velocidad eran comunes en construcciones italianas de principios del siglo XX (Agamennone, 1902). Para accionarlos, por lo

general, se disponía de un sismoscopio que cerraba un circuito eléctrico que, a su vez, liberaba algún mecanismo que permitía acelerar la velocidad de giro del tambor. Este era, pues, el sentido del sismoscopio existente en Cartuja. No tenemos, por otra parte, ninguna información específica sobre su funcionamiento durante el registro de algún terremoto concreto.

No conocemos, por otra parte, ningún detalle sobre su construcción. Solo sabemos que estaba fijo al muro (ignoramos a cual) y que, al cerrarse el circuito eléctrico, retiraba, por una parte, un estorbo que impedía la rotación rápida del tambor y, por otra, detenía un reloj arreglado al tiempo medio local y ponía en marcha otro detenido a las 0 h.

Volviendo a los sismógrafos propiamente dichos, todos los aparatos se construyeron en los talleres del Observatorio de Quarto di Castello, bajo la supervisión de R. Stiattesi (Sánchez-Navarro, 1915). Suponemos que la elección de un único constructor para todos los instrumentos fue por un motivo de comodidad o economía. Todos los aparatos se instalaron alrededor de la columna del telescopio durante el año de 1902, se les protegió con una vitrina de las corrientes de aire, y ya a finales de este año estaban registrando normalmente, aunque el registro oficial con la publicación incluida de sus boletines, bajo el epígrafe de sección sísmica, no se inició hasta 1903. Justamente, la instalación de los instrumentos alrededor de la columna del telescopio puede considerarse como una de las principales críticas a la nueva instalación. Esta se trataba de un macizo pilar de mampostería de 2 x 2 m de sección y más de 4 m útiles de altura (desde el nivel del piso del edificio, del cual estaba separado, como puede apreciarse en la imagen [Stiattesi1](#), hasta el techo de la planta baja), pero dada la utilización que de este último instrumento se hacía, los sismógrafos se encontraban permanentemente sujetos a las vibraciones que los movimientos del telescopio provocaban en la columna, y también a las que el movimiento de la cúpula astronómica que lo protegía, de peso considerable, transmitía al edificio. Además, los movimientos del telescopio provocaban oscilaciones en la verticalidad de la columna que lo sostenía que, si bien imperceptibles al ojo humano, descentraban continuamente la verticalidad de los soportes de los péndulos Stiattesi, obligando a los continuos trabajos de mantenimiento de los mismos⁹ ya mencionados.

7. Manuel María Sánchez-Navarro Neumann nuevo director. La estación sismológica de Cartuja.

En el mes de Agosto de 1906 se producen cambios en la organización del observatorio y Manuel María Sánchez-Navarro Neumann se hace cargo de la sección sísmica. A partir de este momento, la sismología adquiriría una importancia capital dentro del observatorio. El mismo Sánchez-Navarro (1915) nos cuenta que a mediados de Julio de 1905 recibió orden de sus superiores jesuitas de estudiar sismología. Dejamos el estudio de su formación, que ya ha sido tratado antes y nos centraremos en su labor referente a la instrumentación. Sánchez-Navarro puso manos a la obra

⁹ Quizás es a la existencia de estos problemas el sentido que debemos dar a las palabras de Sánchez-Navarro cuando se refiere a una instalación “a título de ensayo”.

inmediatamente y, por una parte, estudió a fondo la instrumentación existente en la época. Fruto de este trabajo de asimilación y estudio crítico fue la publicación, en varios artículos separados, de su “Estudio comparativo de los instrumentos más usados en sismología” (Sánchez-Navarro, 1907b; 1908a).

El conjunto de todos estos artículos componen una extensa memoria, de más de ochenta páginas, de carácter más bien divulgativo, y que podemos considerar como el resultado de un estudio principalmente autodidacta. En ellos, el autor expone, en una primera parte, las bases principales en que se funda la sismometría. En una segunda se detiene en análisis detallados de los instrumentos más comunes en el momento, analizando sus pros y contras y, detalle de mucho interés para nuestros estudios históricos, se detiene especialmente en los existentes en aquel momento en España. Termina el estudio con una tercera parte dedicada a un “ensayo de juicio crítico” de los instrumentos, en donde, citando a los aparatos por su nombre, expone, sin muchos miramientos para el prestigio de sus autores, su opinión debidamente justificada y, efectivamente, los clasifica según sus prestaciones.

Una versión corregida de este trabajo, con buenas ilustraciones, algunas correspondientes a los instrumentos y sismogramas obtenidos en Cartuja, pero sin el interesantísimo “juicio crítico” final, vería la luz, poco después y en francés, en la revista de la sociedad astronómica belga *Ciel et Terre* (Sánchez-Navarro, 1909a). Por otra parte, y como veremos, no será esta la única vez en que Sánchez-Navarro toma su tiempo para realizar un análisis crítico comparativo de los sismógrafos existentes.

Asimismo, es muy interesante notar como Sánchez-Navarro, con su estudio autodidacta de los instrumentos sísmicos se dio cuenta enseguida de la necesidad de un amortiguamiento de las masas pendulares para la obtención de registros fidedignos del movimiento del suelo. En este reconocimiento vemos como se avanza a muchos otros sismólogos de su tiempo. G. Agamennone o E. Mier, por ejemplo, si bien no negando la evidencia, continuaron durante muchos años utilizando sismógrafos no amortiguados. También afirma en este trabajo que la base para el diseño de sismógrafos se encuentra en el principio pendular (lo que nosotros identificamos, en la actualidad, con la utilización de instrumentos basados en el oscilador armónico simple) y que, fuera de él, si bien existen algunas realizaciones, sus resultados no justifican el esfuerzo llevado a cabo.

Por otra parte, y volviendo al instrumental existente en el observatorio de Cartuja en ese momento, también se dio cuenta inmediatamente de los problemas particulares que presentaban los instrumentos del Observatorio. Nos dice, efectivamente, que su instalación en la columna que sostiene el telescopio, hace que se vean afectados por el movimiento de este y de su cúpula¹⁰. Además, lo exiguo del lugar impedía la instalación de nuevos instrumentos en el mismo. En concreto, de los péndulos Stiattesi, a los que dedicó un estudio particular (Sánchez-Navarro, 1907a), nos dice que su amplificación ya no resultaba muy grande¹¹ para la época, y que, principalmente debido a los movimientos de la columna que los sostenía, sufría

¹⁰ E incluso de la escalera que lo acompaña, que permite un fácil acceso al ocular y que está instalada sobre carriles.

¹¹ La evolución de la instrumentación sísmica en los primeros años del siglo XX fue extremadamente rápida y así, un sismógrafo, los péndulos Stiattesi, que en 1902 tenía una amplificación considerada como normal, en 1906 podía considerarse ya como dotado de una amplificación reducida.

continuos desajustes y se hacía labor casi imposible el centrado de sus masas. Del Vicentini-Pacher afirma que sus registros son “de poco ó ningún valor científico, por hacerlo inútil su pantógrafo”¹² y, de todos los instrumentos en general, que la carencia de amortiguadores resta muchísimo valor a sus indicaciones.

8. Los primeros diseños propios

Ya el mismo año de 1906, a poco de hacerse cargo de la sección sísmica, Sánchez-Navarro propone al rector del Colegio-Noviciado, el jesuita José María Valera, la construcción de un péndulo horizontal “a título de ensayo” y su instalación en un sitio menos frecuentado del citado colegio, distante un poco más de 400 m del emplazamiento del observatorio. La idea que se perseguía con este proyecto era el estudio de la posibilidad de construir sismógrafos más sensibles que los péndulos Stiattesi y de dimensiones menos incómodas. Decantarse por la construcción en el mismo observatorio en vez de la adquisición de algún modelo existente viene justificado por la falta de recursos para esto último y, permítasenos comentar que, si bien es cierto que la situación económica del observatorio fue siempre “delicada”, no lo es menos que Sánchez-Navarro ya anidaba el convencimiento de que era posible construir buenos aparatos, aún mejores que los comerciales, a costes reducidos. En un artículo publicado en “Cosmos” (1908b) afirmaba:

“Entre las ciencias, hay pocas que realicen progresos tan rápidos como la sismología, y sin embargo, en ciertos temas, apenas se esta iniciando, puesto que casi en todas partes los instrumentos de observación presentan defectos. Vamos, aquí, a mostrar que es bien fácil construir con muy poco coste y obtener, con reducidos medios, un instrumento del cual se podrá publicar regularmente sus registros, a menudo comparables a aquellos de los observatorios sismológicos mejor dotados”.

Péndulo Omori modificado

Por las pistas que encontramos en la bibliografía debemos suponer que los trabajos comenzaron inmediatamente, en algún momento del final del verano de 1906. El mismo autor nos informa (Sánchez-Navarro, 1915) que

“después de un concienzudo estudio de libros, memorias y boletines y de copias de sismogramas, nos decidimos a construir un péndulo japonés del tipo de los tromómetros Omori”

Por lo tanto, abandonaba la línea de instrumentos italianos, aunque no tanto como pudiera parecer, puesto que, por esa época, Alfani, director del Osservatorio Ximeniano, ya había construido copias de estos instrumentos que tenía en funcionamiento en Florencia. Volviendo a nuestro instrumento, este primer diseño estuvo en condiciones de funcionar, aunque solo a título experimental, a finales de 1906. Para su construcción se utilizó, principalmente, elementos muy simples (tiras de

¹² Aunque de “cuando en cuando” daba vistosos gráficos, como también nos dice.

metal, alambres, etc.) fácilmente adquiribles en comercios no especializados y también materiales de desecho, como pedazos de tuberías de plomo, chatarra, etc. La principal fuente para la descripción de este aparato nos la proporciona Sánchez-Navarro (1915). Por su descripción entendemos que en un primer intento se procuró copiar el modelo japonés en sus más mínimos detalles (para una descripción detallada del aparato original véase Omori, 1903 o Dewey and Byerly, 1969); pero faltos todavía de experiencia¹³ los resultados estuvieron muy lejos de lo esperado. Empezó entonces un periodo de “tanteos y ensayos hartos pesados” (“pero que nos aprovecharon incomparablemente más que lo hubiera hecho el éxito más brillante”- Sánchez-Navarro; 1908b).

Los principales defectos del primer modelo construido consistían, por una parte, en el soporte de la masa que, en un primer momento, se hallaba suspendida de un pie de hierro forjado en ángulo (suponemos que debía tratarse de un problema de estabilidad o consistencia del soporte). Por otra parte, el sistema de palancas amplificadoras, copiadas del original, daba resultados muy mediocres debido a que “estaban bastante mal construidas por falta de personal idóneo”.

Se ensayaron diferentes soluciones para el sistema de palancas y finalmente, dados los buenos resultados obtenidos, se optó por un sistema de palancas multiplicadoras inscriptoras copia de las utilizadas en los péndulos Bosch-Omori, construidos por el taller de los hermanos Bosch en Estrasburgo (Bosch, 1910). Asimismo, se eliminó el soporte de hierro y se fijó el péndulo directamente a un muro “de excepcionales condiciones”, por tratarse de un afloramiento, convenientemente igualado, de caliza tortoniana. La orientación del muro obligó a que la dirección de registro del sismógrafo fuera N20°W (o, aproximadamente, NNW-SSE). Del original se conservó la suspensión inferior formada por un espigón cuya punta afilada se introducía en un cono invertido vaciado en la parte opuesta. El sismógrafo resultante, que recibió el nombre de *péndulo Omori modificado*, se hallaba ya instalado en las dependencias del Colegio-Noviciado, siendo el primer instrumento que allí funcionó. A finales de 1907, tras una visita a Estrasburgo, y por consejo de E. Rudolph se le añadió un amortiguador con aceite de vaselina.¹⁴ Para construirlo se recurrió, una vez más, a materiales de fortuna y se utilizó una lámina de hojalata, de dimensiones 15 x 10 cm, sujeta a la masa del sismógrafo y que se introducía dentro de una caja doble de sinapismos¹⁵, llena del citado líquido.

Como registrador se utilizó un cilindro cuyo eje se hallaba sujeto a la aguja minutería de un reloj despertador (práctica que se generalizaría en la gran mayoría de los registradores cartujanos) y proporcionaba una velocidad de registro de 33 cm a la hora (equivalente a 5.5 mm/min.). Por sus dimensiones, intuimos su anterior cometido como bote de conserva o similar.¹⁶ El registro se realizaba sobre papel ahumado. El cronógrafo era parecido a los utilizados en los péndulos Stiattesi y Vicentini. Unos electroimanes proporcionaban impulso cada minuto a un segundo estilete inscriptor que inscribía una gráfica temporal al lado del registro sísmico.

¹³ “Habíamos leído más que practicado, y nuestros excelentes colaboradores, Hermanos coadjutores de nuestra Compañía, tenían mucha más buena voluntad que habilidad para aquellos trabajos un poco delicados” (Sánchez-Navarro, 1908b)

¹⁴ Existe la posibilidad que esta visita a Estrasburgo estuviera en la base de la pronta adopción del amortiguamiento de las masas oscilantes por Sánchez-Navarro.

¹⁵ Hojas de papel impregnadas de una cataplasma de mostaza, utilizadas como tópico en la medicina de la época. Sabemos también (Sánchez-Navarro, 1908b) que la caja utilizada era de la marca Rigolot.

¹⁶ Intuición que hemos visto después confirmada en los escritos de Sánchez-Navarro.

Así, a finales de 1907 el péndulo Omori modificado de Cartuja alcanzó su aspecto definitivo y que nos ha llegado por las fotografías existentes (véase la imagen [Omori1](#)). Su período propio era de unos 14 s, su amplificación estática de 33 y el amortiguamiento de $\varepsilon:1 = 5.5$ en la notación de la época (equivalente a un amortiguamiento 0.48 del crítico).

A decir verdad, debido a los materiales utilizados y la ausencia de acabados como el torneado o pulido de piezas, el aspecto externo del aparato construido resultaba un tanto grosero; pero sus prestaciones eran equivalentes a las de los péndulos Stiattesi, con la superioridad de su amortiguamiento, carente en los anteriores, y con un entretenimiento substancialmente más reducido. Por lo tanto, se había conseguido el objetivo marcado. Ya desde Agosto de 1907 encontramos sus registros consignados en los boletines de la estación de Cartuja y desde 1908 actuaba como sismógrafo principal (aquel al que se refieren todas las lecturas de tiempos de llegada sí no se dice lo contrario) de la estación. Al poco tiempo sus prestaciones fueron superadas por nuevos sismógrafos que se incorporaron a la dotación del observatorio; pero se mantuvo todavía en funcionamiento hasta el año 1913.

Cartuja bifilar

El éxito obtenido con este instrumento animó inmediatamente a sus autores a la realización de nuevos proyectos y, así, el 6 de junio de 1908 terminaba el montaje de un nuevo péndulo bifilar de 305 kg de masa al que se le puso el nombre *de péndulo bifilar Cartuja*. Fue la primera vez que se utilizaba el nombre del Observatorio para nombrar a un sismógrafo. Según Sánchez-Navarro (1915) se trataba de “un instrumento completamente nuevo y notable por su extremada sencillez, fácil montura y manejo y gran sensibilidad”, de aquí que se utilizase un nuevo nombre para identificarlo.

Para su construcción se utilizaron los discos que formaban la masa del primer sismógrafo Vicentini con pantógrafo que, como ya hemos dicho, se consideraba inútil. La masa oscilante se elevó así a 305 kg. Encontraremos buenas descripciones del mismo en Sánchez-Navarro (1908b, 1908c). Según el propio autor, el instrumento en cuestión se inspiraba en los péndulos de Ewing, Bosch y Mainka, aunque la idea principal se la dio el conocimiento y posterior estudio de los péndulos bifilares que construía Karl Mainka, del observatorio de Estrasburgo. Y, efectivamente, sabemos que los llamados sismógrafos “Mainka”, que en ese momento se encontraban en su primera fase de desarrollo, tuvieron luego una gran difusión debido a sus buenas características. En el Observatorio Fabra de Barcelona todavía se conservan en estado de uso dos de estos aparatos de época ligeramente posterior (1913) y, también, en años posteriores, modelos más evolucionados dotaron los observatorios secundarios de la red sísmica del Instituto Geográfico y Estadístico.

Volviendo a nuestro instrumento, en su construcción, y siguiendo lo que sería una constante en los diseños de Cartuja, se primó la simplificación respecto al modelo original. Por una parte, se prescindió del pie que sostiene los originales dado que se disponía de un buen muro para sostenerlo. En vez del sistema amplificador y de plumillas de los Mainka se optó nuevamente por el sistema multiplicador utilizado en el Omori reformado, copia de los Bosch-Omori, con palancas de aluminio y latón y una

punta inscriptora de vidrio de tipo "italiano"¹⁷. La principal diferencia respecto a los sismógrafos Mainka, y que hace a los bifilares Cartuja realmente diferentes a otros aparatos, reside en la suspensión inferior o resorte de la masa, que la permite oscilar alrededor del eje definido por este punto y la suspensión superior. En este punto se hizo la unión entre la masa y el soporte que salía del muro mediante una lámina flexible; pero si en los sismógrafos Mainka esta lámina se encuentra sometida a tracción, en los bifilares Cartuja esta se encontraba sometida a presión. Siguiendo la técnica de utilizar materiales de fortuna, la lámina que actuaba de resorte consistía en un trozo de viejo cuchillo de cocina, convenientemente adelgazado en su centro y agujereado en sus extremos para fijarlo mediante tornillos a la masa oscilante y al soporte en el muro, de 2 x 2 cm de superficie libre y 2 mm de espesor máximo por un poco más de 0.5 mm en el punto de flexión, determinado por la presencia de un agujero circular de 5 mm de abertura. Una vez terminadas todas estas operaciones, fue preciso templar nuevamente la pieza obtenida para que ofreciese unas buenas condiciones de elasticidad. Este resorte se hallaba montado sobre un tornillo cuadrado, dispuesto de manera que pudiese avanzar o retroceder lentamente y quedar fijo, sin girar nunca. A su vez, este tornillo se fijaba sobre una pieza de hierro, provista de tornillos de centrado. Esta pieza, de la que reproducimos un apunte de la mano del propio Sánchez-Navarro (figura 3) es la que marcaba la diferencia principal entre el bifilar Cartuja y otros sismógrafos similares, que carecían de ella y le confería su facilidad de cambio de período (variable a voluntad entre 7 y 30 s con la sola ayuda de una llave inglesa). También, y dentro del aprovechamiento de materiales típico de los sismógrafos construidos en la época, cabe mencionar que la suspensión superior consistía en un pedazo de muelle de un antiguo somier.

Disponía el sismógrafo de un amortiguador de aceite de vaselina parecido al utilizado en el Omori modificado (no conocemos, en este caso, el origen de la caja) con la diferencia que en vez de una única lámina embebida en el aceite, había dos láminas, de 15 x 11 cm, paralelas y frente por frente, y con una separación entre ellas de 1.5 cm. Es natural esta duplicación debido al aumento significativo de la masa del instrumento respecto al Omori modificado. Puesto que el aparato se encontraba en el mismo muro que el anterior, también registraba la componente N20°W-S20°E del movimiento del suelo.

El cilindro registrador, imitación de los construidos por G. Grablovitz, del observatorio geodinámico de Ischia, en Italia, y muy parecido al del Omori modificado, fue construido en hierro blanco, tenía 60 cm de longitud de circunferencia y 15 cm de largo, dando una velocidad de registro de 10 mm/min., con una separación entre líneas de 3 mm. Por lo tanto, las bandas de registro tenían unas dimensiones de 60 x 15 cm. Estas dimensiones se convertirían en estándar para la mayoría de los tambores de registro construidos en Cartuja para sismógrafos de registro mecánico. Como motor de giro se utilizaba, nuevamente, un despertador convenientemente adaptado. El sistema de referencia temporal (el cronógrafo) se construyó de manera muy diferente a los utilizados hasta el momento en el observatorio. Un reloj cerraba cada minuto un circuito eléctrico y, unos electroimanes puestos en contacto con el soporte de los ejes de las palancas inscriptoras, proporcionaban una ligera sacudida a todo el mecanismo inscriptor, que se traducía por una pequeña marca perpendicular sobre la misma traza de la aguja inscriptora. Este sistema se adaptaría a todos los sismógrafos mecánicos

¹⁷ Las puntas de las plumillas de los Bosch-Omori originales son metálicas, como puede apreciarse en un ejemplar de este aparato que recientemente hemos restaurado para el Instituto Geográfico Nacional.

construidos desde ese momento en Cartuja y presentaba la ventaja, respecto al sistema anterior, mediante una plumilla inscriptora adicional, que no se producía ningún desfase o paralaje en las marcas de tiempo inscritas en el sismograma.

El aparato resultante podía variar, como ya hemos comentado, su periodo propio desde 7 a 30 s y aún más; la amplificación estática era variable desde 50 a 125 veces y su amortiguamiento de nulo a crítico. Estos cambios eran fácilmente realizables y se obtenían mediante el simple giro de tornillos. Asimismo, se puso especial atención a la eliminación de rozamientos en el sistema amplificador-inscriptor, consiguiéndose fricciones muy bajas (0.6 mm para un período de 12 s y una amplificación estática de 70¹⁸). Este aparato prestó sus servicios al observatorio hasta el año 1916.

Como conclusión, podemos afirmar que nos encontramos ante un aparato muy versátil y de unas prestaciones realmente elevadas para su época. Disponemos de varias imágenes relacionadas con este instrumento, en las [bifilar1](#) y [bifilar2](#) podemos apreciar su instalación en el colegio. En [bifilar 3](#) vemos un detalle de su mecanismo inscriptor y en [bifilar 4](#) podemos apreciar las características de la suspensión inferior.

Microsismógrafo Vicentini

Más o menos por la misma época en que se construía el primer bifilar Cartuja se construyó también un nuevo microsismógrafo Vicentini para las componentes horizontales. Ya hemos dicho que el primer Vicentini del observatorio daba registros apenas utilizables y su masa fue utilizada para la construcción del nuevo bifilar Cartuja. Dado que los dos modelos anteriormente descritos estaban principalmente orientados al registro de los telesismos, es natural que se pensara en tener un nuevo aparato que proporcionase mejores prestaciones para el registro de terremotos locales (frecuencias altas). Para ello, se decidió realizar una copia, lo más exacta posible del modelo más común de los diseñados por Vicentini, en el que una sola masa inscribía separadamente las dos componentes horizontales y, por lo tanto, muy parecido a los que en esa época se encontraban en el Observatorio del Ebro y el Observatorio Fabra. Tenemos muy poca información sobre este aparato (la única información aprovechable proviene de Sánchez-Navarro, 1908b). Sabemos que su masa era de 125 kg, su periodo propio de 2.6 s, su amplificación estática de 80-120 y no disponía de amortiguamiento, como el modelo original. Su velocidad de registro era de 15 mm/min. También conocemos algo del historial de su masa (transcribimos de Sánchez-Navarro, 1908b): “se trataba de una vieja caldera de un calentador, inútil después de años de buen servicio y que, después de ejercer como maceta durante algún tiempo, debidamente aderezada y rellena de grava, rinde los mismos servicios que una masa de plomo enfundada en una caja cilíndrica de latón torneado y perfectamente pulida” (léase que las cajas de los instrumentos Vicentini originales). Se instaló al lado del bifilar Cartuja; pero fue pronto sustituido por nuevos modelos (en concreto, por el péndulo vertical Cartuja) y solo funcionó durante los años 1908 y 1909. En la imagen [Vicentini4](#) podemos apreciar el aspecto externo de este modelo.

¹⁸ Tradicionalmente, la fuerza de fricción (rozamiento de Coulomb) de un sismógrafo r se medía en milímetros, siendo la resultante real dicha fuerza R la dada por la expresión $R = (4p^2 M/V^2 T^2) \cdot r$, en donde M es la masa oscilante, V la magnificación y T su período propio (para una discusión detallada véase, p. e., Mohorovicic–1924- o Kisslinger–1967)

El año 1908 fue un año de cambios. A principios del mismo comenzó la publicación mensual de un resumen del boletín de la estación sísmica de Cartuja en la revista *Ciel et Terre*, de la Sociedad Astronómica Belga, dando así una nueva difusión internacional al trabajo de la estación. También a partir del mes de Julio empezó la publicación del boletín sísmico de la estación de una forma independiente del boletín del observatorio astronómico, en un nuevo formato (en la práctica una hoja volante) que duraría muchos años.

Respecto a la instrumentación todavía hay más cambios. Se trasladaron los péndulos Stiattesi a los locales del Colegio-Noviciado. No tenemos constancia escrita de este hecho; pero una fotografía del bifilar Cartuja en la que puede observarse a su izquierda la parte inferior de uno de los péndulos Stiattesi lo atestigua (véase la imagen [bifilar2](#)). Sin embargo, parece que en su nuevo emplazamiento ya nunca llegaron a funcionar regularmente y, al poco tiempo, fueron retirados, desguazados, y sus partes aprovechadas para nuevos instrumentos. También se trasladó, en la misma época, el microsismógrafo Vicentini para la componente vertical, con lo cual el observatorio astronómico quedó libre de sismógrafos. Aprovechando el traslado de este último instrumento se introdujeron en el varios cambios, que no afectaron a sus características principales (Sánchez-Navarro, 1910a). Su funcionamiento fue muy irregular y se prolongó entre mediados de octubre de 1907 y el 20 de mayo de 1908.

También en la primavera de ese año se adquirió un péndulo astático Wiechert, de 200 kg de masa, construido por el taller de Spindler und Hoyer, de Göttingen (puede encontrarse una descripción del mismo en Berlage, 1932). Este fue el último aparato adquirido y no construido en Cartuja. Creemos, aunque nunca hemos encontrado una confirmación escrita, que se adquirió para utilizarlo como instrumento de comparación o referencia con los otros instrumentos que se estaban construyendo en el observatorio. Su compra demuestra, además, que, si bien es sabido que la situación económica del observatorio no era holgada, no era tan paupérrima, como algunos escritos parecen traslucir, de forma que no permitiese, al menos por una vez, adquirir instrumentos. En la imagen [Wiechert1](#) podemos apreciar como era este instrumento.

Nuevamente, no fue una compra afortunada. Si bien los péndulos invertidos Wiechert gozaban ya de una alta reputación el resultado de su funcionamiento en Cartuja no fue muy halagüeño. Por una parte, el comportamiento del péndulo de 200 kg, en general, no era tan satisfactorio como el clásico de 1000 kg¹⁹ del que nos han llegado algunos ejemplos hasta hoy.²⁰ Por otra, su entretenimiento era mucho más delicado que el de los péndulos construidos en Cartuja y, finalmente, nos informa Sánchez-Navarro (1920) que el ejemplar llegado a Cartuja era el que se utilizó de “modelo” de la serie. Es decir, el prototipo, con todos los problemas que eso comporta. Como culminación de los despropósitos, el terremoto de Adra, del 16 de junio de 1910, averió seriamente el instrumento y, puesto que en ese momento ya disponía el observatorio de numerosos instrumentos con buenas prestaciones, no se reparó convenientemente²¹. Aunque Sánchez-Navarro da por terminados los servicios de este instrumento en este punto, es cierto que se intentó utilizarlo nuevamente sirviéndose de una sola de sus componentes y en los boletines de la estación encontramos anotaciones referentes a sus registros hasta

¹⁹ Sánchez-Navarro (1920) nos expone las razones.

²⁰ En el Observatorio de Toledo existe todavía uno de estos últimos en condiciones de funcionamiento.

²¹ En términos militares diríamos de este instrumento, averiado por un terremoto, que causó baja por heridas recibidas en combate.

el año 1912 inclusive. Asimismo, y aunque sin funcionar, se conservó durante bastantes años. En la imagen [bifilar6](#), que podemos datar alrededor de 1920, puede verse todavía, detrás de los bifilares Cartuja, la estructura de la base del instrumento. Cuando comenzó a utilizarse en 1908 registraba las componentes N-S y E-W del movimiento del suelo. Su período propio era de 6.8 s y su amplificación de 125 veces. Disponía el instrumento de amortiguadores por aire.

Péndulo vertical Cartuja

Entre Junio y Julio de 1909 se construyeron dos nuevos sismógrafos. Uno de ellos era el péndulo vertical Cartuja, cuya descripción detallada encontraremos en Sánchez-Navarro (1909b; 1909c) y algunos detalles complementarios en Sánchez-Navarro (1919; 1927). Este sismógrafo vino a sustituir al microsismógrafo Vicentini para las componentes horizontales. No tenemos indicación de porqué se decidió su construcción; pero no es difícil atribuirle al deseo de disponer de un sismógrafo con mayores prestaciones; sobre todo una mayor amplificación.

Se trataba, como hemos dicho, de un péndulo vertical de 280 kg de masa. Esta estaba constituida por un recipiente cilíndrico de plancha de hierro, de 45 cm de diámetro por igual altura, lleno de chatarra de hierro y grava. La suspensión de esta masa estaba formada por dos láminas de buena elasticidad que permitían el movimiento de ésta en una única dirección e impedían su rotación (y esta es una de las características que diferenciaban claramente a este instrumento de otros péndulos verticales). Las imágenes [vertical1](#) y [vertical2](#) muestran como era. La otra característica realmente diferenciadora era su mecanismo amplificador-inscriptor, que es la parte más original del instrumento. Se caracterizaba éste por disponer de dos palancas dispuestas horizontalmente. Una primera amplificadora y una segunda amplificadora-inscriptora. Las dos se encontraban perfectamente equilibradas y, en su movimiento, una empujaba a la otra. Para que las palancas retrocedieran sin perder el contacto, disponía el eje de la última de un muelle espiral (procedente de un regulador de un reloj despertador ordinario) que proveía la fuerza recuperadora. En la figura 3 reproducimos un apunte esquemático de este sistema debido al mismo Sánchez-Navarro (1919), y en la imagen [vertical3](#) una fotografía del mismo. Debe apuntarse que la presencia de este muelle influía algo en el comportamiento del péndulo, resultando en un ligero aumento del periodo propio del sistema. En resumen, la doble palanca amplificadora y la presencia del muelle eran los elementos característicos que identificaban este mecanismo. El aparato resultante ocupó físicamente el mismo lugar ocupado anteriormente por el microsismógrafo Vicentini y registró, entre 1909 y 1924 la componente N20°W del movimiento del suelo, su periodo propio era de unos 2 s²² y su amplificación estática de 520 veces (aunque normalmente funcionaba con un valor algo menor). No disponía de amortiguamiento y su velocidad de registro era de 15 mm/min.²³ Para las marcas de tiempo se utilizaba el mismo sistema que en los bifilares, unos electroimanes transmitían una sacudida de la placa que servía de base al sistema de palancas amplificadoras-inscriptoras.

²² En un ejercicio de precisión, que no dudamos es cierto, afirma Sánchez-Navarro (1919) que su periodo es “de 2.01 a 2.02 segundos”.

²³ Por las imágenes conservadas, parece que el registrador era el mismo que se utilizaba en el microsismógrafo Vicentini.

El valor de la amplificación era muy notable para su tiempo. Sánchez-Navarro lo comparaba con ventaja, debido a la sencillez de su construcción, con el coloso péndulo vertical de 17500 kg de masa construido por Wiechert en 1904 e instalado en Göttingen. El éxito obtenido se debía al empleo de la doble palanca horizontal y a un esmerado cuidado en la eliminación de las posibles fricciones. Esto último se consiguió, por una parte, empleando elementos muy ligeros, como pedazos de caña y paja recia para los brazos y, por la otra, equilibrándolos perfectamente. El equilibrio se conseguía contrapesando los brazos cortos de las palancas con cera, depositada en gotas. El resultado es que se consiguió reducir la fricción total del aparato a 0.3 mm. Estos mecanismos extremadamente ligeros también distinguirían, a partir de entonces, todos los instrumentos mecánicos construidos en el observatorio. En la construcción de este mecanismo tuvo parte destacada el jesuita Pierre Marie Descotes,²⁴ que poseía una gran habilidad mecánica y que encontraremos más tarde en el Observatorio de San Calixto en Bolivia (véase §16).

Péndulo bifilar Cartuja de 425 kg.

Conjuntamente con el péndulo vertical Cartuja se construyó un nuevo péndulo bifilar. Reconocidas las buenas prestaciones del primero se decidió sería bueno registrar las dos componentes perpendiculares del movimiento del suelo con idénticos aparatos. Para ello se abandonaron definitivamente los péndulos Stiattesi, que fueron desmontados y sus masas utilizadas para construir este nuevo bifilar. El resultado fue un péndulo casi idéntico al bifilar de 305 kg; pero con una masa de 425 kg. Las diferencias estructurales entre los dos eran mínimas (véase una fotografía del mismo en la imagen [bifilar5](#)). Puesto que prácticamente se trataba de una copia, no se tomó preocupación especial en documentarlo, siendo una excepción a la dinámica seguida hasta entonces, y hay pocas referencias directas al mismo (véase, p. e. Sánchez-Navarro, 1915; 1927). Prestó servicio desde mediados de 1909 hasta 1917. Este instrumento no se hallaba colgado del mismo muro que los demás, sino de una pared ordinaria (y suponemos que en otra habitación). Registraba la componente E20°N y disponía de amortiguamiento por vaselina.

Los dos péndulos bifilares Cartuja, de 305 y 405 kg y el péndulo vertical Cartuja, de 280 kg formaron el equipo básico o de referencia de la estación desde 1909 hasta 1917, año en que se producirían nuevos cambios. A la par, se constituían en los principales y más conspicuos representantes de la experiencia acumulada en el Observatorio de Cartuja en cuanto a la construcción de sismógrafos durante esa primera época y, también, como veremos, los que serían más exportados.

No fueron los únicos instrumentos construidos en este periodo; a su alrededor se hicieron multitud de pruebas. Únicamente por su mención en los boletines sísmicos de la estación sabemos que, por lo menos, en los años 1910-11 funcionó un tercer péndulo bifilar de solo 46 kg de masa. Asimismo, desde 1911 y hasta 1923 estuvo funcionando un segundo péndulo vertical, que registraba en dirección perpendicular al primero (E20°N) de 87 kg de masa y cuya principal particularidad residía en que su registro era en tinta sobre papel blanco (Sánchez-Navarro, 1912). Disponemos de una fotografía del mismo que reproducimos en [vertical4](#).

²⁴ Y que también participó en la puesta a punto del Cartuja bifilar de 425 kg.

Aparte de los aparatos “de observatorio” se construyeron también instrumentos didácticos, de demostración y para sismología aplicada. De los primeros hemos encontrado por lo menos dos. En 1909 se construyó un péndulo bifilar de 2.5 kg de masa solamente y amplificación estática 10 que dio, casualmente, un buen registro del terremoto portugués del 23 de Abril de 1909, cerca de Benavente (Sánchez-Navarro, 1909d) uno de los mayores terremotos superficiales de la península Ibérica durante el siglo XX, que también fue detenidamente estudiado por Sánchez-Navarro (1910b). Disponía asimismo, a pesar de su tamaño minúsculo, de amortiguamiento (véanse las imágenes [horizontal1](#) y [horizontal2](#)).

También se construyó un sismógrafo de demostración para el registro de la componente vertical (Sánchez-Navarro, 1912b). No conocemos exactamente cuando; pero es probable que sea más o menos de la misma época que el bifilar de demostración. Encontramos una imagen del mismo en Sánchez-Navarro, 1915). Su construcción nos sorprende por dos motivos. Por una parte, después del abandono de la componente vertical Vicentini el Observatorio no disponía de ningún sismógrafo para el registro del movimiento vertical del suelo y esta situación se prolongó por unos quince años, y nos resulta extraño que dispusiera, en cambio, de una componente de demostración. Por otra parte, la solución adoptada, con un péndulo de tipo rotacional (véase la imagen [vertical5](#)), sería la misma adoptada para el péndulo vertical Belarmino. Es natural que estos instrumentos se utilizasen para ilustrar conferencias y mostrarlos en exposiciones. Por ejemplo, tenemos constancia que la componente vertical fue mostrada por Sánchez-Navarro en la conferencia que pronunció en ocasión de la Exposición Internacional de Astronomía y Ciencias Afines, organizada en Barcelona por la Sociedad Astronómica de España y América para celebrar su décimo aniversario (Sánchez-Navarro 1921a). Como la anterior, su masa era de 2.5 kg, su amplificación de 10 y disponía también de amortiguamiento.

En la inspección de las fotografías de estos pequeños instrumentos, con unos acabados cada vez más convincentes, nos percatamos de cuanto se había progresado desde los primeros diseños, de aspecto un tanto grosero, y como el trabajo de diseño y construcción continuo de sismógrafos contribuía a crear un grupo de hábiles mecánicos.

Asimismo, también se construían pequeños modelos experimentales. En concreto, tenemos noticia de la construcción de una componente vertical mecánica de registro fotográfico y de solo 220 g de masa, utilizada para experimentos relativos a la fricción de las agujas destinadas a los otros instrumentos y a experiencias concernientes a los tambores de registro construidos en el propio observatorio (Sánchez-Navarro, 1910). También en esta época encontramos las primeras citas referentes al estudio de los movimientos del suelo por causas artificiales y las primeras realizaciones a este respecto. Pero dejaremos este punto para más adelante (véase §14).

Para terminar esta sección comentaremos que no todos los proyectos existentes se llevaron a cabo y, por ejemplo, tenemos referencia (Sánchez-Navarro, 1915) a la construcción de piezas destinadas a un futuro péndulo de unas dos toneladas de masa que no llegó a realizarse.

9. Los instrumentos del periodo de madurez. Proyección internacional.

A partir de 1913 nos encontramos con una época de pocos diseños. Suponemos que esto se debe, en parte, a los mismos motivos que provocaron, por la misma época, la supresión de la publicación del boletín de la estación. También la guerra mundial de 1914-18 tuvo su influencia. Sánchez-Navarro (1925) nos cuenta que al declararse ésta tenía contratado el observatorio un muelle de élinvar, destinado a una componente vertical, de registro óptico, y con masa de 3 kg; pero este muelle nunca llegó y el proyecto quedó en suspenso. Por otra parte, y como veremos, fue una época en la que se dedicaron bastantes esfuerzos al diseño de aparatos de sismología aplicada.

Con toda seguridad, fue este un nuevo tiempo de estudio puesto que, como resultado de sendas comunicaciones a los congresos de la sociedad española para el progreso de las ciencias de Sevilla y Bilbao, publica Sánchez-Navarro (1919a;1920) un nuevo “ensayo crítico sobre los sismógrafos más en uso” en donde revisa, amplía y discute en profundidad, las características de los principales sismógrafos de su tiempo incluyendo, esta vez, los modelos realizados en Cartuja.

El año 1917 (suponemos que a principios del mismo) se decidió trasladar nuevamente los péndulos bifilares Cartuja del Colegio-Noviciado al observatorio astronómico. Suponemos que el motivo era la necesidad de utilizar la antigua habitación, con su pared de roca viva, para otros menesteres. A partir de ese momento y durante un largo periodo los instrumentos de la estación sismológica se encontraron distribuidos entre los dos lugares. Se aprovechó este momento para introducir importantes reformas y, aunque Sánchez-Navarro solo se refiera a un traslado de instrumentos, podemos afirmar que se trata de una total remodelación de los aparatos. Se rehicieron las monturas y se igualaron las masa de los aparatos. También se rehizo el sistema inscriptor. Eso sí, no se perdió su suspensión inferior en presión y su versatilidad para el cambio de periodos y amortiguamiento. Se instalaron nuevamente alrededor de la columna del telescopio y se les dotó de una vitrina protectora de vidrio (véase la imagen [bifilar6](#)). Sin embargo, el pilar del telescopio seguía presentando los mismos defectos que ya mencionamos al describir la primera instalación del observatorio en 1902. Sánchez-Navarro nos informa que las inclinaciones de este pilar, debidas a los cambios de temperatura, “son tan considerables que nos hemos visto precisados a reducir sus periodos a 9 segundos y sus aumentos a 60 veces”.²⁵ Encontramos descripciones de estos aparatos en su nueva configuración en Sánchez-Navarro (1921a) y Berlage (1932).

Volviendo a su sistema inscriptor, aparte de verse dotados de palancas ligeras como el péndulo vertical, se hicieron varias pruebas para mejorarlo aún más. Entre otras, se dotó de un resorte helicoidal a las plumillas, como en el péndulo vertical; pero finalmente se adoptó un nuevo sistema del que presentamos un apunte en la figura 5. Entre las dos palancas del mecanismo de inscripción se colocaba una aguja muy fina (más adelante se utilizaron alfileres de las usadas en entomología para guardar los insectos), con sus dos extremidades afiladas en forma de cono de 60°, y apoyadas en cavidades de forma groseramente parabólica, hechas en unas cupulitas de acero. Para mantener el mecanismo en posición, sin que pierdan contacto entre sí cualquiera de las partes, la presión provocada por una simple brizna de caucho colocada en tensión entre las dos palancas era suficiente.

²⁵ Sánchez-Navarro (1920)

Más tarde, al inicio de 1924, también se trasladó el péndulo vertical Cartuja al observatorio astronómico. Aunque no disponemos de ninguna referencia concreta, suponemos que también se hallaría suspendido de alguna de las caras de la columna del telescopio, juntamente con los péndulos bifilares. En este nuevo emplazamiento registraba la componente N-S.

Péndulo invertido Berchmans

Volviendo atrás, por real orden de 13 de Octubre de 1920, fue declarada la estación sísmica de Utilidad Pública. Esto significaba el acceso a una financiación por parte del estado y la posibilidad de acometer nuevos proyectos de más envergadura. Veámoslo.

A finales de 1920 comenzó la construcción de un nuevo sismógrafo, diferente a todo lo anteriormente realizado en Cartuja y cuya construcción tomó diez meses, hasta finales de Agosto de 1921. Se trataba de un péndulo invertido de gran masa. Con él se pretendía dotar a la estación de Cartuja de un sismógrafo capaz de registrar, en las mejores condiciones, los terremotos de la península Ibérica. Parece que, aparte de la ayuda que desde ese momento prestaría el estado al observatorio, un donativo particular permitió reunir el dinero necesario para acometer su construcción.

Aunque Sánchez-Navarro reconoce que la construcción de un péndulo invertido era mucho más difícil y laboriosa, se eligió esta solución por varias razones. Son las principales la notable economía que resulta de prescindir del pilar y de la suspensión, por bastar una sola masa para el registro de las dos componentes horizontales, por no importar su tamaño y porque debía montarse en un lugar provisional. Un péndulo bifilar de la misma masa y características de registro hubiera resultado de dimensiones muchísimo más engorrosas.

Como todos los anteriores instrumentos de Cartuja, el diseño de Sánchez-Navarro representaba una visión y adaptación muy personal y meditada a las necesidades del observatorio de un sistema que era, en aquel momento, de difusión universal. Asimismo, y a pesar de su experiencia negativa con el sismógrafo Wiechert, basado en el mismo principio, vemos como Sánchez-Navarro no duda en utilizar nuevamente el sistema cuando lo cree conveniente. En una tradición, que seguirían las nuevas realizaciones del observatorio desde ese momento, se le dio el nombre de un Santo perteneciente a la orden jesuita, en concreto el de San Juan Berchmans, del cual se celebraba en el año de 1921 el CCC aniversario de su muerte.

La masa del nuevo instrumento estaba constituida por un recipiente cúbico de palastro, de 1 m de lado y relleno de piedras, hierro viejo y gravilla. En un primer momento se elevó ésta a 3060 kg convirtiéndose, por entonces, en el tercer sismógrafo mundial por tamaño, y no viéndose superado más que por los dos sismógrafos Wiechert de 17500 kg instalados en los observatorios de Götingen y Tacubaya (Méjico).

De los sismógrafos Wiechert que los inspiraron se copió su suspensión en cardán; pero, a diferencia de los anteriores, los muelles o resortes que la componían se hallaban muy separados (sus centros distaban 120 cm). Asimismo, estos resortes, al igual que en los bifilares, operaban bajo presión, al contrario que en los Wiechert. Esto

hacía que fueran muy masivos (80 x 2 mm de sección). La separación de los resortes tenía por finalidad evitar cualquier nutación de la masa.

La montura del cardán, que sostenía la masa, se apoyaba directamente sobre el suelo, en un pilar bajo, prácticamente al mismo nivel del suelo. Tres tubos de fundición, dispuestos frente a la masa y sólidamente fijados al suelo, sostenían un balustre en donde se hallaba el sistema astasiador, el multiplicador-inscriptor y el receptor. El astasiador, también muy distinto a los originales de Wiechert, estaba compuesto por cuatro muelles planos (dos para cada componente), de 15 mm de anchura y 1 mm de espesor. Su porción libre podía variar, a voluntad, entre 10 y 20 mm, con lo que variaba el período pendular entre 4 y 6 s. Cambiando los muelles por otros de distintas características (cosa, por lo demás, muy fácil), podían obtenerse otros períodos. El amortiguamiento se realizaba con glicerina en lugar de la vaselina utilizada hasta entonces. El motivo es que la viscosidad de la primera es más alta, consiguiéndose a igual superficie un mayor amortiguamiento, necesario por el tamaño de la masa empleada. Para evitar su hidratación se recubría con una fina capa de vaselina. Recordemos también que los péndulos invertidos Wiechert estaban dotados de amortiguadores de aire, sistema que no se utilizó en Cartuja. Para centrar la masa fácilmente, evitando su decantamiento hacia uno u otro lado, en la parte superior de la misma existían dos tornillos de hierro, por los cuales podía correrse, del centro a los bordes, cuatro pesas de plomo de 14 kg. Finalmente, las palancas del sistema multiplicador-inscriptor se hallaban sujetas entre ellas de la misma forma que las de los péndulos bifilares. La amplificación del sistema era fácilmente variable de 120 a 1200 veces.

La velocidad de registro era de 15 mm/min. y se adoptaron unos tambores diferentes a los utilizados hasta entonces. En vez de un motor de despertador se utilizó un antiguo motor de relojería de un sismógrafo Bosch-Omori²⁶ convenientemente modificado y las bandas (una para cada componente, movidas por un único motor) medían 90 x 22 cm. El cronógrafo era del tipo habitual en Cartuja, y unos electroimanes sacudían los soportes de plumillas. Para activarlos, en un primer momento se instaló un timbre común, que podemos apreciar en la imagen [Berchmans1](#). Finalmente, una vitrina de 185 cm de frente por 215 de lado y 200 de altura protegía al instrumento.

Este sismógrafo fue construido casi exclusivamente por Antonio Sola, hermano coadjutor de la Compañía de Jesús. Además, nos informa Sánchez-Navarro que, entre otros trabajos, Sola taladró a mano sobre piezas de hierro el medio millar de agujeros que fue necesario. Por otra parte, la mera comparación de las fotografías de este instrumento con sus predecesores de una década anterior muestra bien a las buenas la práctica y refinamiento que se había adquirido en la construcción de aparatos.

Fue este el sismógrafo de Cartuja que recibió la mayor difusión en la literatura especializada (Sánchez-Navarro, 1921a; 1922a; 1922b; 1927 y también Berlage, 1932) y el propio observatorio editó un opúsculo descriptivo (Sánchez-Navarro, 1921c). Asimismo, fue uno de los más fotografiados, véase sino las imágenes [Berchmans1](#), [Berchmans2](#), [Berchmans3](#), [Berchmans4](#) y [Berchmans5](#). Sin embargo, su diseño no fue repetido o copiado por ningún otro observatorio. Se debe esto, principalmente, a que se trataba de un instrumento muy especial, fuera de los utilizados normalmente en la

²⁶ Suponemos que el origen del mismo es uno de los antiguos sismógrafos Bosch-Omori que dotaban los observatorios del Instituto Geográfico Nacional.

mayoría de observatorios (recordemos su masa, tercera en el mundo) y, por lo tanto, no era de fácil aplicación a un observatorio cualquiera de no mucha entidad.

Grupo macrosísmico Alhambra

Aún hallamos más aparatos en esa época. Los terremotos cercanos de cierta importancia saturaban fácilmente las bandas de registro. Por otra parte, la velocidad de registro de 1 cm/min. no permitía el análisis de las vibraciones de alta frecuencia que estos sismos provocan. Para solventar, por lo menos en parte, estas carencias y copiando de cerca sistemas muy utilizados en Italia, se diseñó el llamado grupo macrosísmico Alhambra. Encontramos la única descripción de este grupo en Sánchez-Navarro (1921a). Estaba compuesto por un sismoscopio construido mediante dos láminas de acero colocadas verticalmente, y paralelas, de distinta anchura y espesor, lo mismo que las pesitas que llevaban enfiladas: la una rematada en un alambre de platino acodado, y la otra en una laminita del mismo precioso metal, provista de varias aberturas circulares de distinto diámetro, según la sensibilidad que se le quería dar al aparato, y en una de las cuales se hacía penetrar, pero sin que tocara a sus bordes, el susodicho alambre. Al producirse un estremecimiento suficientemente intenso las láminas oscilaban, y su desincronismo provocaba contactos entre el alambre y el borde de la abertura circular, con lo que se cerraba un circuito eléctrico. Éste, a la vez, ponía en marcha un reloj parado a las doce, y el receptor de un sismógrafo, que en resumen no era más que un péndulo vertical con suspensión muy corta y con solo 0.52 s de período, provisto de una palanca multiplicadora-inscriptora cuyo aumento ordinario era de unas 50 veces. Al dar la vuelta completa el cilindro motor del receptor, volvía a pararse, con lo que no se estropeaba la gráfica, la que se obtenía con una velocidad de algo más de 5 milímetros por segundo.

Disponemos de una única imagen, [bifilar6](#), en donde puede apreciarse como estaba constituido el instrumento. Se entiende que el nombre de “grupo” tiene su origen en que no se basaba en un único aparato sino en varios. El sismoscopio propiamente dicho era una copia del antiguo sismoscopio de Agamennone (1897), con la particularidad respecto al original que registraba solo una dirección del movimiento, después existía el reloj, y finalmente el registrador. Sánchez-Navarro no nos dice explícitamente que tipo de péndulo efectuaba el registro; pero por lo que puede apreciarse en la fotografía, creemos que se trataba del tromómetro Cartuja “pequeño modelo”, que describiremos al referirnos a los instrumentos para sismología aplicada (§14). También, su disposición en la fotografía nos indica que el registro de este instrumento se efectuaba en una dirección que bisectaba la de los bifilares; por tanto, SE-NW o SW-NE (nos inclinamos por la segunda). No sabemos en que periodo funcionó, aunque suponemos que no debía ser muy largo y podemos centrarlo alrededor de 1920.

Una bendición para sismógrafos

Continuando con la descripción de los trabajos en instrumentación sísmica realizados en el observatorio de Cartuja encontramos, en esta época, uno que no deja de resultarnos curioso y tiene su origen en que, aunque un estudio de los instrumentos del Observatorio de Cartuja como el presente no nos deje mucho lugar a ciertas disquisiciones, no debemos olvidar la condición de sacerdote y miembro de la Compañía de Jesús del autor de los mismos. Desde este punto de vista, uno de los

objetivos que perseguían en su trabajo era la exaltación de la divinidad.²⁷ Por eso no es de extrañar que Sánchez-Navarro, fiel a este principio, tomase especial interés y empeño en solicitar y conseguir de la Santa Sede romana una bendición especial para los sismógrafos en la que se impetrase el auxilio divino a fin de interpretar correctamente las gráficas de los aparatos. Como resultado de estas gestiones, y con fecha 13 de Febrero de 1924, el Papa Pío XI concedió la misma y, como es tradición en estos casos, puso a unos santos intercesores que fueron San Emigdio, tradicional protector contra los terremotos, y la Virgen María. Esta bendición, de validez universal, y en su versión latina, reza como sigue (Sánchez-Navarro, 1924b):

Omnipotens sempiternus Deus, qui respicis terram et facis eam tremere, hoc seismographon tua benedictione perfunde: et praesta ut signa terrae tremantis in ipso congruenter adnotentur, et utilitatem plebis tuae atque ad majorem tui nominis gloriam promovendam recte intelligantur. Per Christum Dominum nostrum. Amen.

Y se añaden a continuación las dos deprecaciones siguientes

Virgo Maria Dolorosissima, est nobis propitia et intercede pro nobis.

Sancte Emigdi, ora pro nobis, et in nomine Jesu Christi Nazareni defende nos, et hoc seismographon ab impetu terrae motus. (*Et aspergat seismographon aqua benedicta.*)

Como es fácil entender, el paréntesis final indica que al final de las oraciones se realiza la aspersion del sismógrafo con agua bendita.²⁸

10. Los instrumentos magneto-ópticos

En un paso más, en 1924 Sánchez-Navarro se decidió por abordar el problema de la construcción de sismógrafos magneto-ópticos. Como ya hemos dicho, reciben este nombre porque el registro del movimiento del suelo se hace por procedimientos magnéticos y su inscripción por procedimientos ópticos. Sabemos por A. Due (1958) que una subvención del Instituto Geográfico y Catastral contribuyó a hacer posible el proyecto. Este tipo de sismógrafos puede fácilmente proporcionar amplificaciones mucho mayores que los sismógrafos mecánicos y son mucho más estables,

²⁷ Hecho que en la orden jesuita se significaba notoriamente en el A. M. D. G. que cierra sus escritos.

²⁸ El mismo Sánchez-Navarro (1924c) nos proporciona una versión castellana de la bendición y deprecaciones que le siguen:

Omnipotente sempiterno Dios que miráis la tierra y la hacéis estremecer, difundid vuestra bendición a este sismógrafo, y conceded que las señales de la tierra estremecida se inscriban en él de modo conveniente, y rectamente se interpreten para la utilidad de vuestro pueblo y para promover la mayor gloria de vuestro nombre.

María, Virgen dolorosísima, sednos propicia e interceded por nosotros.

San Emigdio, ruega por nosotros y en nombre de Jesucristo Nazareno defiéndenos a nosotros y a este sismógrafo del ímpetu de los terremotos.

especialmente para períodos largos. Esto los convierte en instrumentos especialmente adecuados para el registro de los telesismos y, sobre todo, de sus ondas superficiales. Estas excelentes propiedades eran conocidas ya desde la introducción de este tipo de aparatos por Boris Galitzin²⁹ a principios del siglo XX; pero su uso no estaba muy generalizado debido a lo costoso de su mantenimiento, tanto en cuidados como económicamente. Sin embargo, es natural que el Observatorio de Cartuja, con la experiencia y conocimiento ya acumulado en ese momento, y después de haber experimentado exhaustivamente (y casi agotado) las posibilidades de los péndulos mecánicos, girase su atención hacia este campo que permitía una nueva ampliación de sus estudios sobre instrumentos sísmicos.

Sismógrafo Javier

El primero de estos aparatos fue el llamado sismógrafo Javier (véase la imagen [Javier1](#)). Puesto que era el primer aparato de este tipo que se montaba en Cartuja nos hallamos delante de un prototipo. Encontraremos descripciones del mismo en Sánchez-Navarro (1924a y 1927) y Berlage (1932). Para su realización se copió muy de cerca los péndulos Galitzin (véase, p. e. Sagristá, 1920a; o Galitzin, 1911; 1921). Como es normal en la línea del observatorio se busco su simplificación. El aparato utilizaba la misma suspensión, siguiendo el sistema de Zöllner, que en el original. Como diferencias principales respecto a este encontramos una masa (de 7.5 kg) distribuida en forma de halterio. Los imanes se construyeron con acero del utilizado para “muelles de coche” de la empresa “Basconia”. Un primer par de imanes actuaba sobre el amortiguador, una lámina de cobre rojo (era la primera vez que se utilizaba un amortiguamiento de tipo electromagnético en Cartuja) y un segundo par, más externo y muy por delante del centro de masas, actuaba sobre el bobinado del sismómetro, invirtiendo así el orden de colocación de los elementos presente en el sismógrafo Galitzin original. El galvanómetro era del clásico tipo Deprez-d’Arsonval y también fue construido en el mismo observatorio (imagen [Javier2](#)). También era la primera vez que se construían galvanómetros en los talleres de Cartuja y, una vez más, muestra el progreso y refinamiento alcanzado en la construcción de materiales de precisión.

También este aparato es obra de A. Sola. Comentaremos que para obtener la cinta de suspensión del galvanómetro, y visto que los hilos de platino iridiado adquiridos en Alemania no daban el resultado apetecido, utilizó un trozo de la finísima lámina de plata dorada que recubre la seda del llamado “hillo de oro”, que se utiliza para ciertos ornamentos religiosos. Para enderezar la hélice que forma el hilo en su estado original y obtener la longitud deseada (unos 20 cm), colgó este con una pequeña pesa de plomo y lo dispuso formando parte de un circuito eléctrico. El paso de corriente enrojecía el hilo, que bajo la tensión de la pesa se alargaba. El resultado fue un hilo de plata de 0.3 x 0.04 mm de sección (Due, 1943). El espejo del galvanómetro era simplemente un cubreobjetos plateado. El tambor registrador también era mucho más elaborado que los anteriores y disponía de dos mecanismos de relojería (que seguían, sin embargo, siendo despertadores), uno para la rotación del tambor y otro para la traslación.

Para asegurar el éxito de la empresa se imploró el auxilio divino, y nos dice Sánchez-Navarro que se hizo

²⁹ Véase, por ejemplo, Galitzin (1910; 1911)

“del modo más eficaz, aprovechando la estancia en el Colegio-Noviciado de Cartuja del portentoso brazo del Apóstol de las Indias, San Francisco Javier, que en sus correrías apostólicas pasó los últimos años de su vida en un país de los más agitados por terremotos, Japón; nuestro sismógrafo, pues, ha recibido la bendición con tan insigne reliquia”³⁰.

También este es el motivo por el que recibió el nombre de sismógrafo Javier. Fue necesario habilitar una habitación totalmente oscura en donde se instaló el galvanómetro y el tambor de registro. Por lo que conocemos a través de la bibliografía existente, parece que la copia cartujana de los sismógrafos Galitzin funcionaba muy correctamente, siendo su principal defecto que este sismógrafo era demasiado sensible, saturándose muy frecuentemente su registro. Funcionó entre 1924 y 1928, en que fue sustituido por un nuevo modelo, como veremos. Su periodo propio era de 15 s y el de su galvanómetro 19 s. La velocidad de registro era de 10 mm/min.

Componente vertical Belarmino

Realizado el primer prototipo de sismógrafo magneto-óptico y estudiado su comportamiento, inmediatamente se comenzó el desarrollo de un nuevo diseño. En este caso se optó por la construcción de un sismógrafo para el registro de la componente vertical del movimiento del suelo. Desde la eliminación de la componente vertical Vicentini en 1908 no había tenido el observatorio ningún aparato para su registro (salvo la componente de demostración ya mencionada en §8). Sabemos que se terminó el sismómetro (no así el galvanómetro y cilindro receptor) justo a tiempo para mostrarlo durante la visita que realizaron al Observatorio de Cartuja el 12 de Octubre de 1924 un grupo de participantes en la Asamblea General de la Unión Internacional de Geodesia y Geofísica celebrada en Madrid en días anteriores. Recibió el nombre de sismógrafo Belarmino en honor del cardenal jesuita Roberto Belarmino (1542-1621), beatificado mientras se construía el instrumento³¹. Una vez más, fue construida por A. Sola a excepción del forjado y templado de los cinco imanes en herradura (cuatro para el sismómetro y un quinto para el galvanómetro) que se realizó en los talleres de Manuel López de Guevara, también en Granada. Aún la construcción del muelle en espiral y su templado (introduciéndolo súbitamente en agua fría después de largo calentamiento en plomo fundido) se hizo en el propio observatorio. Encontraremos descripciones de este instrumento en Sánchez-Navarro (1925 y 1927) y Berlage (1932). Las imágenes Belarmino1 y Belarmino2 reproducen dos buenas fotografías del mismo.

Nos explica el mismo Sánchez-Navarro (1925) que para su diseño se copió la componente vertical Galitzin (véase Sagristá, 1920b; o también Galitzin, 1921) aunque en este caso, añadimos nosotros, las diferencias son más notables que en el sismómetro Javier. Resulta el sismómetro cartujano mucho más ligero que el original. Sus dimensiones eran de 85 cm de largo, por 50 cm de ancho, por 74 cm de altura y su masa oscilante de 3050 g de plomo forrado de latón³². El muelle que sostenía la parte oscilante se encontraba situado en posición totalmente vertical. El sismómetro disponía de 4 bobinas de 200 vueltas cada una, al igual que en el modelo Galitzin original. Por el

³⁰ Sánchez-Navarro (1924a)

³¹ Recientemente, Roberto Belarmino fue proclamado santo por la iglesia católica.

³² Recordemos aquí el comentario respecto a las masas forradas de latón que transcribimos al describir la versión cartujana del microsismógrafo Vicentini (§8). Nuevamente nos indica el nivel de profesionalidad del trabajo del taller de Cartuja.

contrario, y al igual que en el sismógrafo Javier, el primer par de imanes actuaban sobre el amortiguamiento (una lámina de cobre rojo) del instrumento, mientras que el par más lejano al eje de giro actuaba sobre las bobinas registradoras.

En un primer momento se instaló sobre un robusto pilar de hormigón de dos metros de altura (para su buena cimentación el primer metro se hallaba bajo el suelo de la sala que lo cobijaba) y protegido por una vitrina. Funcionó, con diversos traslados como veremos, desde 1924 hasta 1966. El período del sensor era, al principio, de unos 6 s (aunque se varió varias veces), el del galvanómetro 18 s y la amplificación máxima de unas 700 veces.

Finalmente diremos que se construyó un segundo sismómetro Belarmino. Estuvo expuesto en la instalación que el observatorio de Cartuja tenía en la exposición Ibero-Americana de Sevilla (Sánchez-Navarro, 1929)³³, como puede verse en la imagen [Belarmino5](#); pero no tenemos noticia de que se utilizase posteriormente.

Sismógrafo Canisio

El último sismógrafo construido en el observatorio de Cartuja bajo la dirección de Sánchez-Navarro fue una nueva componente horizontal magneto-óptica. Recibió el nombre de sismógrafo Canisio, en honor de San Pedro Canisio (1527-1597). Dado el interés habitual puesto por Sánchez-Navarro en documentar el trabajo realizado, resulta extraño que no dispongamos de ninguna referencia bibliográfica con la descripción de este aparato. Suponemos que esto es debido en parte a que su terminación coincidió casi en el tiempo con la disolución de la orden jesuita en España, decretada a principios de 1932, por el gobierno de la república. Solamente disponemos de una buena fotografía del mismo (que reproducimos en la imagen [Canisio](#) del CD-Rom) y algunos comentarios aislados y aparecidos en algunas referencias. Sin embargo, podemos aproximar sus características de diseño. Se trataba de un sismómetro electromagnético muy compacto, de medidas mucho más reducidas que la componente vertical Belarmino y, evidentemente, que las horizontales Galitzin. Para la realización de este modelo Sánchez-Navarro volvió al péndulo horizontal de armazón rígida (como eran los primeros Stiattesi). Las suspensiones no se realizaban mediante puntas afiladas sobre conos invertidos sino mediante resortes o lengüetas de muy reducidas dimensiones.³⁴ Su masa oscilante era de solo 1.5 kg y correspondía prácticamente al peso del armazón rígido y la lámina de cobre que actuaba de amortiguador y, a la vez, de masa oscilante. Por lo tanto, y en un ejercicio de simplificación, correspondía solamente a la masa de los elementos activos sin ningún añadido. Las bobinas que inducían la corriente del registro se hallaban, como en todos los sismógrafos magneto-ópticos cartujanos, en la posición más alejada del eje de giro.

Tanto la solución del armazón rígido como la reducción de la masa oscilante serían utilizadas unos veinte años después en sismógrafos como los Sprengnether de periodo intermedio (como los que funcionaron en Toledo) o los Hiller-Stuttgart que dotaron masivamente la red nacional en los años cincuenta.

Se construyeron dos de estos instrumentos, para el registro de las respectivas componentes del movimiento del suelo. La componente E-W entró en servicio en 1928

³³ De hecho, parece que se construyó de manera exprefesa para esta exposición.

³⁴ Por la fotografía que disponemos nos atrevemos a afirmar que se trataba de hilos de acero.

y la N-S en 1931. Su período propio era de 18 s (más tarde 12 s), el del galvanómetro de 12 s y su amplificación máxima de unas 500 veces.

Ya hemos apuntado en varias ocasiones el grado de profesionalidad alcanzado en la construcción de sismógrafos. En los diseños de los años veinte, las características y aun los acabados de los aparatos no tienen nada que envidiar a los construidos por cualquier taller de fama mundial del momento, tanto para los instrumentos mecánicos como para los electromagnéticos, en cualquiera de sus partes, sensores, mecanismos amplificadores, galvanómetros, tambores, etc. Evidentemente, una parte de ese mérito no correspondía únicamente a Sánchez-Navarro, sino también a los mecánicos a cargo del taller. Todos ellos eran hermanos coadjutores jesuitas. Ya hemos mencionado varias veces a Antonio Sola. Trabajó en el observatorio desde 1911 y fue el principal ejecutor de la mayoría de construcciones realizadas en el observatorio hasta la guerra civil. Pero no fue el único y, afortunadamente, conocemos los nombres de algunos más y los años en que trabajaron en el taller. Estos son: Alfonso Pérez (1906-1913) Antonio Parra (1907-08), Miguel Jiménez (1908) y Carlos Linares (1909).

Inciendo aún más en el nivel alcanzado por la instrumentación de Cartuja, debemos apuntar que, por los años treinta, el director del Observatorio de Toledo, Alfonso Rey Pastor, no tenía ningún inconveniente en reconocer que en ese momento Cartuja “constituye una Estación de primer orden, la mejor de España” (Rey Pastor, 1932). Esta calidad era también reconocida mundialmente como lo muestra, p. e., la invitación del “Bureau Central Séismologique International” para publicar en su serie de “Travaux Scientifiques” un resumen general de cuanto se había hecho en el Observatorio de Cartuja respecto a la instrumentación sísmica (véase Sánchez-Navarro, 1927) o, también, la inclusión de los diseños de Cartuja en el capítulo dedicado a la sismometría publicado en el “Handbuch der Geophysik” coordinado por Beno Gutenberg (véase Berlage, 1932). Fueron, en resumen, unos años de plena madurez.

También por la misma época (allá por el año 1927 o 28) se empezó la construcción de un nuevo edificio para albergar los instrumentos de la estación sísmica (Sánchez-Navarro, 1928). Este, que debía permitir el abandono de los locales que provisionalmente se venían ocupando en el Colegio-Noviciado desde 1908, se hallaba al lado del observatorio astronómico, por la parte norte, y disponía de dos salas auxiliares, una para los sismógrafos mecánicos y otra, semiexcavada en la roca, para los nuevos sismógrafos fotográficos, además de otras dependencias auxiliares. Este edificio todavía existe, aunque muy transformado, y se utiliza como oficinas del IAGPDS. No tenemos, por otra parte, noticia exacta de sí los instrumentos, o por lo menos algunos de ellos, llegaron a moverse a este lugar antes de 1932.

La disolución en España de la Compañía de Jesús truncó bruscamente este periodo que consideramos de madurez justo en su inicio y nunca sabremos que nos hubiera deparado en el futuro, sí un estancamiento o una nueva evolución.

11. El Instituto Geográfico Catastral

Ya se ha explicado en otro lugar que tras la disolución en España de la Compañía de Jesús el observatorio pasó a depender del Instituto Geográfico y Catastral. Este incluyó el Observatorio de Cartuja en su red y, como tal, publicó sus datos en los boletines de la época. La dirección del mismo recayó en el ingeniero geógrafo Félix Gómez Guillamón, director entonces del observatorio sísmico de Almería, que compaginó la dirección de Cartuja con la inspección de la primera estación y también de Málaga. Si bien este cambio detuvo la construcción de nuevos sismógrafos, no cesó por ello la actividad directa en torno a los mismos. Durante su dirección, que se prolongó hasta 1938, en que el observatorio fue devuelto a la orden jesuita, llevó a cabo mejoras y ampliaciones de los edificios y procedió a la reinstalación de los sismógrafos, que fueron llevados desde su antigua instalación en el Colegio-Noviciado a los nuevos locales construidos en los terrenos del observatorio astronómico. Posteriormente, Gómez Guillamón realizaría también, ya en su nuevo destino en el observatorio de Málaga, adaptaciones y diseños de nuevos sismógrafos, sin duda inspirados en el trabajo de Cartuja.³⁵

El cambio de ubicación de los distintos instrumentos se realizó de forma escalonada, para que no quedase interrumpido el registro. Concretamente, conocemos el momento del cambio del péndulo vertical Cartuja, que al iniciarse 1934 pasó de registrar la componente N-S a hacerlo sobre la E-W, y se aprovechó este cambio para aumentar su masa de 280 kg hasta 370 kg. También, y por la misma época, el sismógrafo Berchmans fue reinstalado y su masa aumentada hasta 4260 kg. En todas estas labores Gómez Guillamón dispuso de la incalculable colaboración de A. Sola, que permaneció durante este tiempo como mecánico del observatorio.

12. La postguerra. Antonio Due director.

En 1938 la compañía de Jesús toma nuevamente la dirección del observatorio y Sánchez-Navarro retoma sudirección hasta 1940, año de su muerte. No tenemos noticia que en este tiempo se introdujera modificación alguna en los instrumentos del observatorio. Ya en la postguerra, el observatorio de Cartuja continuó con su actividad y con un nuevo director, Antonio Due, que había sido subdirector del mismo desde 1925. El registro continuó con los dos bifilares, el Cartuja vertical, el Berchmans y el grupo magneto-óptico formado por la componente vertical Belarmino y los dos horizontales Canisio.

³⁵ Realizó su principal contribución a la sismometría española con el diseño y construcción del sismógrafo Victoria (Gómez Guillamón, 1942). Resulta sintomático que este sismógrafo se construyera inmediatamente después de la llegada de Gómez Guillamón a Málaga y no es descartable (aunque tampoco hemos podido confirmarlo de ningún modo) que su estancia en Cartuja le influyese definitivamente a este respecto. Respecto al sismógrafo en sí, resulta difícil que la idea original de su proyecto correspondiese a un proyecto anterior de Cartuja no llevado a cabo, puesto que el modelo realizado corresponde a una copia del sismógrafo de tipo Benioff, presentado en público por primera vez en 1932 (Benioff, 1932) y, por tanto, ya fuera de la época de Sánchez-Navarro como director en Cartuja. Pero si sabemos que fue construido por A. Sola, que se incorporó como mecánico al Observatorio de Málaga. Por lo tanto, las técnicas utilizadas en su construcción son directamente herederas del Observatorio de Cartuja.

Durante los años inmediatamente posteriores a la guerra civil no encontramos muchos cambios. Cabe destacar que se procedió a aumentar la velocidad de registro del Berchmans, que paso de 15 a 30 mm/min. (Due, 1940).

También algo más tarde se inició una serie de experimentos destinados a conseguir una mayor sensibilidad a altas frecuencias de los sismógrafos magneto-ópticos (Due, 1943). Para ello se hicieron pruebas con los galvanómetros de los instrumentos, variando principalmente el período de los mismos y utilizando distintos bobinados (por los tanto, variando su sensibilidad). Como resultado de estos experimentos se dejó el sistema con periodos propios del orden de 12 s para los sismógrafos y de 2 s para los galvanómetros. El mecánico del observatorio era entonces el jesuita Juan Francisco Martínez Dornacu.

Sismógrafo Cartuja Máximo

A principios de 1949 se inició la reforma más importante de esta época. Se desarmó el Berchmans y a partir de su caja de palastro y una parte importante de sus antiguos elementos se construyó un nuevo sismógrafo del tipo bifilar (Due, 1949a); pero no se siguió el esquema de los bifilares Cartuja, sino que era mucho más parecido a los Mainka, puesto que el resorte que actuaba en su suspensión inferior operaba bajo tensión. La parte mecánica la realizó Carlos Ruiz Raya, hermano coadjutor. Con esta reforma se buscó disponer de un sismógrafo de un periodo largo y gran aumento. Debía permitir un mejor estudio de las ondas internas de los telesismos y, por otra parte, se buscaba también librar al registro de los microsismos que frecuentemente empañaban los de otros instrumentos de la estación. Se aumentó todavía más la masa oscilante, elevándola hasta 4500 kg. Registraba una única componente E-W, su período propio podía llegar fácilmente a los 15 s aunque normalmente funcionaba alrededor de los 10 s, la amplificación estática era de 800 y disponía de un amortiguador de glicerina. Funcionó entre 1949 y 1960. En las imágenes Máximo1 y Máximo2 podemos ver dibujos de este instrumento.

A nuestro entender, no fue una reforma afortunada. El instrumento resultante, el único conservado hasta hoy de todos los construidos en el Observatorio de Cartuja y cuya estructura podemos contemplar todavía en el jardín del observatorio, cumplía los objetivos previstos; pero creemos que estos objetivos no justificaban la pérdida de un instrumento de las características del Berchmans. Es muy posible que un cambio de velocidad del registro de los instrumentos magneto-ópticos hubiese bastado al mismo fin. Por otra parte, y debido a que los péndulos invertidos necesitan un entretenimiento mayor que, sin ir más lejos, los péndulos bifilares, es muy posible que en esa época el registro del Berchmans dejase ya mucho que desear y se optara por algo nuevo y más simple que por una costosa reparación.³⁶

Macrosismógrafo Cartuja

También tenemos noticia de la construcción, en 1949, de otro sismógrafo. Se trataba del macrosismógrafo Cartuja (Due, 1949b). Con su diseño se perseguía la misma idea que con el Grupo macrosísmico Alhambra años antes, que era disponer de un registro especial para terremotos locales. Por lo tanto, era aconsejable disponer de amplificación

³⁶ Un coste no tanto monetario sino en horas de trabajo de precisión, que luego debería continuarse si se deseaba un registro en buenas condiciones.

no muy grande y gran velocidad de registro. Para ello se construyó un pequeño péndulo bifilar (del que no conocemos el sistema de suspensión inferior de la masa,³⁷ aunque sospechamos que, como en el Cartuja Máximo, se realizaría mediante un resorte sometido a tensión). Su masa era de solo 15 kg, su amplificación estática de 20 veces y disponía de amortiguamiento por glicerina. Su tambor de registro era de 25 cm de circunferencia y su velocidad de 60 mm/min. Este tambor no funcionaba permanentemente sino que solo actuaba accionado por un sismoscopio. Este no era más que un contacto eléctrico instalado en el mecanismo de amplificación del péndulo vertical Cartuja, que cerraba un circuito eléctrico que, a su vez, ponía en marcha el tambor registrador. Este daba una única vuelta (y, por tanto, solo registraba durante cuatro minutos) y se detenía nuevamente. Una vez realizado el registro debía armarse de nuevo el sistema para que estuviera en condiciones de funcionar otra vez. No tenemos noticia de que este aparato funcionase regularmente, o que estuviese en servicio durante mucho tiempo, aunque tampoco cabe descartarlo. Solo disponemos de una fotografía, y no de muy buena calidad, de este aparato y la reproducimos en la imagen Macrosis.

Este es el último sismógrafo construido en Cartuja del que tenemos noticia fehaciente y cierra la etapa iniciada algo más de 40 años antes, en 1906. Disponemos, sin embargo, de algunas informaciones adicionales. Una pequeña nota publicada en la revista *Urania* (Actividad, 1953) nos informa que durante el año 1952 se experimentó con un sismógrafo de torsión para registro óptico con amortiguamiento magnético, y cuya masa total móvil era inferior a los tres gramos.³⁸ Aunque la nota deje traspasar la sensación de que este instrumento estaba funcionando, no tenemos ninguna constancia de sus registros ni de cualquier otra característica del mismo. También sabemos que años antes, en 1946, A. Due visitó el Observatorio del Ebro y realizó allí pruebas para la construcción de un sismógrafo magneto-óptico. No tenemos, sin embargo, noticia de que se consiguiera ningún resultado con ellas.³⁹

El Observatorio Geofísico de Villafranca de los Barros

En 1945 la compañía de Jesús tomó la decisión de instalar un observatorio geofísico en Villafranca de los Barros. No disponemos de mucha información sobre el porqué de esta estación, la única fuente de que disponemos es la revista *Urania*. En su núm. 220 (*Urania*, 1949) nos informa de la creación de la misma. Parece que la presencia de Emilio Ortega, jesuita y antiguo subdirector de la sección astronómica del Observatorio de Cartuja, en el colegio de San José que la compañía de Jesús regenta todavía en Villafranca de los Barros, propulsó la decisión, tomada ya en enero de 1945, de instalar en él un observatorio geofísico. Debía disponer de secciones astronómica, sísmológica y de magnetismo y electricidad terrestre.

Respecto a la sección sísmica, en el año 1945 se construyeron dos sismógrafos (un péndulo vertical y otro bifilar) para la misma en el observatorio del Ebro y se pensó en instalarlos en el sótano de la Iglesia del colegio; pero por diversas dificultades la instalación no se llevó a cabo. Nuevamente nos informa *Urania* que en el año 1949

³⁷ Aunque sabemos que tanto el inferior como el superior estaban construidas con filamento de acero fino.

³⁸ Por lo tanto, una copia de los clásicos sismógrafos Wood-Anderson (Anderson and Wood, 1925), muy en boga en ese momento.

³⁹ La información aparece en la introducción del Boletín del Observatorio del Ebro correspondiente a dicho año y nos la ha confirmado personalmente J. O. Cardús, jesuita, que posteriormente fue director del mismo, y ya se encontraba en esa época en dicho observatorio.

quedaba todavía pendiente la decisión sobre su emplazamiento. El traslado de Ortega a Bolivia frustró el desarrollo ulterior de este observatorio y suponemos que la sección sísmica nunca llegó a instalarse. También suponemos que la decisión del encargo de los sismógrafos al observatorio del Ebro, en lugar de Cartuja, se debe a la mejor posición y posibilidades del primero en aquel momento. Además, parece que uno de los propulsores del Observatorio de Villafranca fue Antonio Romaña, director del Observatorio del Ebro, y es natural que se estableciera una dependencia respecto a este en muchos aspectos.

No obstante, la dirección del nuevo observatorio por parte de Ortega, antiguo miembro de Cartuja, nos obliga a pensar en este observatorio prontamente abortado como un fruto colateral del Observatorio de Cartuja.

13. La última etapa. Nueva intervención del IGC

En 1965 Due deja la dirección del observatorio siendo substituido por Teodoro Vives. Ya en ese la antigüedad de los instrumentos, su estado de conservación y su originalidad, que obligaba a construir “ex profeso” cualquier recambio, aconsejó su retirada. Para la continuación del interrumpido registro sísmico en Cartuja intervino el Instituto Geográfico Nacional, que, en 1966, instaló en el Observatorio las tres componentes de los sismógrafos Hiller-Stuttgart, construidos por Askania (Berlín) que se encontraban anteriormente en el Observatorio sismológico de Málaga y que, debido a la inclusión de este último en la WWSSN (World Wide Standard Seismic Network), y de la instalación de la instrumentación correspondiente a dicha red, habían quedado sin servicio. Se trataba de sismógrafos magneto-ópticos diseñados especialmente para el registro de la sismicidad regional. Su periodo propio y el de sus galvanómetros era de 1.5 s, su amortiguamiento crítico y su amplificación máxima del orden de 8000 veces. Su velocidad de registro era de 60 mm/min. A pesar de que en España llegaron a funcionar hasta 6 grupos diferentes de estos aparatos, son instrumentos muy mal documentados y solo disponemos de algún manual de utilización. Se mantuvieron en servicio en el observatorio hasta 1985.

Mientras tanto, en 1970, la compañía de Jesús transfirió el funcionamiento del observatorio a la Universidad de Granada. A partir de este momento empieza una nueva etapa de su historia en la que no entraremos, puesto que el objetivo de este capítulo es el análisis de la antigua instrumentación sísmica del Observatorio de Cartuja. Sin embargo, aun no pondremos fin al mismo, puesto que aún quedan algunos aspectos por analizar a los que pasamos acto seguido.

14. Los instrumentos de sismología aplicada

Ya comentamos en apartados anteriores el interés de Sánchez-Navarro por la sismología aplicada, y principalmente a la ingeniería. Por los escritos del autor, entendía éste como ingeniería aplicada tanto el estudio de las vibraciones de los edificios,

puentes y otras construcciones, como el estudio de las vibraciones de motores, naves, vagones, etc. Desde el punto de vista de la instrumentación, este interés se materializó en la construcción de diferentes aparatos muy dirigidos al estudio de vibraciones artificiales. El interés de Sánchez-Navarro por el tema fue muy temprano y puede apreciarse en su libro *Terremotos, sismógrafos y edificios* (1916), y en otras publicaciones (p. e., Sánchez-Navarro, 1915b).

Ya en el terreno de la instrumentación, que es el objetivo de nuestro estudio, en 1909, Sánchez-Navarro, al presentarnos su péndulo bifilar de demostración (Sánchez-Navarro, 1909d), aprovecha la oportunidad para comentar que se había construido un “cilindro receptor con motor de relojería, especialmente adaptado para mover la banda con gran velocidad (de 2 a 5 mm/s), indispensable para el importante estudio de los movimientos artificiales”, y incluye una fotografía del pequeño péndulo con el registrador descrito, lo que deja pensar que llegó a utilizarse este instrumento con esta finalidad.

Y ya poco después, en 1911 encontramos un primer modelo de instrumento construido expresamente con este fin y de 21.5 kg de masa (Sánchez-Navarro, 1911). Se trata del llamado tromómetro Cartuja. Por lo que apreciamos en las fotografías, no se trataba de un instrumento muy manejable (véase la imagen [Tromo1](#)). Estaba compuesto por un péndulo vertical de 21.5 kg de masa y sostenido por una estructura metálica en forma de U invertida. Este podía oscilar en una única dirección. Bajo la masa, la misma estructura sostenía el mecanismo multiplicador-inscriptor y, debajo de este, se encontraba un amortiguador de vaselina. La amplificación era variable entre 30 y 300. El registrador era el mismo que hemos descrito en el párrafo anterior. Como ya hemos dicho, por su peso (unos 25 kg en total) y dimensiones, no se trataba de un instrumento fácilmente transportable. Fue construido por A. Sola.

Continuando en esta línea, en 1913 se presentó en el Congreso de la Asociación española para el progreso de las ciencias de Madrid el llamado tromómetro de Cartuja “pequeño modelo”, para diferenciarlo del anterior (Sánchez Navarro, 1916). Se trataba nuevamente de un péndulo vertical; pero de dimensiones mucho más reducidas, fácilmente transportable y mucho más portátil. La masa oscilante del instrumento, péndulo vertical, de unos 5 kg, se hallaba en la parte inferior, inmediatamente por encima del trípode que le servía de base. Encima de la masa se hallaba el mecanismo inscriptor que no era único. Existía uno de una sola palanca y poco aumento y otro de dos palancas y gran aumento, intercambiables fácilmente. Con este sistema podían obtenerse amplificaciones variables entre 16 y 350 veces. La inscripción podía ser en tinta o papel ahumado. El buen contacto de las palancas inscriptoras se aseguraba con resortes en espiral, como en el péndulo vertical Cartuja; pero dada la pequeñez de la masa del instrumento, su presencia influía notablemente en el periodo propio del instrumento que variaba desde 0.535 s hasta 2.0 s. Disponía también de un amortiguamiento. Por lo tanto, con un instrumento cuya masa total no excedía de 6.5 kg (más 1.2 kg del receptor, que en las fotografías continuaba siendo del mismo tipo que el diseñado en 1909), y mucho más compacto, se había conseguido las mismas prestaciones que con el anterior tromómetro Cartuja. El autor material del instrumento fue, una vez más, A. Sola. Reproducimos una fotografía del mismo en la imagen [Tromo2](#). Ya hemos dicho anteriormente que este instrumento (o una copia del mismo) formó luego parte del grupo macrosísmico Alhambra.

En el Congreso de la Asociación española para el progreso de las ciencias de Sevilla, de 1917, presentó Sánchez-Navarro un nuevo instrumento para la sismología aplicada que recibió el nombre de Trerómetro Granero (Sánchez-Navarro, 1919b). Se trataba de un instrumento sumamente sencillo. La disposición de la masa y el sistema amplificador-inscriptor era muy parecido al tromómetro Cartuja “pequeño modelo; pero, en vez de utilizar el principio del péndulo vertical, se utilizó el del péndulo invertido (véase la imagen [Granero1](#)). En este caso, el efecto de todos los resortes actuantes (sobre la masa, de 7.5 kg, y las palancas) contribuía a reducir el periodo del instrumento que quedaba reducido a 0.15 s y, mediante la variación de la tensión del resorte en espiral de la primera palanca se podía variar el mismo. Su amplificación también podía llegar hasta 300 y disponía de registro en tinta (véase la imagen [Granero3](#)) y en papel ahumado. Se hicieron también pruebas para utilizarlo con registro óptico (inscrito en papel fotográfico, como es natural) con lo cual se alcanzaban amplificaciones del orden de 3000 a 60000 veces. Una de las posibles aplicaciones que Sánchez-Navarro sugiere para este aparato es su utilización para la localización de piezas de artillería en acción. No debe extrañarnos esta sugerencia porque durante la primera guerra mundial estos métodos llegaron a utilizarse efectivamente (véase Mier, 1917).

El último aparato construido en Cartuja para su utilización en sismología aplicada y del que tenemos noticia fue presentado en el congreso de la Asociación española para el progreso de las ciencias de Bilbao, en 1919 y también a finales de Noviembre de 1920, en ocasión del congreso nacional de ingeniería, en Madrid, en el que fue premiado con la medalla de plata (Sánchez-Navarro, 1921b). El nuevo instrumento se presentó bajo el nombre de macrotrerómetro Granero. Nos informa el mismo Sánchez-Navarro (1919b) que este instrumento era, en cierto modo, complemento del anterior y estaba (como su nombre indica) pensado especialmente para movimientos fuertes (o estremecimientos violentos en palabras de su autor).

Realmente, se trataba de un instrumento versátil en extremo y su diseño presentaba un ejercicio de simplificación extrema. Su elemento más voluminoso era el tambor receptor⁴⁰, limitándose su parte oscilante a una lámina de acero (realmente, se trataba de un trozo de cuerda de fonógrafo) fija por un extremo a la base del instrumento y su extremo libre rematado por un borne de latón al que se fijaban las distintas palancas y plumas inscriptoras (véase la imagen [Granero2](#)). Una pesa de latón (que podía intercambiarse por otra mayor) de 445 gr podía correrse y fijarse a lo largo de la lámina variando así el período. Por lo tanto, se trataba de una mezcla de péndulo invertido y lámina o barra flexible. El instrumento dentro de su caja (de madera y con medidas 26 cm de alto, por 25 cm de largo, por 21 cm de ancho) pesaba 4.5 kg y no era necesario extraerlo de la misma para utilizarlo. Podía registrar tanto el movimiento horizontal como el vertical con solo cambiar su posición. Su período propio era variable entre 0.025 y 0.65 s. No conocemos su amplificación, aunque en este caso no era muy grande y parece que no disponía de amortiguamiento. Con una elección conveniente de sus condiciones de trabajo podía funcionar también como clinómetro.

El prototipo de este instrumento, como todos los anteriores, fue construido por A. Sola y sabemos que tuvo una cierta difusión fuera del observatorio pues, como nos informa el mismo Sánchez-Navarro (1921a), copias del mismo (suponemos que para su

⁴⁰ Con velocidades de registro de 3.2, 4.5 y 15 mm/s y una banda de papel de 10 cm de anchura por hasta 10 m de largo.

venta) fueron luego construidas en los Talleres de Automática de Madrid⁴¹ y también por la casa constructora de aparatos científicos Dalmau Montero, de Barcelona. Entre otras aplicaciones, se hicieron pruebas con él para analizar el vaivén de los vagones de ferrocarril. En Sánchez-Navarro (1918) podemos ver algunos fragmentos de los registros obtenidos en diferentes vagones en la línea Granada-Madrid.

Para concluir este apartado, debemos recordar que, dada la relación que existía entre ambos, suponemos que el origen del interés y primeros instrumentos de Sánchez-Navarro para la sismología aplicada no puede estar muy lejos de los trabajos y diseños que por la misma época realizaba G. Alfani, del Osservatorio Ximeniano, en Florencia.⁴²

15. La difusión de la instrumentación de Cartuja en España

La instrumentación sismológica de Cartuja, como tal, no tuvo prácticamente difusión en España. Muy probablemente, esto se debe, por una parte, a su originalidad y, por otra, a que el Observatorio de Cartuja nunca pensó en actuar como fabricante de sismógrafos. Estos se construían para satisfacer las necesidades del registro del propio observatorio, y no con un interés específico en su comercialización. Sin embargo, es cierto que se construyeron algunos instrumentos para otros observatorios y, además, podemos seguir la influencia de sus diseños en diversos aparatos.

Concretamente, no existió ningún otro observatorio en España que utilizase aparatos construidos en Cartuja. Por lo tanto, solo encontramos la influencia de sus diseños. Veámoslo.

Primeramente nos referiremos a los sismógrafos del tipo Mainka que construyó el Observatorio del Ebro. Reciben el nombre Mainka porque su suspensión inferior se realiza mediante una lámina operando bajo tensión; pero, cuando observamos el diseño de todo el elemento de suspensión, notaremos enseguida cuanto debe su diseño a la misma pieza de los bifilares Cartuja, con sus diferentes tornillos que permiten un rápido centrado y cambio de período. Asimismo, su sujección a un muro, sin pie de soporte, recuerda totalmente a los bifilares Cartujanos. En cambio, no notamos traza de la influencia de Cartuja en su mecanismo inscriptor, a no ser por la ligereza de sus elementos, realizados en paja.

Otro instrumento que debe algo al observatorio de Cartuja es la reforma del sismógrafo Wiechert horizontal de Toledo, realizada por Vicente Inglada en 1920 (Rey Pastor, 1929). Se le dotó de un nuevo sistema amplificador-inscriptor, especialmente

⁴¹ Los Talleres de Automática eran dirigidos por el afamado ingeniero Leonardo Torres Quevedo y en su momento representaron un intento del estado para disponer de un taller-laboratorio que elaborase instrumentos científicos para las necesidades nacionales. Para más información sobre el tema véase, p. e. Moreno y Romero (1997).

También en este laboratorio se realizaron copias del modelo anterior, el “Trerómetro Granero”.

⁴² La difusión de alguno de sus trabajos fue notoria. Sin ir más lejos, a principios de 1911, los periódicos españoles se hacían eco de las experiencias que Alfani había realizado con su “trepidómetro” en la torre inclinada de Pisa. P. e., el periódico “La Vanguardia” de Barcelona le dedicaba una extensa nota ilustrada con fotografías en su “hoja científica” del día 19 de Enero de 1911.

ligero, que permitió dotarlo de una amplificación muy superior a la que tenía hasta el momento y que todavía podemos contemplar, puesto que este aparato todavía existe. La fuente de inspiración de este sistema, aunque para nada sea una copia de los originales, fueron los sistemas amplificadores de Cartuja.

También los péndulos bifilares y verticales construidos por Francisco Graiño en el Observatorio de San Fernando tienen una fuente de inspiración en los homónimos de Cartuja. Su sujeción directamente a un muro y el sistema de centrado de la suspensión inferior así lo translucen.

Finalmente, en los años previos a la guerra civil vemos aparecer el nombre de Sánchez-Navarro en algunos proyectos y reformas. En los años treinta se instaló una estación sísmica en el parque del Retiro de Madrid, en los locales hoy ocupados por el Centro Meteorológico Regional (Sánchez-Navarro, 1934). En ella había instalado un sismógrafo “Omori-Navarro (componente NE-SW) de 2000 kg. Sin duda se está refiriendo a un péndulo del tipo Bifilar Cartuja; pero no disponemos de ninguna información adicional sobre el mismo. También en el Observatorio de Almería se instaló, en 1936, un nuevo péndulo vertical de 800 kg de masa y que registraba la componente E-W. En los primeros años también ostentaba el nombre de Navarro, significando su inspiración en el péndulo vertical de Cartuja (pensemos, además, que en aquellos años la inspección del Observatorio de Almería era ostentada por F. Gómez Guillamón, lo cual aclara mucho el origen del instrumento).

16. La importancia de Cartuja para la sismología sudamericana

La influencia del Observatorio de Cartuja es, en contraposición a lo ocurrido en España, muy importante. De hecho, es determinante para los inicios de la sismología instrumental en varios países y la sismología sudamericana debe algunos de sus mejores sismógrafos al Observatorio de Cartuja.

El Observatorio de San Calixto

En 1911 Esteban Tortosa, hermano coadjutor y que trabajó en el observatorio de Cartuja entre 1907 y 1908, aunque por la información que disponemos no trabajó en la construcción de sismógrafos, instaló en el colegio de San Calixto, que regentaban los jesuitas, en La Paz, Bolivia, un péndulo horizontal Cartuja de 450 kg, idéntico por lo demás al de 305 kg existente en aquella época en aquel centro (15 s de período, dotado de amortiguamiento y una amplificación estática de 80 veces). En 1913, y siguiendo una recomendación formulada en el congreso de la asociación internacional de sismología de Manchester (1911), se decidió convertir este centro en una estación de primer orden. Se nombró como director del mismo al francés Pierre Descotes⁴³ (1877-1964), a quien ya hemos encontrado anteriormente al hablar de la construcción de diversos sismógrafos en Cartuja. Para dotarla decidió instalar un nuevo péndulo vertical de modelo muy parecido al Cartuja. Se componía de un recipiente de palastro, de forma cúbica y lleno de hierros de deshecho con una masa total de 1500 kg. Su montura era cardánica, con muelles de suspensión muy separados entre sí para evitar los movimientos de nutación

⁴³ En algunos escritos se le cita con la grafía Descottes.

de la masa y un sistema amplificador inscriptor formado por tres palancas (en vez de las dos de Cartuja). Registraba las dos componentes horizontales del movimiento del suelo (N-S y E-W) con un periodo propio de 2.4 s y una amplificación de 1000 veces (realmente notable en su tiempo). Posteriormente se añadió a estos equipos un nuevo sismógrafo bifilar del modelo Cartuja (componente N-S). Comenzó a prestar sus servicios en 1914 y tenía una masa 2000 kg, 14 s de período, una amplificación de casi 200 veces y estaba dotado de amortiguamiento. En abril de 1924 el bifilar de 450 kg fue reemplazado por uno de 3500 kg, con una amplificación de 300.

La estación se encontraba instalada en la cripta de la iglesia del colegio de San Calixto, lugar muy adecuado; pero que prestaba a los instrumentos un decorado que no deja de chocarnos, como puede verse en las imágenes [LaPaz1](#), [LaPaz2](#) y [LaPaz3](#) del CD-Rom. Por su situación y características, la importancia de este observatorio, tan ligado instrumentalmente al de Cartuja, fue fundamental para el progreso de la sismología a nivel mundial, recibiendo el elogio de Gutenberg and Richter (1954) que lo consideraron la más importante estación mundial a nivel individual.⁴⁴

La estación sismológica de Sucre

No sería La Paz, con toda su importancia, la única estación sísmica de Bolivia relacionada con Cartuja. En 1926 la compañía de Jesús instaló un nuevo observatorio sismológico en el colegio del Sagrado Corazón de Sucre (Bolivia). Nuevamente se utilizaron modelos de origen Cartujano. En un primer momento fue un péndulo bifilar de 3000 kg, período 12 s y amplificación 300 dotado, como es lógico, de amortiguamiento. Registraba la componente N-S. A partir de junio del mismo año encontramos también un péndulo vertical 1340 kg de masa, 3 s de período y amplificación 670 veces. Registraba la componente NE-SW. Desgraciadamente, no disponemos de más información al respecto, habiendo obtenido la que proporcionamos de los boletines sísmicos de la misma estación.

La estación sísmica del Colegio de San Bartolomé, Bogotá.

En 1916 Carlos Ortiz Restrepo y Enrique Pérez Arbeláez, jesuitas colombianos, fueron comisionados para hacer un breve curso de sismología en el observatorio de Cartuja. Como consecuencia, se encargó a los talleres de Automática de Torres Quevedo la construcción de un modelo de péndulo bifilar Cartuja. Por distintos motivos, este péndulo no llegó a Colombia sino años después y todavía tardó algunos años en instalarse. Entró en servicio en verano de 1921, instalado en la parte baja del Colegio de San Bartolomé, de Bogotá. Su masa era de 200 kg. Un poco más tarde Simón Sarasola, jesuita basco, instaló en el mismo colegio una estación meteorológica y mejoró la estación sísmica. En Junio de 1930 se instaló un segundo bifilar Cartuja, construido en Granada y de 1000 kg de peso. No tenemos más datos de estos instrumentos, y los que disponemos muestran contradicciones algunas veces (véase Ramírez, 1977; y Rafael, 1988). Queda claro, eso sí, que Cartuja contribuyó decisivamente al nacimiento de la sismología instrumental en Colombia.

El Colegio de Montserrat, Cienfuegos

⁴⁴ El lector encontrará informaciones adicionales en Descotes (1913) y Drake (1995).

Tenemos unos datos para la confusión. Sánchez-Navarro (1915) afirma que se construyeron en Cartuja las piezas principales (mecanismos y suspensiones) de un sismógrafo que funcionaba (ya en 1912) en el colegio de Montserrat, que regentaban los jesuitas, en Cienfuegos, Cuba. Por otra parte, una fotografía, conservada en el mismo observatorio de Cartuja y que reproducimos en el CD-Rom (imagen [bifilar5](#)), perteneciente a la suspensión inferior de un péndulo bilifilar, lleva la inscripción “Cienfuegos” anotada en su reverso. Sin embargo, nunca hemos tenido noticia de la existencia de una estación sismológica en dicho colegio. En cambio, existía en dicho lugar un observatorio meteorológico que publicaba regularmente sus boletines, a los que hemos tenido acceso, y no hemos encontrado ninguna referencia a la misma. Nos queda, por tanto, la duda de su existencia. Si parece claro, por otra parte, que este sismógrafo fue construido.

17. La influencia de Cartuja en Italia. Un viaje de regreso.

Recordemos como, al describir los primeros sismógrafos que se instalaron en el Observatorio de Cartuja, apuntamos su origen y adscripción a la escuela italiana de instrumentación sísmica. El trabajo sobre instrumentación desarrollado en Cartuja, abierto a todo lo bueno que se producía en cualquier parte del mundo e innovador, hizo que los modelos desarrollados en el observatorio se diferenciases enseguida de aquellos que les habían servido de primer modelo y, aún más, que los antiguos maestros copiaran de sus alumnos, en lo que definiríamos como un viaje tecnológico de ida y vuelta. Y es de este modo como, alrededor de los años veinte, encontramos algunos modelos de Cartuja en observatorios italianos.

Hemos detectado dos observatorios con instrumentos que llevan el nombre Cartuja o Navarro. Cronológicamente, el primero es el observatorio de “Valle di Pompei”,⁴⁵ cerca de Nápoles. En sus boletines encontramos, entre 1918 y 1924, la presencia de un “pendolo Navarro Neumann”. Su masa era de 850 kg, su período propio de 1.9 s y su amplificación estática de 320 veces. Por sus características se trata, sin duda, de una copia del péndulo Cartuja vertical. Su velocidad de registro era de 10.8 mm/min y parece que registraba dos componentes perpendiculares del movimiento del suelo.

También en el Osservatorio Ximeniano de Florencia hemos detectado la presencia de un péndulo Cartuja. Suponemos que se trataba también de un péndulo vertical. En este caso su masa era de 100 kg, su periodo de 6 s y su amplificación de 200 veces. La velocidad de registro era de 70 mm/min. Este último es un caso paradigmático, puesto que el director del observatorio Guido Alfani fue, como hemos dicho, uno de los consultores para la realización de la primera instalación de instrumentos sísmicos en Cartuja. Tampoco es de extrañar, puesto que la relación científica entre Alfani y Sánchez-Navarro fue constante. También hay que apuntar aquí que el director del observatorio de Valle di Pompei, G. B. Alfano, era discípulo de Alfani y podemos hipotetizar una influencia de Alfani en la introducción de sismógrafos de modelo cartujano en este observatorio.

⁴⁵ También llamado “Osservatorio Pio X”, en honor de dicho pontífice.

Finalmente, y como una segunda hipótesis no confirmada de influencia mutua, no deja de ser sintomático que el observatorio Ximenario y Cartuja desarrollaron casi en paralelo la construcción de versiones propias de los sismógrafos magneto-ópticos Galitzin.

18. Los sismogramas de Cartuja. Reflexión final

Ya para terminar este capítulo dedicado a la instrumentación sísmica del observatorio de Cartuja nos referiremos a sus registros, los sismogramas. En este tema, desgraciadamente, debemos decir que los sismogramas registrados por todos los sismógrafos descritos fueron irremisiblemente destruidos en los años sesenta; habiéndose perdido con ellos informaciones esenciales sobre alguno de los principales terremotos ibéricos de este siglo. Sin embargo, y recuperando un trabajo que realizamos hace algún tiempo y que aquí reproduciremos en parte (Batlló, 1999), diremos que existe la posibilidad de recuperar un número mínimo; pero no despreciable, de estos registros. Por una parte, un feliz hallazgo en el Observatorio del Ebro permitió recuperar contactos fotográficos de una treintena de gráficos correspondientes a diferentes terremotos registrados por diferentes sismógrafos de Cartuja⁴⁶ y, por otra, una revisión metódica de publicaciones científicas del siglo XX, en las que regularmente se publicaban resultados de los trabajos y observaciones sismológicas de la estación de Cartuja (la gran mayoría escritas por el ya mencionado Manuel M. Sánchez-Navarro Neumann), permitió hallar un buen número de reproducciones de gran calidad de diferentes gráficos de terremotos registrados por sus sismógrafos. Las fuentes consultadas se especifican en la tabla 2. En negrilla las fuentes principales y que han sido objeto de una consulta y vaciado exhaustivo y, a continuación, otras fuentes que nos han permitido completar la colección presentada. En total, disponemos nuevamente de poco más de un centenar de registros correspondientes a unos sesenta terremotos diferentes (regionales y telesismos) obtenidos en la práctica totalidad de los muy diversos aparatos que funcionaron en Cartuja, en un periodo que abarca desde 1903 hasta 1942. No descartamos que en un futuro pueda completarse este catálogo de gráficos de los sismógrafos de Cartuja con otros hallazgos, puesto que hay pistas de la existencia de más copias (véase, p. e., Sánchez-Navarro, 1934).⁴⁷

Presentamos el resultado de la investigación realizada en forma de tabla (tabla 3). Esta, se estructura en 15 columnas. La primera columna (*Reg.*) es un número de registro de referencia. Se asigna de forma que a cada terremoto le corresponda un número distinto. Así, registros con el mismo número de referencia corresponden a distintos sismogramas del mismo terremoto o a diferentes copias del mismo sismograma. Otros eventos registrados como ráfagas de viento, variaciones de presión o vibraciones de origen cultural no llevan número de registro. Algunos números van

⁴⁶ Era normal en aquellos años que los observatorios intercambiaran copias de sus sismogramas realizadas mediante contactos fotográficos.

⁴⁷ Precisamente, en el momento de escribir estas líneas, y dentro de los trabajos de preparación del centenario del observatorio, se está procediendo a recuperar un conjunto de negativos fotográficos existentes en el mismo observatorio de Cartuja y, entre ellos, se han encontrado algunas imágenes de sismogramas. No se ha procedido todavía a su identificación, y la premura de tiempo nos impiden incluirlos en el presente estudio; pero ya podemos avanzar que la lista aquí presentada podrá ampliarse con algunos sismogramas más.

acompañados de una letra que significa que todos los eventos con la misma letra se encuentran en el mismo gráfico. Las columnas 2-4 corresponden al año, mes, día y hora de registro del evento consignado. Las columnas 6-11 contienen la información de las características del aparato que realizó el registro: Nombre del instrumento, velocidad del registro en milímetros (*Vel. R.*), masa, amplificación estática o magnificación (*Mag.*), periodo propio del instrumento (*Per.*) y su amortiguamiento (*Amrt.*, $\epsilon:1$) cuando existe. Los espacios en blanco significan que no se ha encontrado el dato correspondiente que acompañe al gráfico. La duodécima columna (*Referencia*) indica la fuente de obtención del gráfico según la clave adjunta en la tabla 2. Se indica, cuando procede, volumen o año, mes y página en donde se encuentra. Las columnas decimotercera y decimocuarta consignan la latitud y longitud epicentral del evento y la decimoquinta columna refiere al lugar o tipo de evento y la fuente utilizada para consignar los datos epicentrales.

La colección así recuperada y que aquí presentamos nos permite adquirir, de primera mano, una idea de cómo era el registro sísmico en la estación de Cartuja y sus peculiaridades. Un primer apunte a destacar es que la velocidad de registro de los aparatos, aún para su tiempo, tendía, por motivos de economía de papel, a ser corta; detalle que, evidentemente, penaliza el contenido en altas frecuencias de los registros. También notamos la presencia de sismogramas estrella, cuyo gráfico es reproducido una y otra vez en diferentes revistas. Es el caso, por ejemplo, del registro del día 15 de noviembre de 1921 en el sismógrafo Berchmans, componente N-S, correspondiente a un terremoto siberiano.

También, la recuperación de estos gráficos debe permitirnos comprobar la validez de las constantes instrumentales publicadas en los boletines de la época y de las amplitudes del registro anotadas en los mismos, refrendando así la bondad de la utilización de estos registros en diferentes estudios. Finalmente, debe darnos la posibilidad, hasta ahora inexistente, de estudiar instrumentalmente algunos terremotos peninsulares, especialmente de la zona Bética y del mar de Alborán. En la figura 6 señalamos la localización de los eventos acaecidos en la península Ibérica o sus proximidades y ahora recuperados. Vemos que, efectivamente, los terremotos fuente de los gráficos recuperados se agrupan alrededor de Cartuja, en las Béticas, otro grupo en el Mar de Alborán y un tercer grupo en la zona de Murcia, quedando como escepciones dos terremotos pirenaicos (uno de ellos el correspondiente a la Canal de Berdún, de 1923) y el terremoto de Benavente, en Portugal (1909).

Concluimos así este capítulo dedicado a la instrumentación sísmica del observatorio de Cartuja, principalmente a sus diseños propios, que constituye una de sus principales aportaciones científicas a nivel internacional. Las realizaciones alcanzadas fueron, para su tiempo, de primer orden. Quizás no recibieron toda la difusión que debían en aquel momento; pero este hecho no les resta un ápice de su valor ni originalidad. Desgraciadamente, muy poco nos queda de todo ello, tanto de los instrumentos como de sus registros. No es óbice, sin embargo, para que no podamos valorar todo el trabajo realizado y, más importante, extraer todavía lecciones válidas para nuestras investigaciones actuales.

Bibliografía

- Actividad (1953). Actividad de los observatorios españoles durante el año 1952, *Urania*, **38**, 167-168
- Agamennone, G. (1897). Sismoscopio elettrico a doppio effetto, *Bolletino della Società Sismologica Italiana*, **3**, 37-45.
- Agamennone, G. (1902). Contre alcune obiezioni alla registrazione sismica a due velocità, *Bolletino della Società Sismologica Italiana*, **8**, 143-154.
- Anderson, J. A. and Wood, H. O. (1925). Description and theory of the torsion seismometer, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **15**, 1-72.
- Batlló, J. (1999). Un ensayo de reconstrucción de un archivo de sismogramas antiguos de la estación sismológica de Cartuja. En: Martín, J. y Pazos, A.: *100 años de observaciones sismológicas en San Fernando 1898-1998. Conferencias y trabajos presentados*, Boletín del Real Instituto y Observatorio de la Armada (ROA) núm. 5/99, 133-142.
- Batlló, J. and Bormann, P. (2000). A catalogue of old Spanish seismographs. *Seismological Research Letters* **71**, 570-582.
- Batlló, J. i Ugalde, A. (2000). Els sismògrafs de l'Observatori de l'Ebre, en: Batlló, J.; de la Fuente, P. i Puig, R. (Ed.): *Actes de les V Trobades d'Història de la Ciència i de la Tècnica*. IEC. Barcelona. pp. 161-165.
- Batlló, J. (2002). Sismologia colonial: la introducció de la sismologia instrumental a les illes Filipines (1865-1901), en: Batlló, J.; Bernat, P. i Puig, R. (Ed.): *Actes de les VI Trobades d'Història de la Ciència i de la Tècnica*, IEC, Barcelona, 215-224.
- Benioff, H. (1932). The variable reluctance transducer, *Bull. Seis. Soc. Am.*, **22**, 155-169.
- Berlage, H. P. (1932). Seismometer. En: Gutenberg, B. (Ed.): *Handbuch der Geophysik, Band IV*. Verlag von Gebrüder Borntraeger. Berlin, 299-528.
- Bosch, J. and Bosch, A. (1910). Seismische Apparate-Instrumente, Katalog Nr. 22, Elsass-Lothringische Druckerei, Strassburg, 35 pp.
- Bullen, K. E. and Bolt, B. A. (1985). An introduction to the theory of seismology. Cambridge University Press, Cambridge, xviii + 500 pp.
- Chung, W. and Kanamori, H. (1976). Source process and tectonic implications of the Spanish deep-focus earthquake of 29 March 1954, *Phys. Earth Plan. Int.*, **13**, 85-96.

- Cirera, R. (1906). Noticia del Observatorio y de algunas observaciones del eclipse de 30 de Agosto de 1905, *Memorias del Observatorio del Ebro*, núm. 1, Observatorio del Ebro, Tortosa, 60 pp + 12 láminas.
- de Cortázar, D. (1884). Discursos leídos ante la Real Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales en la recepción pública del Sr. D. Daniel de Cortázar. *Imprenta de la Viuda é hijo de D. E. Agudo*, 114 pp.
- de Rossi, M. A. (1879). La Meteorologia Endogena, Vol I, *Fratelli Dumolard*, Milano, Italia.
- de Rossi, M. A. (1882). La Meteorologia Endogena, Vol II, *Fratelli Dumolard*, Milano, Italia.
- Descotes, P. (1913). Le Nouvel Observatoire Sismologique de la Compagnie de Jésus á La Paz, Bolivie, *Imprenta Velarde*, La Paz, 16 pp.
- Dewey, J. and Byerly, P. (1969). The early history of seismometry (to 1900), *Bull. Seism. Soc. Am.*, **59**, 183-227.
- Drake, L. A. (1995). Letter to the editor, *Seismological Research Letters*, **66**, 7-8.
- Due, A. (1940). Contribución de la estación sismológica del Observatorio de Cartuja al Estudio de los seísmos españoles, *Asociación Española para el Progreso de las Ciencias, XVI Congreso (de Zaragoza)*, 140-145.
- Due, A. (1943). Una solución práctica al problema del registro galvanométrico, *Anales de Física y Química*, **39**, 5-9.
- Due, A. (1949a). El nuevo sismógrafo de la estación sismológica de Cartuja, *Rev. de Geofísica*, **8**, 470-474.
- Due, A. (1949b). Dos nuevos aparatos registradores del Observatorio de Cartuja, *Las Ciencias*, **14**, 205-213.
- Due, A. (1958). En el cincuentenario de la estación sismológica de Cartuja, *Rev. de Geofísica*, **17**, 83-88.
- Fernández de Castro, M.; Lasala, J. P.; Cortazar, D. y Gonzalo y Tarín, J. (1885). Terremoto de Andalucía: Informe de la Comisión nombrada para su estudio dando cuenta del estado de los trabajos en 7 de Marzo de 1885. *Imp. de M. Tello*, Madrid, 107 pp.
- Ferrari, G. (Ed.) (1990) Gli strumenti Sismici Storici. *SGA Storia-Geofisica-Ambiente*. Bologna, Italia, 198 pp.
- Ferrari, G. (Ed.) (1992a) Two hundred years of seismic instruments in Italy 1731-1940. *SGA Storia-Geofisica-Ambiente*. Bologna, Italia, 156 pp.

- Ferrari, G. (1992b). Vicentini microseismograph for the vertical component 1897. En Ferrari, G. (Ed.): *Two Hundred years of seismic instruments in Italy 1731-1940*. SGA Storia-Geofisica-Ambiente, Bologna, 132-133.
- Fouque, F. (1886). Mission d'Andalousie: Etudes relatives au tremblement de terre du 25 décembre 1884, et à la constitution géologique du sol ébranlé par les secousses, *Acad. Sci. Mem.*, **XXX**, 1-772.
- Galitzin, B. (1910). Über einen neuen Seismographen für die Vertikalkomponente der Bodenbewegung, *C. R. Comm. Sism. Perm.* **4**, Livr. 2.
- Galitzin, B. (1911). Über ein neues aperiodisches Horizontalpendel mit galvanometrischer Fernregistrierung, *C. R. Comm. Sism. Perm.* **4**, Livr. 1.
- Galitzin, B. (1921). Conferencias sobre sismometría, *Instituto Geográfico y Estadístico*, Madrid, 560 pp.
- Gómez Guillamón, F. (1942). Nuevo sismógrafo "Victoria", proyectado y construido en la estación sismológica de Málaga del Instituto Geográfico y Catastral, *Las Ciencias*, **7**, 23-37.
- González, F. J. (1995). Instrumentos Científicos del Observatorio de San Fernando (siglos XVIII, XIX y XX), *Instituto de Historia y Cultura Naval, Ministerio de Defensa*, Madrid, XXIV+286 pp.
- Granero, J. (1902a). El observatorio Astronómico, Geodinámico y Meteorológico de Granada, *Razón y Fe*, **3**, 222-225.
- Granero, J. (1902b). Observatorio de Granada. Sección Geodinámica, *Razón y Fe*, **3**, 512-520.
- Gutenberg, B. And Richter, C. F. (1954). *Seismicity of the Earth and Associated Phenomena*, 2nd edition, *Princeton University Press*, Princeton, 310 pp.
- Gutiérrez-Lanza, P. M. (1904). Apuntes históricos acerca del Observatorio del Colegio de Belén. Habana. *Imprenta Avisador Comercial*, Habana.
- Gutiérrez-Lanza, P. M. (1914). Conferencias de Seismología, pronunciadas en la Academia de Ciencias de la Habana, Habana.
- Kisslinger, K. (1967). *Lecture Notes on Seismological Instrumentation*. International Institute of Seismology and Earthquake Engineering, Tokio, 103 p.
- López Arroyo, A.; Martín, A. J.; Mezcuca, J.; Muñoz, D. y Udías, A. (1980). El Terremoto de Andalucía del 25 de Diciembre de 1884. *Instituto Geográfico Nacional*, Madrid, 139 pp.
- López arroyo, A., Cruz, J., Roca, A. and Olivera, C. (1990). Early seismo graphic instruments in Spain. En Ferrari, G. (Ed.): *Gli strumenti Sismici Storici*. SGA Storia-Geofisica-Ambiente. Bologna, Italia, 161-164.

- Marcolaín, P. (1889). Una estación sismológica, *Crónica Científica*, **12**, 129-131.
- Merino, M. (1905). Los terremotos experimentados en la Liguria y alta Italia, Suiza, y occidente y mediodía de Francia, *Revista de los Progresos de las Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, **22**, 196-204.
- Mezcua, J. and Batlló, J. (2003). Developments of the Seismological Sciences and their Instrumentation in Spain. En: Jennings P., Kanamori, H. and Lee W. (Ed.), *Handbook of Earthquake and Engineering Seismology*. Vol. 2. Academic Press, [in press].
- Mier, E. (1910). Memoria acerca de la organización del Servicio sismológico en España. *Imprenta del "Memorial de Ingenieros del Ejército"*, Madrid, 60p.
- Mier, E. (1917). La sismología en la guerra, *Ibérica*, **VII**, 107-110.
- Mohorovicic, A. (1924). A critical review of the seismic instruments used today and the organization of seismic service, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **14**, 38-59.
- Moreno, R. y Romero, A. (1997). Recuperación del instrumental científico-histórico del CSIC. Antecedentes del Instituto "Torres Quevedo". 1. El laboratorio de automática, *Arbor*, **CLVI**, 131-166.
- Omori, F. (1903). A Horizontal Pendulum Tromometer, *Publ. Earthquake Inv. Comm.*, Tokyo, **12**, 1.
- Pacher, G. (1897). I Microsismografi dell'Istituto di Fisica della R. Università di Padova, *Bolletino della Società Sismologica Italiana*, **3**, 65-131.
- Payo, G. y Gómez-Menor, R. (1998). Historia del Observatorio Geofísico de Toledo. *Instituto Geográfico Nacional*. Madrid. xviii+221 p.
- Prían, J., Quijano, J. y Catalán, M. (1992). La sismología en le Real Observatorio de la Armada. Desde los inicios de la sismología instrumental en España hasta la Red Sísmica del Estrecho (1897-1992), *Rev. de Geofísica*, **48**, 115-127.
- Rafael Goberna, J. (1988). The historical seismograms of Colombia. En: Lee, W. H. K.; Meyers, H. and Shimazaki, K.: *Historical Seismograms and Earthquakes of the World*. Academic Press, New York, 467-473.
- Ramírez, E. (1977). Historia del Instituto Geofísico al conmemorar sus 35 años, *Instituto Geofísico de los Andes Colombianos, Universidad Javerana*, Bogotá, 32 pp.
- Rey Pastor, A. (1929). Estudio crítico de los aparatos de la Estación Sismológica de Toledo, *Asociación española para el progreso de las ciencias, Congreso de Barcelona*, Tomo III, Sección 2ª.- Ciencias Astronómicas, 145-169.

- Rey Pastor, A. (1932). El Servicio Sismológico Español, *A Terra*, **1**, 36-40.
- Roca Rosell, A. (1992). *La física en la Catalunya finisecular. El joven Fontserè y su época*, Madrid, Universidad Autónoma de Madrid (tesis doctoral).
- Rodríguez de la Torre, F. (1999). Documentos del Observatorio de San Fernando y el Ministerio de Marina sobre la instalación del primer sismógrafo en España. En: Martín, J. y Pazos, A.: *100 años de observaciones sismológicas en San Fernando 1898-1998. Conferencias y trabajos presentados*, Boletín del Real Instituto y Observatorio de la Armada (ROA) núm. 5/99, 125-132.
- Rothé, E. (1940). Modèle de questionnaire envoyé aux stations pour préparer la “liste des stations du monde entier” dont la publication a été décidée par la conférence d’Édimbourg. En Neumann, F et Rothé, E. (Eds.): *Comptes Rendus des Séances de la septième conférence, Association de Séismologie, UGGI, Toulouse*, 285-314.
- Saderra Masó, M. (1895). *La seismología en Filipinas*, Manila, Observatorio de Manila, 125 p + figuras.
- Saderra Masó, M. (1915). *Historia del Observatorio de Manila*, Manila, E. C. McCullough & Co., Inc., 210 p + figuras.
- Sagrístá, J. (1920a). El Príncipe Boris Galitzin y su obra científica en Sismología, *Revista de la Soc. Astronómica de España y América*, **X**, 1-6.
- Sagrístá, J. (1920b). El Sismógrafo Galitzin, para el registro de la componente vertical, *Revista de la Soc. Astronómica de España y América*, **X**, 94-96.
- Sánchez-Navarro Neumann, M. M. (1907a). Les pendules Stiattesi à l’Observatoire de Cartuja (Granada), *Bolletino della Società Sismologica Italiana*, **12**, 409-416.
- Sánchez-Navarro Neumann, M. M. (1907b). Estudio comparativo de los instrumentos más usados en Sismología, *Revista de la Real Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales de Madrid*, **6**, 653-674, 761-772, 859-867 y 911-926.
- Sánchez-Navarro Neumann, M. M. (1908a). Estudio comparativo de los instrumentos más usados en Sismología, *Revista de la Real Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales de Madrid*, **7**, 121-144.
- Sánchez-Navarro Neumann, M. M. (1908b). Les sismographes construits a Cartuja (Grenade), *Cosmos*, **LIX**, 87-90.
- Sánchez-Navarro Neumann, M. M. (1908c). Le nouveau pendule horizontal de Cartuja, *Bolletino della Società Sismologica Italiana*, **13**, 207-218.
- Sánchez-Navarro Neumann, M. M. (1909a). Aperçu des instruments les plus usités en seismologie, *Ciel et Terre*, **XIV**, 295-326.

- Sánchez-Navarro Neumann, M. M. (1909b). El nuevo péndulo vertical de la Estación Sismológica de Cartuja, *Boletín de la Real Sociedad Española de Historia Natural*, **XIV (revisar)**, 387-394.
- Sánchez-Navarro Neumann, M. M. (1909c). Le nouveau Pendule vertical de la Station Sismologique de Cartuja (Grenade), *Ciel et Terre*, **XIV**, 397-405.
- Sánchez-Navarro Neumann, M. M. (1909d). Le séisme Hispano-Portugais du 23 Avril enregistré a Cartuja (Grenade) par un petit jouet scientifique, *Cosmos*, **LX**, 568-569.
- Sánchez-Navarro Neumann, M. M. (1910a). La composante verticale Vicentini de la station sismologique de Cartuja (Grenade), *Beiträge zur Geophysik, Kleine Mitteilungen*, **10**, 79-85.
- Sánchez-Navarro Neumann, M. M. (1910b). Le Tremblement de Terre Ibérique du 23 d Avril 1909, *Ciel et Terre*, **XV**, 41-66.
- Sánchez-Navarro Neumann, M. M. (1911). Tromomètre Cartuja, *Cosmos*, **LXIV**, 289-291.
- Sánchez-Navarro Neumann, M. M. (1912a). Algunas indicaciones sobre la construcción de un Sismógrafo para los terremotos locales y cercanos, y el estudio de los sismogramas, *Revista de la Soc. Astronómica de España y América*, **II**, 54-58.
- Sánchez-Navarro Neumann, M. M. (1912b). Sismographe Cartuja à composante verticale, *Cosmos*, **LXVI**, 635-636.
- Sánchez-Navarro Neumann, M. M. (1915a). 1903-1912. Diez años de actividad de la estación sismológica de Cartuja, *Asociación española para el progreso de las ciencias, Congreso de Madrid*, Tomo III, Sección 2^a.- Astronomía y Física del Globo, 245-264.
- Sánchez-Navarro Neumann, M. M. (1915b). Motores y edificios, *Ibérica*, **III**, 329-330.
- Sánchez-Navarro Neumann, M. M. (1916a). Tromómetro Cartuja (pequeño modelo), *Asociación española para el progreso de las ciencias, Congreso de Madrid*, Tomo IX, Sección 8^a.- Ciencias de aplicación, 183-196.
- Sánchez-Navarro Neumann, M. M. (1916b). Terremotos, Sismógrafos y Edificios, *Imprenta de Gabriel López del Horno*, Madrid, 252 pp.
- Sánchez-Navarro Neumann, M. M. (1918). Macrotrerómetro "P. Granero, S.I.", *Ibérica*, **10**, 46-48.
- Sánchez-Navarro Neumann, M. M. (1919a). Ensayo crítico sobre los sismógrafos más en uso. Generalidades y péndulos verticales de registro mecánico),

Asociación española para el progreso de las ciencias, Congreso de Sevilla, Tomo IV, Sección 2ª.- Astronomía y Física del Globo, 33-69.

Sánchez-Navarro Neumann, M. M. (1919b). Trerómetro Granero, *Asociación española para el progreso de las ciencias, Congreso de Sevilla, Tomo X, Sección 8ª.- Ciencias aplicadas, 119-122.*

Sánchez-Navarro Neumann, M. M. (1919c). Macrotrerómetro Granero, *Asociación española para el progreso de las ciencias, Congreso de Bilbao, Tomo X, Sección 8ª.- Aplicaciones, 167-173.*

Sánchez-Navarro Neumann, M. M. (1920). Ensayo crítico sobre los sismógrafos más en uso (péndulos horizontales e invertidos de registro mecánico), *Asociación española para el progreso de las ciencias, Congreso de Bilbao, Tomo IV, Sección 2ª.- Astronomía y Física del Globo, 51-89.*

Sánchez-Navarro Neumann, M. M. (1921a). Una estación sismológica española, *Revista de la Soc. Astronómica de España y América, XI, 92-102.*

Sánchez-Navarro Neumann, M. M. (1921b). Un appareil pratique de sismologie appliquée, *Ciel et Terre, XXVI, 14-20.*

Sánchez-Navarro Neumann, M. M. (1921c). El Sismógrafo “Berchmans”, *Imp. Y Lib. de Eulogio de las Heras, Sevilla, 8 pp.*

Sánchez-Navarro Neumann, M. M. (1922a). The Berchmans Seismograph, *Bull. Seis. Soc. Am., 12, 24-27.*

Sánchez-Navarro Neumann, M. M. (1922b). Le sismographe inverti “Berchmans” de la Station sismologique de Cartuja (Grenade), *Ciel et Terre, XXXVIII, 277-281.*

Sánchez-Navarro Neumann, M. M. (1924a). El sismógrafo “Javier” de la estación sismológica de Cartuja, *Ibérica, XXI, 391-395.*

Sánchez-Navarro Neumann, M. M. (1924b). Bendición especial para sismógrafos, *Razón y Fe, 69, 268-270.*

Sánchez-Navarro Neumann, M. M. (1924c). Bendición de los sismógrafos, *Ibérica, XXI, 376.*

Sánchez-Navarro Neumann, M. M. (1925). La componente vertical “Belarmino” de la estación sismológica de Cartuja (Granada), *Ibérica, XXIII, 217-222.*

Sánchez-Navarro Neumann, M. M. (1927). Les Séismographes de la Station Séismologique de Cartuja (Granada), *Publ. du Bureau Central Séismologique International, Série A, Travaux Scientifiques, Fasc. 4, 119-131.*

- Sánchez-Navarro Neumann, M. M. (1928). Actual cooperación de la Compañía de Jesús a los estudios sismológicos, *Ibérica*, **XXIX**, 58-62, 72-75 y 90-93.
- Sánchez-Navarro Neumann, M. M. (1929). La Exposición Ibero-Americana de Sevilla, *Ibérica*, **XXXII**, 362-368.
- Sánchez-Navarro Neumann, M. M. (1934). La sismología. Ojeada retrospectiva. Recientes progresos, *Ibérica*, **XLII**, 237-240, 255-256, 270-272, 300-304 y 317-319.
- Sieberg, August (1923). *Erdbebenkunde*, Verlag von Gustav Fischer, Jena, XIII+572 p.
- Tarramelli, T. and Mercalli, G. (1885). I terremoti Andaluci cominciati il 25 dicembre 1884, *R. Acc. Lincei*, **CCLXXXIII**.
- Thomson, W. T. (1981). *Theory of vibration with applications*, Second Edition, Prentice Hall, Inc., Englewood Cliffs, xvi+494 p.
- Torallas, E. (1924). Rapport sur l'Organisation du Service Sismologique en Espagne, *Instituto Geográfico y Catastral*, Madrid, 67 p. + láminas.
- Udías, A. y Mezcuca, J. (1986). Fundamentos de geofísica. *Editorial Alhambra*, Madrid, 420 pp.
- Wiechert, E. (1904). Ein astatishes Pendel hoher Empfindlichkeit zur mechanischen Registrierung von Erdbeben, *Beiträge zur Geophysik*, **6**, 437-450.

Figura 1: Diferentes tipos de sismógrafos utilizados en España según sus principios de construcción. (1) Péndulo cónico. (2) Péndulo rígido. (3) Péndulo Zöllner. (4) Péndulo vertical. (5) Péndulo de torsión. (6) Péndulo invertido. (7) Péndulo de barra flexible. (8) Péndulo cenital translacional. (9) Péndulo vertical rotacional. Véase explicación en el texto (de Batlló and Bormann, 2000).

Figura 2. Ampliación del sismograma correspondiente al registro del microsismógrafo Vicentini del día 3 de Enero de 1903 desde la 22 h, 15 m, 32 s a las 22 h, 21 m, 46 s. Es el registro más antiguo del Observatorio de Cartuja del que nos ha llegado copia y en él podemos apreciar la curiosa fisonomía del registro que se obtenía con el pantógrafo que amplificaba los movimientos horizontales de la masa (del Boletín Mensual del Observatorio de Granada, Vol I, núm. 2).

Figura 3. Apunte de la suspensión inferior de un sismógrafo bifilar Cartuja realizado por Sánchez-Navarro, y en donde puede apreciarse que mediante unos simples tornillos puede variarse la posición del resorte o muelle que sustenta la masa (de Sánchez-Navarro, 1919).

Figura 4. Esquema del mecanismo multiplicador-inscriptor del péndulo vertical Cartuja. Obsérvese el muelle helicoidal que obliga a que las palancas amplificadora e inscriptora permanezcan en contacto (de Sánchez-Navarro, 1919).

Figura 5. Esquema del contacto entre las palancas del mecanismo multiplicador-inscriptor del péndulo invertido Berchmans, que también fue adoptado en los bifilares Cartuja. Véase explicación en el texto (de Sánchez-Navarro, 1919).

Figura 6. Localización de los epicentros de terremotos acaecidos en la Península Ibérica y su entorno y cuyos gráficos obtenidos en la estación de Cartuja han sido recuperados. El número que acompaña cada epicentro corresponde a las dos últimas cifras del año en que se produjo y las coordenadas epicentrales de cada terremoto pueden consultarse en la tabla 3 (de Batlló, 1999).

Instrumento	Comp.	Periodo	Tipo	Masa
Stiattesi	N-S	1903-08	M 2 A	208
Stiattesi	E-W	1903-08	M 2 A	208
Vicentini Pacher	Horizontal	1903-08	M 4 A	308
Vicentini vertical	Z	1903-07	M 7 A	48
Vicentini vertical	Z	1907-08	M 7 A	48
Omori Modificado	NNW-SSE	1907-13	M 1 A	106
Vicentini Cartuja		1908-09	M 4 A	125
Cartuja Bifilar	NNW-SSE	1908-16	M 1 A	305
Wiechert	N-S	1908-12	M 6 A	200
Cartuja Bifilar	ENE-WSW	1909-16	M 1 A	425
Cartuja Bifilar	NNW-SSE	1910-11	M 1 A	46
Cartuja Bifilar	N-S	1919-60	M 1 A	340
Cartuja Bifilar	E-W	1919-60	M 1 A	340
Alhambra	NE-SW	1920 ?	M 4 A	5
Pendolo vertical Cartuja	NNW-SSE	1909-24	M 4 A	280
Pendolo vertical Cartuja	ENE-WSW	1911-23	M 4 T	87
Pendolo vertical Cartuja	N-S	1924-33	M 4 A	280
Pendolo vertical Cartuja	E-W	1934-60	M 4 A	370
Berchmans	N-S; E-W	1920-33	M 6 A	3060
Berchmans	N-S; E-W	1934-48	M 6 A	4260
Javier	ENE-WSW	1924	E 3 F	7.5
Javier	E-W	1924-28	E 3 F	7.5
Belarmino	Z	1924-66	E 9 F	3.5
Canisio	E-W	1929-66	E 2 F	1.5
Canisio	N-S	1931-66	E 2 F	1.5
Cartuja Máximo	E-W	1949-60	M 1 A	4500
Macrosismógrafo Cartuja		1949 ?	M 1 A	15
Hiller-Stuttgart vertical	Z	1966-85	E 9 F	~0.5
Hiller-Stuttgart horizontal	N-S	1966-85	E 2 F	~0.5
Hiller-Stuttgart horizontal	E-W	1966-85	E 2 F	~0.5

Tabla 1: Instrumentos utilizados para el registro de la sismicidad en el Observatorio de Cartuja. En la primera columna (instrumento) se consigna el nombre convencional de sismógrafo de que se trata. La segunda columna indica la (o las) componente del movimiento del suelo registrada. La palabra horizontal se corresponde con instrumentos que registraban ambas componentes horizontales con la misma plumilla. La tercera columna (Periodo) se refiere a los años en que el instrumento estuvo en activo. Se encuentra en blanco en unos pocos casos en los que no se sabe con certeza si llegó a funcionar o en que periodos lo hizo. La cuarta columna (Tipo) se subdivide en tres, la primera da información sobre el tipo de sensor utilizado para el sismógrafo (electromagnético –E- o mecánico –M-), la segunda a su principio constructivo, o

estructura mecánica, identificado por un número, como se explica en los apartados siguientes y la tercera al tipo de registro utilizado (A- papel ahumado, F- papel fotográfico, T- tinta sobre papel). Finalmente, la quinta columna (Masa) consigna la masa del instrumento.

ORIGEN DE LOS GRÁFICOS

Ebro	- <i>Contactos fotográficos existentes en el Observatorio del Ebro.</i> 32 reproducciones.
BMOG	- <i>Boletín mensual del Observatorio de Granada (vol. I a IV).</i> 15 reproducciones
CeT	- <i>Ciel et Terre.</i> 9 reproducciones
Ibérica	- <i>Revista Ibérica.</i> 11 reproducciones
SAdEyA	- <i>Revista de la Sociedad Astronómica de España y América.</i> 9 reproducciones
SEIC	- <i>Report of the California Earthquake Comission.</i> Carnegie Institution. Washington 1908.
COS	- <i>Le Cosmos, Revue des sciences et de leurs applications.</i>
URANIA	- <i>Revista Urania.</i>
PBCSI	- <i>Publications du Bureau Central Séismologique International.</i> Travaux Scientifiques. Série A. Fascicule no. 4.
TSyE	- <i>Terremotos, Sismógrafos y Edificios.</i> M. S. Navarro Neumann. Madrid 1916.
RyF	- <i>Razón y Fe.</i>
IGN	- <i>Memorias del Instituto Geográfico y Catastral.</i>
ING	- <i>Gli Strumenti Sismici Storici.</i> ING. 1990
ISA	- <i>Seismogramme des nordpazifischen und südamerikanischen Erdbebens am 16. August 1906.</i> E. Rudoph und E. Tams. Internationalen Seismologischen Assoziation. Strasburg 1907

Tabla 2: Fuentes utilizadas en donde se han localizado gráficos de sismogramas registrados en la estación de Cartuja. Las fuentes en negrilla son las principales y se han analizado y vaciado sistemáticamente mientras que las otras fuentes se han utilizado de forma ocasional, a través de referencias encontradas en las fuentes principales y para complementarlas.

Reg	Año	Mes	Día	Hora	Instrumento	VI. R.	Masa	Mag.	Per.	Amrt.	Referencia	Lat.	Lon.	Lugar
1	1903	1	3	22:15	Vicentini						BMOG, I , Feb, 3			
2	1903	2	1	10:02	Stiattesi E						BMOG, II, Ene	42N	102E	(BAAS)
3	1903	4	28	23:00	Stiattesi N						BMOG, II, Ene	39N	43E	Melazghird (BAAS)
4	1903	4	29	12:28	Stiattesi N						BMOG, II, Ene			
4	1903	4	29	12:28	Stiattesi E						BMOG, II, Ene			
4	1903	4	29	12:28	Vicentini	15					BMOG, II, Ene			
5	1903	9	23	1:28	Vicentini	15					BMOG, II, Ene	52S	160E	(BAAS)
6	1903	10	12	19:47	Vicentini	15					BMOG, II, Ene			
7	1904	4	4	10:00	Vicentini						BMOG, III, Ene	41.75N	23.25E	(BAAS)
7	1904	4	4	10:00	Stiattesi E						BMOG, III, Ene	41.75N	23.25E	(BAAS)
7	1904	4	4	10:00	Stiattesi N						BMOG, III, Ene	41.75N	23.25E	(BAAS)
	1904	4	24		Vicentini						BMOG, III, Ene	---	---	Temporal
8	1904	7	13	14:59	Vicentini						BMOG, III, Ene	42.7N	0.03E	Pau (IGN)
9	1905	7	9	9:53	Stiattesi N						BMOG, IV, Jul	50N	98E	(BAAS)
9	1905	7	9	9:53	Stiattesi E						BMOG, IV, Jul	50N	98E	(BAAS)
10	1906	4	18	13:24	Stiattesi E	6.5	208	25	17.6		SEIC	37.8N	121.6W	S. Francisco (BAAS)
11 ^a	1906	8	17	0:22	Stiattesi E	6.5	208				ISA	50N	180E	Aleutianas (BAAS)
11 ^a	1906	8	17	0:22	Stiattesi N	6.5	208				ISA	50N	180E	Aleutianas (BAAS)
12 ^a	1906	8	17	0:56	Stiattesi E	6.5	208				ISA	33.0S	71.6W	Valparaíso (BAAS)
12 ^a	1906	8	17	0:56	Stiattesi N	6.5	208				ISA	33.0S	71.6W	Valparaíso (BAAS)
13	1907	4	15	6:20	Stiattesi E			23.5	22		RyF, XVIII, 235	16.0N	99.4W	Méjico (BAAS)
14	1907	9	2		Omori	5.5	106	29	12.4	r=0.8	Ebro	50N	170E	Aleutianas (BAAS)
15	1907	10	21	4:33	Omori						CeT, 1908, 82	39N	68E	Karatogh (BAAS)
16b	1908	3	26		Omori						COS, LIX, 88-89			Chilapa
17b	1908	3	27		Omori						COS, LIX, 88-89			Chilapa
18	1908	5	2	11:37	Wiechert						Ebro			

Reg	Año	Mes	Día	Hora	Instrumento	VI. R.	Masa	Mag.	Per.	Amrt.	Referencia	Lat.	Lon.	Lugar
19	1908	5	19	10:20	Bifilar						Ebro	37.2N	4.1W	(IGN)
20e	1908	6	6	5:42	Bifilar		305	100	6.7	2.5	Ebro	38.0N	1.2W	(IGN)
21e	1908	6	6	8:39	Bifilar		305	100	6.7	2.5	Ebro	36.9N	4.0W	Arenas del Rey (IGN)
21	1908	6	6	8:39	Bifilar		305	100	6.7	2.5	COS, LIX, 90	36.9N	4.0W	Arenas del Rey (IGN)
22	1908	6	9	19:35	Bifilar		305	100	6.7	2.5	Ebro			
23	1908	12	28	4:23	Bifilar NNW		305	80	11	3.5	Ebro	38.2N	15.6E	Messina (ING)
23	1908	12	28	4:23	Wiechert N	11.5	200	126	4	5	Ebro	38.2N	15.6E	Messina (ING)
23?	1908	12	28		Wiechert 200						CeT, 1909, 311	38.2N	15.6E	Messina ??
24	1909	1	23	2:57	Omori NNW?		106	30	14	4	Ebro	33N	50E	Persia (BAAS)
24	1909	1	23	2:57	Bifilar		305				Ebro	33N	50E	Persia (BAAS)
25	1909	4	23	17:40	Omori NNW		106	30	14	4	Ebro	38.95N	8.82W	Benavente (IGN)
25d	1909	4	23	17:40	Wiechert N	11.5	200	77	5	5	Ebro	38.95N	8.82W	Benavente (IGN)
25d	1909	4	23	17:40	Wiechert E	11.5	200	80	6.3	4	Ebro	38.95N	8.82W	Benavente (IGN)
25	1909	4	23	17:40	Omori		106	33	14	2	CeT, 1910, 42	38.95N	8.82W	Benavente (IGN)
25	1909	4	23	17:40	Omori mod.		106	33	14	4	TsyE	38.95N	8.82W	Benavente (IGN)
25	1909	4	23	17:40	Omori		106	33	14	4	COS, LX, 569	38.95N	8.82W	Benavente (IGN)
26	1909	6	11	21:07	Bifilar ENE		425	60	17	3	CeT, 1909, 321	43.5N	5.3E	St. Cannat (BAAS)
27	1909	8	2	14:42	Vertical						CeT, 1909, 404	38.9N	8.8W	Lisboa (IGN)
28	1909	9	29	8:16	Vertical		280	500	2.2		Ebro	37.08N	3.6W	IV F.M. 30-40km (IGN)
29g	1910	6	16	10:52	Bifilar NNW		305	60	7	3	Ebro	36.7N	3.6W	II F.M. (IGN)
30g	1910	6	16	16:27	Bifilar NNW		305	60	7	3	Ebro	36.7N	3.6W	IV F.M. (IGN)
30	1910	6	16	16:27							Ibérica, II, 288	36.7N	3.6W	(IGN)
31	1910	6	24	13:28	Vertical				2		Ebro	36N	4E	Argelia (BAAS)
31	1910	6	24	13:28	Bifilar		305	60	7	3	Ebro	36N	4E	Argelia (BAAS)
31	1910	6	24	13:28	Bifilar NNW		305				CeT, 1911, 110	36N	4E	Argelia (BAAS)

Reg	Año	Mes	Día	Hora	Instrumento	VI. R.	Masa	Mag.	Per.	Amrt.	Referencia	Lat.	Lon.	Lugar
32	1910	10	27	0:59	Bifilar NNW		305	93	8	5	Ebro	35.5N	4.5W	(IGN)
32	1910	10	27	0:59	Bifilar ENE		425	113	10	4	Ebro	35.5N	4.5W	(IGN)
32	1910	10	27	0:59	Vertical						Ebro	35.5N	4.5W	(IGN)
32	1910	10	27	0:59	Bifilar ENE				10	4	TsyE	35.5N	4.5W	Tetuán (fragmento)
32	1910	10	27	0:59	Bifilar ENE		425				PBCSI, A, IV, 123	35.5N	4.5W	Tetuán (IGN)
33	1911	1	3	23:35	Bifilar ENE	~10	425	85	10	3.6	SadEyA, I, 13			Turquestan
33	1911	1	3	23:35	Bifilar ENE		425	85	10	3.6	CeT, 1911, 80			Turkestan
34	1911	3	21	14:15	Bifilar NNW		305	95	8	3	SadEyA, II, 122	38.02N	1.22W	Lorquí (Murcia) (IGN)
34	1911	3	21	14:15	Bifilar ENE		425	104	10	4	SadEyA, II, 122	38.02N	1.22W	Lorquí (Murcia) (IGN)
35	1911	5	31	15:13	Bifilar ENE			95	10	3	SadEyA, I, 54	37.2N	3.7W	Santafé (IGN)
36	1911	6	15	14:39	Bifilar ENE			118	10	3	TsyE			Japón
37	1914	10	3	17:31	Vertical	15-16	280	580	2		Ebro	16N	64W	(ISS)
37	1914	10	3	22:12	Vertical	15-16					Ebro	37.5N	32.5E	Anatolia (ISS)
38	1915	1	13	6:56	Bifilar E20N		425	60	13	4	SadEyA, V, 9	42.0N	13.5E	Avezzano (ISS)
39	1915	4	23	15:40	Bifilar E20N	9-10					Ebro	3.0S	68.0W	(ISS)
39	1915	4	23	15:40	Bifilar N20W						Ebro	3.0S	68.0W	(ISS)
39	1915	4	23	15:40	Vertical 280	15-16					Ebro	3.0S	68.0W	(ISS)
40	1918	4	28		Bifilar E		340	50	9	4	Ibérica, IX, 380	37.22N	3.68W	Santafé (enjambre) (IGN)
41	1919	6	29								ING	43.8N	11.2E	Italia (ING)
42	1919	9	10	10:40	Bifilar E		340	60	10	4	SadEyA, IX, 86	38.08N	0.83W	Torremondo (IGN)
43	1921	10	20	6:15	Berchmans E			605	5.2	>10	Ebro	18.0S	66.0W	Iquique (ISS)
43	1921	10	20	6:15	Berchmans N						Ebro	18.0S	66.0W	Iquique (ISS)
44	1921	11	15	20:46	Berchmans N		3060	560	5.4	2.8	Ebro	36.5N	70.5E	Siberia (ISS)
44	1921	11	15	20:46	Berchmans N		3060	640	5.1	2.8	SadEyA, XI, 99	36.5N	70.5E	Siberia (ISS)
44	1921	11	15	20:46	Berchmans N						Ibérica, XVII, 114	36.5N	70.5E	(ISS)
45	1922	1	9	5:17	Berchmans N						Ebro	24.0N	46.0W	(ISS)
45	1922	1	9	5:17	Berchmans E						Ebro	24.0N	46.0W	(ISS)

Reg	Año	Mes	Día	Hora	Instrumento	VI. R.	Masa	Mag.	Per.	Amrt.	Referencia	Lat.	Lon.	Lugar
	1922	1	17		Berchmans						Ebro	---	---	Tormenta
46	1922	1	17	4:01	Berchmans N		3060	491	6.1	2.8	Ebro	2.0S	72.0W	Venezuela (ISS)
47c	1923	7	9	15:31	Berchmans N						SadEyA, XIII, 86	35.57N	3.53W	Melilla (IGN)
47	1923	7	9	15:31	Berchmans N						Ibérica, XXVIII, 123	35.57N	3.53W	Melilla (fragmento) (IGN)
47	1923	7	9	15:31	Bifilar N	9-10	340				Ibérica, XXVIII, 123	35.57N	3.53W	Almería (fragmento) (IGN)
48c	1923	7	10	5:32	Berchmans N						SadEyA, XIII, 86	42.55N	0.95W	Berdún (IGN)
49	1924	5	1	20:07	Javier	9.5	7.5				Ibérica, XXI, 392	14.0N	89.0W	(ISS)
50	1924	5	4	17:11	Javier	0.5	7.5				Ibérica, XXI, 392	22.0S	179.0E	(ISS)
51	1925	3	1	2:28	Belarmino		690		12	$\mu_2=10$	Ibérica, XXIII, 219	48.2N	70.8W	Canada-USA (ISS)
52	1925	6	28	1:32	Belarmino						PBCSI, A, IV, 130	46.4N	111.2W	Montana (USA) (ISS)
53	1926	6	12	23:29	Belarmino						Ebro	36.8N	2.4W	Almería (IGN)
53	1926	6	12	23:29	Belarmino						Ibérica, XXXII, 184	36.8N	2.4W	Almería (IGN)
53	1926	6	12	23:29	Belarmino						PBCSI, A, IV, 129	36.8N	2.4W	Almería (IGN)
	1926	7	30	~6:30	Vertical						Ibérica, XXVI, 298	---	---	Pseudosismograma
54	1927	9	8	8:53	Belarmino						CeT, 1928, 54	35.33N	3.67W	Alhucemas (IGN)
55	1930	7	3	23:00	Belarmino	10					Ibérica, XXXVI, 185	---	---	Turbonada
F	1930	7	3	23:02	Canisio E	10					Ibérica, XXXVI, 185	---	---	Rafagas de viento
56f	1930	7	4	1:00	Canisio E	10					Ibérica, XXXVI, 185			
57	1930	9	3	10:00	Berchmans E						Ibérica, XXXV, 310	38.07N	1.23W	Murcia (IGN)
58	1931	2	13	1:48	Belarmino						Ibérica, XXXVI, 172	39.5S	176.9E	N. Zelanda (réplica) (ISS)
59	1940	8	25	0:22	Berchmans N						IGN, XVII, 34	38.12N	1.33W	Segura Medio (IGN)
	1941	3	7		Belarmino	10					R. Geof, n22, 209			Agitación microsísmica
60	1942	8	1		Belarmino	10					Ebro			Nueva Zelanda (ISS)
					Tromómetro						CeT, 1921, 19	---	---	
					Macroterómetro							---	---	

Tabla 3: Catálogo de gráficos de terremotos de la estación de Cartuja recuperados. Véase la explicación de las columnas en el texto del artículo.