



MINISTERIO DE DEFENSA

REAL INSTITUTO Y OBSERVATORIO DE LA ARMADA
EN SAN FERNANDO

BOLETIN ROA

No. 1/2006

Astrometría de satélites geoestacionarios. Técnica de observación, reducción de imágenes y puesta a punto de la cámara CCD del Astrógrafo Gautier del ROA.

**Fundación Alvargonzalez
Real Instituto y Observatorio de la Armada**

Carlos Abad Hiraldo

Foto Portada:
Fachada Edificio Principal del Real Instituto y Observatorio de la Armada
(Siglo XVIII)



MINISTERIO DE DEFENSA

REAL INSTITUTO Y OBSERVATORIO DE LA ARMADA
EN SAN FERNANDO

BOLETIN ROA

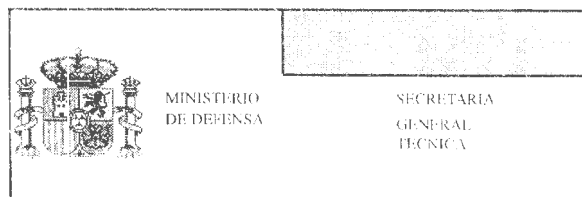
No. 1/2006

Astrometría de satélites geoestacionarios. Técnica de observación, reducción de imágenes y puesta a punto de la cámara CCD del Astrógrafo Gautier del ROA.

**Fundación Alvargonzalez
Real Instituto y Observatorio de la Armada**

Carlos Abad Hiraldo

Edita:



Imprime: Real Instituto y Observatorio de la Armada
San Fernando (Cádiz). Febrero 2006
Depósito Legal: CA 469-78
ISSN 1131-5040
NPO 076-06-053-2

**BECA FUNDACIÓN ALVARGONZÁLEZ
AÑO 2005**

**ASTROMETRÍA DE SATÉLITES
GEOESTACIONARIOS.
TÉCNICA DE OBSERVACIÓN,
REDUCCIÓN DE IMÁGENES Y PUESTA A
PUNTO DE LA NUEVA CÁMARA CCD DEL
ASTRÓGRAFO GAUTIER DEL ROA.**

*Dr. CARLOS ABAD HIRALDO
Centro de Investigaciones de Astronomía
Venezuela*

Carlos Abad (CIDA). Beca Alvargonzález 2005

Quisiera agradecer, en primer lugar, a la Fundación Alvargonzález el honor de haberme concedido esta beca para el presente año, así como al resto de integrantes del proyecto PASAGE (Posicionamiento Astrométrico de SATélites GEOestacionarios) quienes han participado en la mayoría de los tópicos que se exponen en la presente memoria y en la obtención de gran parte de los datos y conclusiones aquí expuestos. Mi deseo es el de compartir con todos ellos la titularidad de esta memoria. El proyecto PASAGE está financiado por el Ministerio de Educación y Ciencia (# AYA2004-03298)

Carlos Abad (CIDA). Beca Alvargonzález 2005

Índice

1. Introducción

- La colaboración CIDA-ROA
- Los satélites geoestacionarios
- El proyecto PASAGE

2. Las observaciones desde Venezuela

- Factibilidad de un proyecto
- Los equipos del Observatorio Nacional de Venezuela
- Las observaciones respecto a los telescopios

3. Las observaciones en el ROA

- El telescopio Astrógrafo Gautier
- La nueva cámara CCD
- Las observaciones

4. Primeros resultados

- Observaciones sobre los satélites Hispasat
- Observaciones sobre los satélites Intelsat
- Algunos resultados en números

5. Algunos apuntes sobre las herramientas de trabajo

6. El futuro

7. Bibliografía

Carlos Abad (CIDA). Beca Alvargonzález 2005

1. INTRODUCCIÓN

- ***La Colaboración CIDA-ROA***

Es difícil poner una fecha a la presente colaboración entre ambas Instituciones, pues ella podría datarse desde el preciso instante en que al autor de esta memoria se le concedió una beca por parte del Instituto de Cooperación Iberoamericana para su formación en el área de la Astrometría Meridiana, con el fin de colaborar en Venezuela al estudio, y quizás posterior traslado del telescopio Círculo Meridiano (marca Askania), que estaba situado en el Observatorio de Cagigal en Caracas.

A dicha concesión le siguieron dos años de permanencia en el Instituto y Observatorio de Marina (actual Real Instituto y Observatorio de la Armada) y posteriormente su contratación, por parte de la Fundación Centro de Investigaciones de Astronomía (CIDA), como investigador de dicha Fundación.

Desde dicho momento, el área de investigación asignada en el CIDA fue la Astrometría Fotográfica, área novedosa para mis conocimientos pero con la gran ventaja de contar como maestro al Dr. Jürgen Stock, constructor y primer director del Observatorio Nacional de "Llano del Hato" de Venezuela (OAN), además de primer presidente de la Fundación CIDA.

El haber compartido durante dos años las inquietudes del ROA en el área de la Astrometría me hizo apreciar el gran valor, no sólo histórico de su placoteca, sino principalmente científico. Los conjuntos de placas fotográficas correspondientes a los proyectos fotográficos Catálogo Astrográfico (AC) y Carta del Cielo (CdC) fueron siempre, y más en cuanto más orientado estaban mis trabajos hacia este tipo de detector, objeto de mis intereses profesionales. Hay que tener también en cuenta la jubilación progresiva de la mayoría de los integrantes del plantel profesional del ROA relacionado con la Astrometría

Fotográfica y la tendencia a que dichas placas quedaran exclusivamente como material histórico.

Desde la década de los 80 ha quedado un espíritu de cooperación que se vió reflejado en la primera publicación conjunta *Reduction of the Astrographic Catalogue, zone of S. Fernando*, que en 1998 salió publicada en la revista europea *Astronomy & Astrophysics, Supplement Series*, cuyos autores eran C. Abad y K. Vieira, por parte del CIDA, y A. Zambrano por el ROA. (Abad et al. 1998)

Posteriormente, y ya a mediados de los 90, se creó un convenio de colaboración entre ambas Instituciones y fruto del mismo fue el comienzo de otro proyecto de colaboración consistente en la digitalización de las placas de la Carta del Cielo, con el fin de lograr un catálogo astrométrico para las mismas. El proyecto fue encabezado por parte del ROA por el Dr. M. Sánchez. Dicho proyecto ha ido sufriendo transformaciones por fuerza mayor y en la actualidad, parte del mismo, está siendo desarrollado por la Lic. Belén Vicente como base de su trabajo de tesis doctoral, inscrita en la Universidad de Zaragoza (B. Vicente, 2004).

Es a partir del año 2003 cuando una nueva vía de investigación se abre para la colaboración. Es el proyecto *Posicionamiento Astrométrico de Satélites Geoestacionarios* (PASAGE). Para su definición se requirió de la ayuda del CIDA en las primeras observaciones, a fin de asegurar la factibilidad del proyecto en su parte astrométrica. Posteriormente se formaliza la colaboración en la solicitud ante el Ministerio de Ciencia y Tecnología, y el mismo es aprobado en junio de 2004 con referencia AYA2004-03298. La presente memoria hace énfasis en estos primeros esfuerzos encaminados a la determinación de los elementos orbitales de los satélites geoestacionarios.

Las primeras observaciones, observaciones dedicadas a facilitar el método de observación de este tipo de satélites, son realizadas desde el Observatorio Astronómico Nacional de Llano del Hato en Venezuela (OAN). Es en marzo de 2005 cuando las observaciones comienzan a realizarse en forma simultánea tanto en el OAN como en el ROA, ya que el ROA adquiere un nuevo CCD para su astrógrafo Gautier, y es a partir de octubre del presente año cuando se traslada íntegramente el peso de la observación al ROA.

Problemas propios de la observación y de factores accidentales han retrasado la consecución de resultados confiables hasta el momento, sin decir con ello que no se haya avanzado enormemente en el proyecto. El mal tiempo

ha sido una constante en la zona del Caribe durante todo el año 2005 y ello se ha reflejado en el área andina de Mérida, donde se encuentra situado el OAN. Podríamos decir que han sido menos de 10 días de observación los aprovechados durante el presente año de 2005, los cuales se han distribuido a lo largo del mismo, sin continuidad o regularidad entre ellos. De igual forma, problemas originales de la nueva cámara CCD adquirida por el ROA han ocasionado el tener que hacer uso de la garantía de la misma, con el trastorno que ello significa al tener que ser enviada a Madrid y posteriormente a EEUU en dos ocasiones.

La presente memoria hace un recuento de lo acontecido hasta el momento de su elaboración, mostrando los resultados preliminares, tanto los relacionados con el método designado para la observación y reducción de imágenes, como los primeros resultados del ajuste entre observaciones y teoría asociada a la determinación de los elementos orbitales. Para ello se han hecho uso de observaciones realizadas sobre los satélites Hispasat y algún Intelsat, obtenidas en ambos observatorios: OAN y ROA

- ***El satélite geoestacionario***

El satélite geoestacionario podría definirse como aquél que permanece en reposo respecto a una Tierra rotante. Para su estudio, lógicamente es más útil seleccionar un sistema cuasi-inercial unido al centro de masas de la Tierra y que rota con ella alrededor del Sol, teniendo en cuenta todos aquellos elementos que inestabilizan al mismo, como puede ser la precesión, nutación, movimiento del polo, etc., y referir las observaciones a dicho sistema. Si el problema fuera un problema de dos cuerpos, los elementos orbitales que definen cualquier órbita geoestacionaria carecerían de sentido, al ser ésta de carácter plano, circular, situada sobre el ecuador y girar en el mismo sentido que el sistema de referencia. Lógicamente, esto no se cumple y las propias irregularidades de la Tierra como cuerpo y las perturbaciones producidas principalmente por las acciones del Sol y de la Luna y en menor medida del viento solar hacen que se cree un movimiento diurno en el satélite y que dicho movimiento se vaya desplazando en el tiempo. Ello conlleva la necesidad de ejecutar, regularmente, maniobras de puesta en estación del satélite, a fin de que no se salga de la ventana asignada en el ecuador para él.

El libro *Introduction to geostationary orbits* (Soop E.M., 1983) da una visión muy completa de la teoría de este tipo de satélites, recomendando su lectura para cualquier trabajo que los involucre. De ese mismo libro es posible destacar la formulación básica (1) que relaciona las coordenadas obtenidas de la observación astronómica, como lo pueden ser la ascensión recta y la declinación (las cuales pueden ser llevadas u obtenidas casi directamente como longitud y latitud) con los elementos orbitales del satélite. Dicha formulación ha sido la base que, hasta este momento, se ha aplicado en el trabajo, excluyendo la relacionada con la distancia Tierra-satélite, la cual deberá obtenerse por otros métodos, sea por paralaje o comunicación por doble vía.

$$\begin{aligned} r &= A + \delta\alpha - A \cdot e \cdot \cos[\psi \cdot (t - t_0)] \\ \lambda &= \Omega + \omega - G_0 - \psi \cdot t_0 - \frac{3 \cdot \delta\alpha}{2 \cdot A} \cdot \psi \cdot (t - t_0) + 2 \cdot e \cdot \sin \psi \cdot (t - t_0) \\ \mathcal{G} &= i \cdot \sin[\omega + \psi \cdot (t - t_0)] \end{aligned} \quad (1)$$

El satélite geoestacionario está situado en el espacio sobre el plano del ecuador, restringiendo sus movimientos a un área de la esfera celeste o ventana, con unas grandes limitaciones de espacio debido a lo cotizado de este tipo de órbitas. Esta ventana, en el caso de los satélites Hispasat, se restringe a 0.1 grados en latitud y 0.14 grados en longitud. Debido a la deriva propia de las posiciones hacia puntos de estabilidad del plano del ecuador, sus posiciones deben ser corregidas frecuentemente. Para los satélites Hispasat, por ejemplo, esta frecuencia es cercana a las dos semanas.

Otra característica de este tipo de satélites es la existencia de eclipses cuando el satélite pasa por el cono de sombra que proyecta la Tierra al interponerse en la dirección Sol-satélite. Estos eclipses pueden ocurrir durante 46 días del año, con mayor o menor duración en cada uno de estos días, correspondiendo su máximo a 71 minutos. Estos eclipses se presentan alrededor de los equinoccios, siendo los máximos para estas fechas.

Respecto a su luminosidad o magnitud observada, ella depende de la posición relativa Sol-Tierra-satélite, apreciándose un gran descenso cuando este ángulo es mayor a las 8 horas. La magnitud puede variar entre 5V y 6V en los equinoccios y entre 11V y 14V en los solsticios, aunque estas magnitudes no deben ser un problema determinante para la observación cuando se dispone de un buen detector y un telescopio de cierta apertura.

- ***El proyecto PASAGE***

El proyecto PASAGE, acrónimo de Posicionamiento Astrométrico de SATélites GEoestacionarios, fue oficializado por el Ministerio de Ciencia y Tecnología, con la referencia AYA2004-03298 en junio de 2005, después de haber sido solicitado al comprobar la factibilidad de la obtención de posiciones a nivel astrométrico con observaciones del telescopio J. Stock del OAN en Venezuela, haciendo uso de una modificación en la técnica del barrido continuo para estas observaciones.

Uno de los objetivos del proyecto es crear efemérides precisas de satélites geoestacionarios a partir de observaciones con calidad astrométrica, con la finalidad de suministrarlos a las agencias que manejan dichos satélites y así contribuir a la planificación y ejecución de las maniobras de mantenimiento en estación en una forma más precisa que la actual.

Lógicamente las condiciones climáticas son un factor decisivo en este tipo de observaciones y aunque se puede pensar en un conjunto de puntos de observación simultáneos, ello disminuye, pero no elimina, dicho inconveniente. Por esto es aconsejable la combinación de estas observaciones astrométricas con métodos alternativos de observación que no dependan de la meteorología.

Como método complementario para obtener la posición de los satélites destacamos el sistema de transferencia de tiempo mediante doble vía (Two Way System Time and Frequency Transfer, TWSTFT), método utilizado por la Sección de Hora del ROA, para la contribución de las escalas de tiempo al establecimiento de la escala del Tiempo Atómico Internacional.

El TWSTFT involucra a una red de laboratorios y frecuencia. La transferencia de tiempo se realiza mediante la transmisión sucesiva de señales de radio desde cada una de las estaciones. Cada una de estas señales es retransmitida por un satélite geoestacionario y recibida en el resto de las estaciones. Para la calibración de las estaciones el método es aplicado en forma individual por cada una de ellas, mandando y recibiendo la propia señal retransmitida por el satélite, obteniendo de este proceso el tiempo que tarda dicha señal en ir y volver a la propia estación. A partir de este tiempo, una vez

corregido por los elementos que perturban su marcha ideal, podremos obtener una medida de la distancia al satélite, distancia que podría incorporarse al proceso de posicionamiento del satélite.

No es la única forma de cálculo de distancias y de hecho, los satélites Hispasat cuentan con el uso de medidas goniométricas de azimut, elevación y distancia obtenidas de la diferencia de fase entre tonos de señales de radio transmitidas desde tierra y retransmitidas por el satélite. Para ello cuentan con dos estaciones, las situadas en Arganda del Rey (Madrid) y Maspalomas (Islas Canarias). En ocasiones operan con una sola estación, siendo exclusivamente la orientación de la antena la que permite el cálculo de las coordenadas de azimut y de elevación, con un gran error en la determinación. Lógicamente el error en distancia es mucho más pequeño, alrededor de los 10 m., mientras que el error en posicionamiento de la antena con relación a la dirección estación-satélite es del orden de los 0.005 grados, lo cual equivale a 18 segundos de arco, que contrastan enormemente con los 0.1 segundos de arco que se pueden obtener fácilmente por medios astrométricos.

Los objetivos del proyecto a partir de los datos de observación son claros: determinación de las orbitas de los satélites, comprobación del resultado de las maniobras y elaboración de modelos semi-analíticos de evolución de cada uno de los satélites seleccionados. Y esperamos que estos objetivos se alcancen más fácilmente cuando se incorpore al proyecto la cámara Baker-Nunn, diseñada en los años 50 para su instalación en el ROA, pero que está a la espera de que sea trasladada a su nueva ubicación, el nuevo Observatorio Catalán situado en el Montseny.

2. Las observaciones desde Venezuela

- ***Factibilidad de un proyecto***

En este punto querría resaltar la gran responsabilidad que se asumió en el OAN al convertirse en el encargado de definir la factibilidad o no de conseguir posiciones astrométricas confiables para satélites de este tipo. Las pruebas dieron una respuesta afirmativa hasta un nivel similar al conseguido para objetos estelares y empleando técnicas normales de observación.

La responsabilidad inicial recayó en el telescopio J. Stock debido a la versatilidad de sus modos de operatividad y que uno de esos modos de operatividad parecía el más adecuado para ser el soporte principal del método de observación a aplicar tanto en las pruebas como en el futuro.

Como veremos más adelante, cada telescopio ha aportado una visión diferente del problema de observación de un objeto móvil sobre un fondo fijo o viceversa y el conjunto ha ido creando las condiciones en las que creemos se deben enmarcar las observaciones en el futuro.

- ***Los equipos del Observatorio Nacional de Venezuela***

El Observatorio Astronómico Nacional de Llano del Hato posee 4 grandes telescopios, de los cuales tres están en operatividad y el cuarto, un astrógrafo doble de 51cm de apertura cada uno, todavía en fase de montaje. La

mayoría de ellos, cámara Schmidt (1m), recientemente bautizada como telescopio J. Stock en honor al Dr. J. Stock quien falleció en el año 2004, Refractor (0.65m) y el Astrógrafo Doble (0.51m) son telescopios astrométricos, mientras que el Reflector (1m) tiene un carácter algo más astrofísico debido a la facilidad de incorporar instrumentos como un fotómetro y un espectrógrafo como detectores.

En la Fig. 1 podemos ver las cúpulas que contienen 3 de los telescopios, así como un aspecto parcial del OAN.

El telescopio J. Stock de 1m de apertura tiene un espejo de 1.5 m. y una distancia focal de 3.01 m., lo cual lleva a un factor de escala aproximado de 15 micras por segundo de arco. El telescopio tiene instalado en su plano focal un mosaico de 16 CCDs, los cuales están repartidos de manera equitativa sobre cuatro dedos paralelos, sin dejar espacio libre entre los CCDs situados sobre un mismo dedo, y de tal forma que el límite inferior en declinación observado por cada 4 CCDs (uno de cada dedo) es el mismo. De esta forma, al operar en modo de barrido continuo o driftscan, toda el área del cielo que pase sobre los cuatro CCDs situados sobre el primer dedo pasará también por los otros tres grupos de CCDs correspondientes a los otros tres dedos, obteniendo cuatro veces el mismo campo de observación en forma casi simultánea. Los dedos son movibles para poder adaptar al máximo el paralelismo del paso de las estrellas según su declinación, cuando son observadas en el modo de barrido continuo. Este diseño, con finalidad astrofísica al poder colocar diferentes filtros según el dedo, no va a afectar a nuestras observaciones ya que nuestro satélite aparecerá solamente en un CCD.

Las características de los CCDs son comunes y consisten en CCDs cuadrados, de 2048×2048 píxeles, de 15×15 micras cada píxel. Una descripción detallada del conjunto telescopio-mosaico y en especial del mosaico puede encontrarse en Baltay et al. (2002). La escala final va a ser aproximada a un píxel por segundo de arco y el campo abarcado en el cielo por cada uno de los CCDs de 34×34 minutos de arco, algo más de 0.5×0.5 grados.

El telescopio Reflector tiene una apertura de 1m. y su distancia focal es aproximadamente 21 m., lo que hace que la escala nominal del telescopio sea de 100 micras por segundo de arco. Tiene acoplada una cámara CCD, entre otros detectores, construida por el equipo técnico del CIDA, de 2048×2048 píxeles de 15×15 micras cada píxel. Según esto, cada segundo de arco equivale a 6.7 píxeles y el campo abarcado por el CCD en el cielo es de 5×5 minutos de arco.



Fig.1 Tres de las cuatro cúpulas del Observatorio Astronómico Nacional “Llano del Hato” de Venezuela.

El telescopio Refractor de 0.65 m. de apertura tiene una distancia focal aproximada de 10.5 m., que corresponde a un factor de escala de 50 micras por segundo de arco. No posee en la actualidad un CCD asignado especialmente a él, aunque se espera que pueda ser aprovechado el nuevo CCD 2k IMG 42-40 en forma compartida con el telescopio Reflector, en cuanto entre en operatividad. Por el momento y para las observaciones del satélite se utilizó una pequeña cámara de 1535×1024 píxeles de 13×13 micras cada uno, pero con menores prestaciones que los CCDs antes señalados para el resto de los telescopios. Esta cámara CCD abarca un campo en el cielo de

aproximadamente 4×6 minutos de arco, siendo necesario el uso de filtros durante la observación para compensar los efectos de la aberración cromática del telescopio.

Las Figuras 2, 3 y 4 muestran los telescopios y alguna parte característica relacionada con sus detectores o su operatividad. Para el telescopio J. Stock: el propio telescopio, la Cámara YIC y la sala de control de las observaciones. Para el telescopio Reflector: dos de sus detectores, además del propio telescopio. Y por último el telescopio Refractor en forma solitaria, aunque puede verse en él, el CCD y el ordenador portátil utilizados durante las observaciones del proyecto.



Fig. 2. Telescopio J. Stock 1m. Contiene el detector Cámara YIC o mosaico de 16 CCDs montados en forma simétrica sobre cuatro dedos. Para la operación de la Cámara existe un cuarto de observación con 7 ordenadores que la controlan.



Fig. 3. Telescopio Reflector 1m. Tiene una distancia focal de cerca de 21m. Entre sus detectores se encuentran: un espectrógrafo y varias cámaras CCD de diseño propio del CIDA.

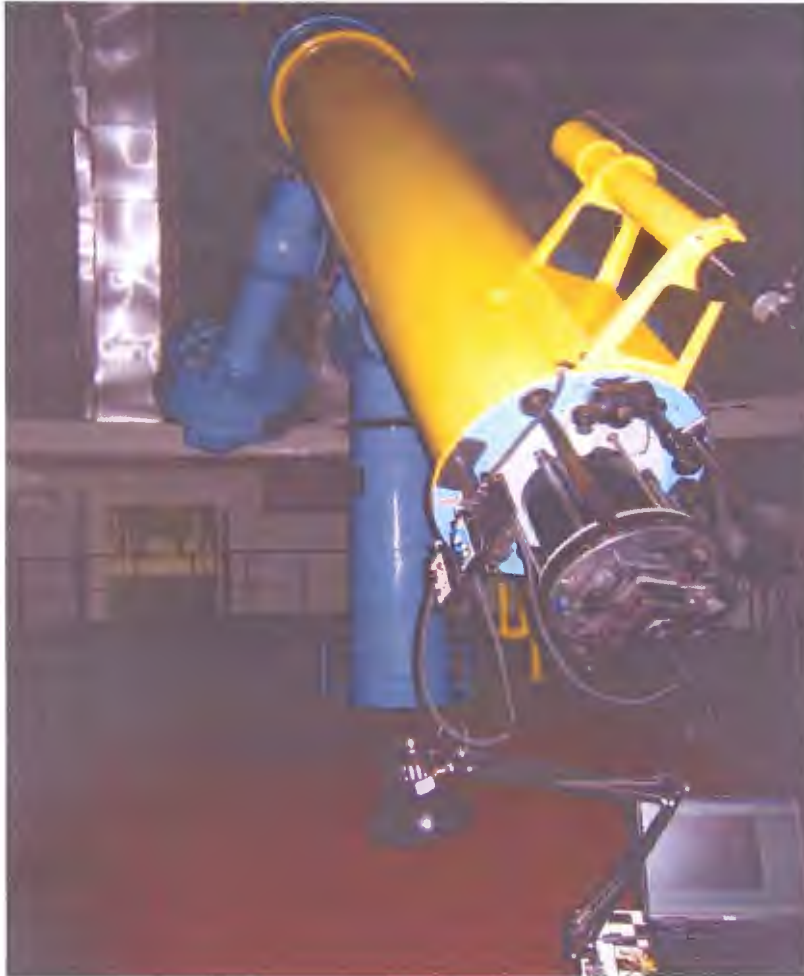


Fig. 4. Telescopio Refractor 0.65m. Su distancia focal es de 10.5m. Cuenta con cámara fotográfica, micrómetro filiar y pueden acoplarse cámaras CCD comerciales.

• *Las observaciones respecto a los telescopios*

Las observaciones que se han venido realizando para el proyecto PASAGE han utilizado los tres telescopios del OAN y éstas han debido ser adecuadas a las características de sus detectores, es decir, de los CCDs acoplados a ellos. De esta manera cuando se hizo uso del telescopio J. Stock se aplicó la técnica de observación de barrido continuo pero con alguna modificación, debido al gran tamaño del obturador (40 cm.) de la cámara y a la falta de control directo, en los actuales momentos, del instante exacto de cierre y apertura del mismo. Cuando se utilizó el telescopio Reflector, las observaciones fueron en forma directa, espaciadas a lo largo de la noche debido a la gran demanda de uso del telescopio para diferentes proyectos. Y cuando se usó el telescopio Refractor también se empleó la observación directa, pero con la ventaja de poder hacer uso exclusivo del telescopio para el proyecto durante toda la noche, lo cual trajo grandes beneficios.

Las primeras observaciones sobre satélites se realizaron en el año 2003 con la única finalidad de demostrar que éramos capaces de obtener posiciones sobre estos satélites, con parecida precisión, en posición, a la conseguida para cualquier estrella. El satélite geoestacionario tiene la particularidad de estar relativamente fijo respecto a la Tierra y por tanto en movimiento respecto al conjunto de estrellas y objetos de la bóveda celeste. Ello implicaba que cualquier observación iba a combinar objetos puntuales y trazos, bien por mantener fijo el telescopio o bien por conectar el motor sidéreo al mismo. Es por esto que se seleccionó para estas observaciones iniciales el telescopio J. Stock, equipado con una electrónica que le permite la observación en forma de barrido continuo.

De igual forma, el mayor problema cuando un objeto se mueve sobre un fondo fijo o viceversa, es el determinar cual va a ser el punto a medir y el instante exacto en que se produjo la imagen en dicho punto. Es frecuente el uso de observaciones que contengan varias exposiciones creadas mediante el cierre y apertura sucesivos del obturador. De esta forma, o bien los trazos o bien los huecos entre trazos servirán para definir puntos a medir. Basta como ejemplos a esta técnica aplicada a satélites los siguientes trabajos: Escane et al. (2001) y Alby (2003). Dado que la magnitud de los satélites en sus momentos

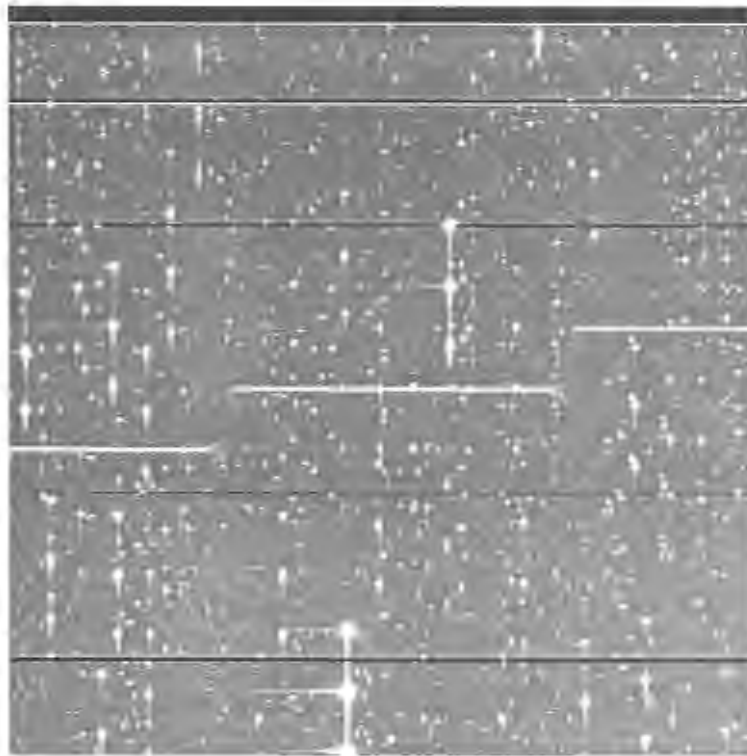
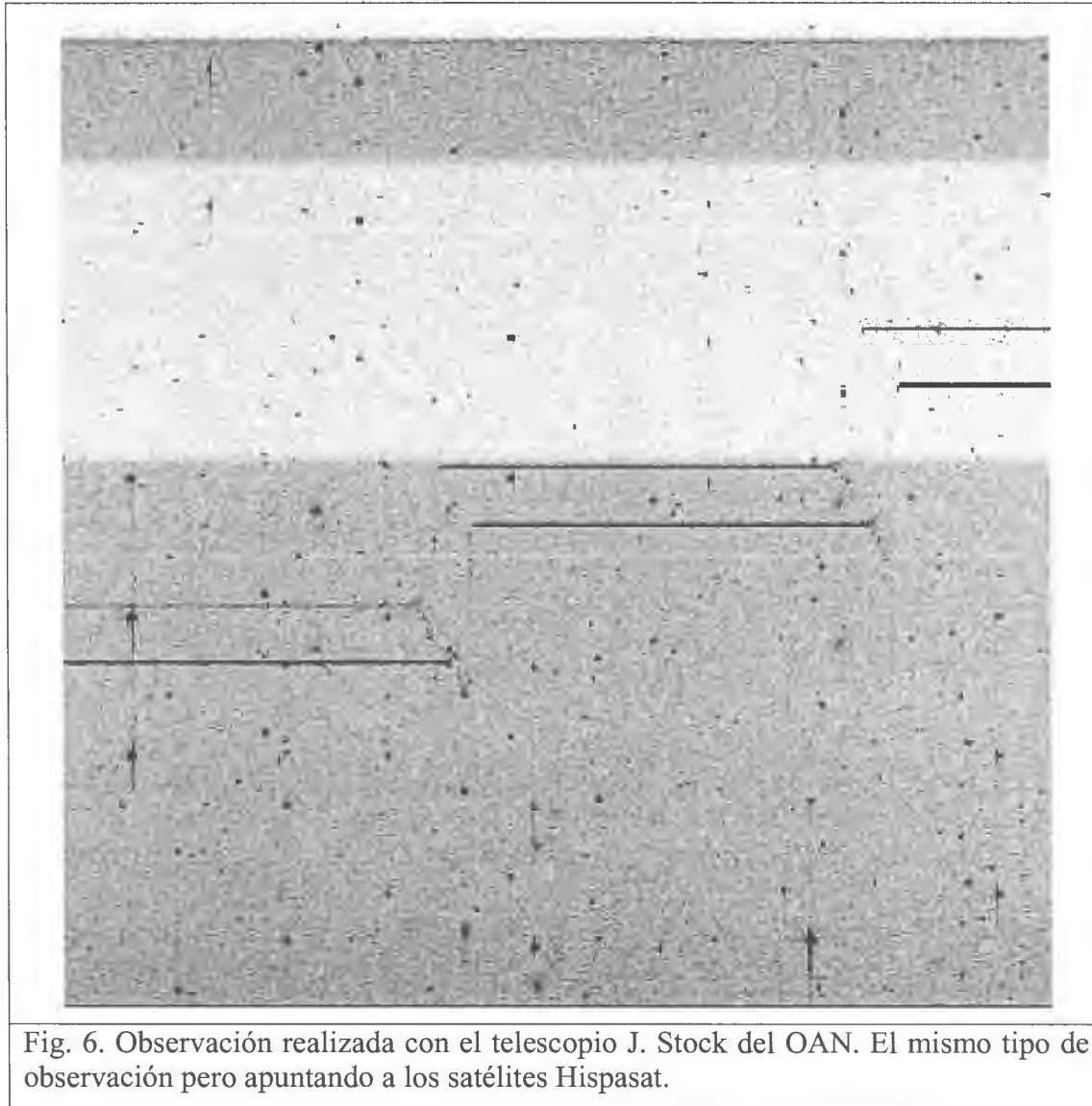


Fig. 5. Una de las primeras observaciones realizadas sobre el satélite Intelsat 706 y que fue base para el comienzo del proyecto PASAGE. Observación realizada con el telescopio J. Stock del OAN. La técnica de observación es la del barrido en forma continua, con la variante de mover en forma sistemática el telescopio en declinación, para definir instantes y puntos claros de medida para la posición del satélite.



más brillantes era suficiente para dejar rastro visible durante la observación con el telescopio J. Stock, se decidió hacer uso de este telescopio con el modo de barrido continuo, de forma que las estrellas salieran en forma puntual mientras el satélite dejara un trazo continuo. Por otro lado, y dado que la falta de control sobre el instante exacto de apertura y cierre del obturador era evidente, se desechó la técnica de múltiples exposiciones durante la observación y se ensayó con una variante del método de observación en modo de barrido continuo que suponía el movimiento físico del telescopio, aprovechando que la

operación del telescopio indica cuando comienza y termina el mismo y el operador puede indicar con mayor aproximación, que no exactitud pues es en forma visual, el momento de inicio del movimiento o mejor dicho el momento en que la consola reacciona a la orden de ejecución del movimiento. Este error, que no deja de ser error, era en principio más controlable que el relacionado con el obturador y de unas pocas décimas de segundo de tiempo en magnitud.

La técnica empleada se puede resumir en la siguiente forma: primero, se inicia la observación en forma de barrido continuo, dejando el satélite un trazo continuo sobre la dirección de ascensión recta y a declinación constante; a continuación y en forma regular, a cada minuto de tiempo por ejemplo, se realiza un salto en la posición del telescopio en declinación, no muy grande pero sí lo suficiente para que las propias imágenes de las estrellas no se sobremonten con ellas mismas en la siguiente posición, por lo general estos saltos fueron de 5 minutos de arco; por último, y ya en la reducción de las observaciones, los puntos a medir serán las intersecciones de los trazos del satélite con el débil trazo dejado durante el movimiento del telescopio. Este débil trazo puede definirse por el ajuste de una recta a puntos obtenidos de él, y entonces los puntos a medir como posiciones del satélite serán las diferentes intersecciones entre rectas, la del trazo y la del movimiento y el tiempo asignado a cada punto será el tiempo apuntado por el operador que corresponde al comienzo del movimiento indicado por la consola de control del telescopio. Quizás todo esto suena algo complicado pero, al no disponer de un medio confiable de control del tiempo, lo consideramos en su momento suficiente para comprobar que la astrometría podría dar buenos resultados y gracias a ello se realizó la petición del proyecto PASAGE ante el Ministerio de Ciencia y Tecnología del gobierno español.

La Fig.5 muestra un cuadro de 2048x2048 píxeles de la observación del satélite Intelsat 706, y la Fig. 6 otro de una observación de los satélites Hispasat. En ambas se puede apreciar el método utilizado para la observación.

Durante la reducción de posiciones, el trazo correspondiente al movimiento no es siempre fácil de obtener, y tiene cierta incertidumbre. A veces hay cierta dificultad para detectar 2 o 3 puntos que permitan definir la recta que se ajusta al trazo que representa el movimiento del telescopio. La formación de diferentes sistemas de referencia, o mejor dicho, la aparición en diferentes puntos del cuadro del sistema de referencia debido al movimiento del telescopio, puede ser usado para determinar la precisión del cálculo de los puntos de intersección de rectas.

El método está lleno de inexactitudes ya que los tiempos de movimiento del telescopio, que son mostrados en pantalla, deben ser tomados por el operador en forma visual, acarreado un error personal que debería ser detectado y aplicado. Por otro lado, a cada salto del telescopio, las estrellas de referencia cambian de lugar, creando un nuevo sistema de referencia que se comparte, sobre la misma observación, con los anteriores y posteriores y el cual es estable para todas aquellas estrellas que se mantuvieron en algún momento presentes en la exposición durante el minuto de tiempo para el cual no hubo cambios de posición. Esta acumulación de sistemas de referencia, si bien complica la reducción de la observación, puede ser utilizada para la determinación de todo tipo de errores. La repetitividad de la posición de una misma intersección respecto a los diferentes sistemas nos dará el control sobre la coordenada ascensión recta y la constancia en la distancia entre diferentes posiciones en declinación de un mismo punto, la precisión en declinación.

Los primeros resultados arrojaban unos valores de precisión de alrededor de 0.015 segundos de tiempo en ascensión recta y 0.25 segundos de arco en declinación, y vienen mezclados con el movimiento del propio satélite, la inexactitud en el movimiento mecánico del telescopio y en su posicionamiento, la inexactitud de los tiempos de orden y de control real del movimiento que muestra el programa de control del telescopio y los errores propios de la reducción de las imágenes. Por ello es posible encontrar en una reducción preliminar, errores relativamente grandes en ascensión recta como 0.25 segundos de tiempo, valores respetables si los traducimos a incertidumbre en la posición del satélite, que a una distancia de 35900 km desde la superficie de la Tierra equivale a 800 m.

La reducción de las observaciones se realizó de acuerdo a la teoría desarrollada por J. Stock (1981) y el programa de aplicación de la misma, CM1. Los resultados fueron suficientes para apoyar al proyecto PASAGE, el cual fue aceptado en junio de 2005 por el Ministerio de Ciencia y Tecnología del gobierno español con la referencia AYA2004-03298.

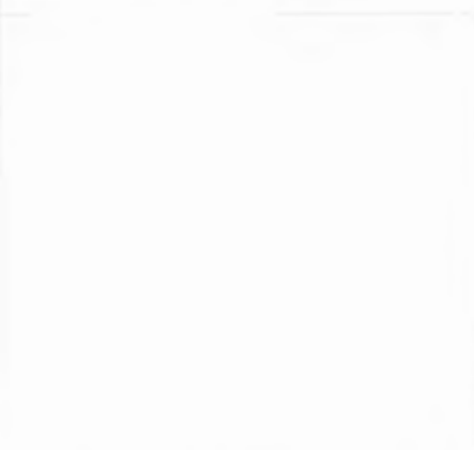
Durante el año 2005 se han continuado las observaciones con dicho telescopio y aunque el tiempo ha sido pésimo se han conseguido algunas noches de observación efectivas, aunque los resultados demuestran los mismos problemas de incertidumbre expresados anteriormente. Ello hace que el sistema no sea confiable hasta tanto no se logre controlar, en alguna forma, el instante exacto del movimiento del telescopio.

Referente al telescopio Reflector, el método seguido es el de la observación en modo directo teniendo el telescopio fijo, es decir, sin movimiento sidéreo. Con ello se logra que el satélite permanezca fijo sobre el CCD, al menos durante el tiempo que dura la exposición, mientras que las estrellas van a pasar por delante de él dejando, como imagen, un trazo tan largo como el que corresponde al tiempo de exposición. Una variante del mismo es abrir y cerrar el obturador durante la exposición tantas veces como se desee, controlando el instante de cada apertura y cierre y el tiempo que permanece abierto. El trazo será discontinuo y cada tramo puede ser utilizado para realizar sobre él un ajuste por mínimos cuadrados de una función que lo represente y que no pensamos deba ser la clásica función *gaussiana* sino la función *tepui*, probada ya en otros trabajos (Abad et al. 2004). La Figura 7 nos muestra dos de los tipos de observaciones efectuados con este telescopio.

Existe el mismo problema en la actualidad que el encontrado en el telescopio J. Stock. La falta de confiabilidad en el control del instante de apertura y cierre del obturador. En primer lugar porque el CCD está diseñado para que en el momento de recibir la orden de comienzo de la observación, el programa de control introduzca una exposición *bias* (o de lectura del CCD) antes de ejecutar la propia observación. En segundo lugar todavía no existe el control sobre el reloj del ordenador que maneja el CCD para que nos muestre el tiempo hasta el nivel de precisión de 0.01 segundos, en parte porque este tipo de observaciones, con estas exigencias, no se había presentado por el momento, ni se esperaba que se presentara. Habría que realizar variaciones en el control que todavía están por programar. En tercer lugar, el control del tiempo de inicio de cierre y apertura del obturador del CCD, tanto en exposiciones únicas como múltiples, es por el momento manual y el tiempo debe tomarse en forma personal y visual. Por todo esto, las observaciones se usaron para realizar pruebas de ajuste con la función *tepui* sobre las imágenes, dejando para una futura segunda fase de la investigación la utilización de las posiciones conseguidas. Tanto el ajuste de la función *tepui* a un trazo único, como a los tramos discontinuos que componen el trazo, darán buenos resultados, siempre y cuando la relación señal/ruido sea alta. Para ello es preciso que en las observaciones entren estrellas brillantes.



Realizando exposiciones múltiples sobre el mismo cuadro



Dejando una única exposición



Fig. 7. Dos formas de realizar observaciones directas, fijando el telescopio en una posición que contiene el satélite Intelsat 903. Ambas formas se han aplicado a las observaciones del proyecto realizadas con el telescopio Reflector del OAN.

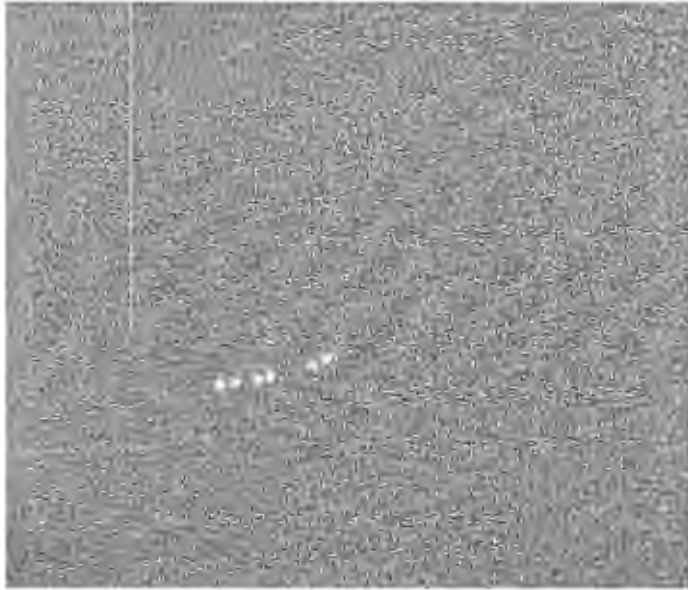
Un problema adicional es la gran distancia focal del telescopio que dificulta el proceso de observación, ya que hay que tener en cuenta que el satélite no permanece estático durante toda la noche, pudiendo moverse varios minutos de arco sobre la esfera celeste. Con un campo de observación tan pequeño como el ofrecido por el CCD acoplado a dicho telescopio, el movimiento diurno del satélite puede salirse incluso del campo observado. Este inconveniente junto al de la inexactitud del instante de comienzo de la observación, como antes se explicó, hacen necesaria que la programación de estrellas a capturar durante la observación se adapte a las condiciones del inicio de la observación.

El tercer telescopio, el Refractor, ofreció una mejor prestación al proyecto debido a que se dispuso de él en forma continua durante las noches que fue solicitado, y aunque el factor clima fue determinante, se consiguieron observaciones que dan la pauta para el futuro de las observaciones del proyecto.

El método de observación en dicho telescopio es sencillo y consiste en fijar el telescopio en la posición del satélite, orientando lo mejor posible los ejes del CCD con los de ascensión recta y declinación, y efectuar observaciones directas durante toda la noche sin mover para nada el sistema telescopio-CCD. Incluso, es aconsejable que el sistema permanezca estático durante las noches que continúen las observaciones. Este último punto no es tan necesario si es posible ubicar las coordenadas horizontales del CCD sobre la esfera celeste y recuperar dicha ubicación cuando se reinician las observaciones.

Las diferentes observaciones van a ir dejando una imagen del satélite, una por observación, así como los trazos de las estrellas que, por casualidad o porque así se programó, van a entrar en el campo durante la exposición. Los trazos dejados por las estrellas pueden ser utilizados para definir las coordenadas astronómicas de cada punto de la exposición y de esta forma fijar el CCD a la esfera celeste.

Las diferentes exposiciones pueden componerse en una sola y si el campo ha permanecido estático, la composición va reflejando el movimiento real y diurno del satélite sobre la esfera celeste. Ello nos va a permitir la aplicación de las ecuaciones (1), en los apartados de longitud y latitud, a los (x,y) observados y comenzar con el cálculo de elementos orbitales.



Composición sobre un solo cuadro de las observaciones realizadas sobre el satélite Intelsat 706 en una misma noche. Para ello se mantuvo fijo el sistema telescopio-CCD del OAN durante todo el tiempo de observación.

Gráfico obtenido a partir de los datos dados por la agencia Intelsat como muestra del movimiento diurno del satélite sobre la esfera celeste en tres días consecutivos, incluyendo el que formó la composición de imágenes anterior.

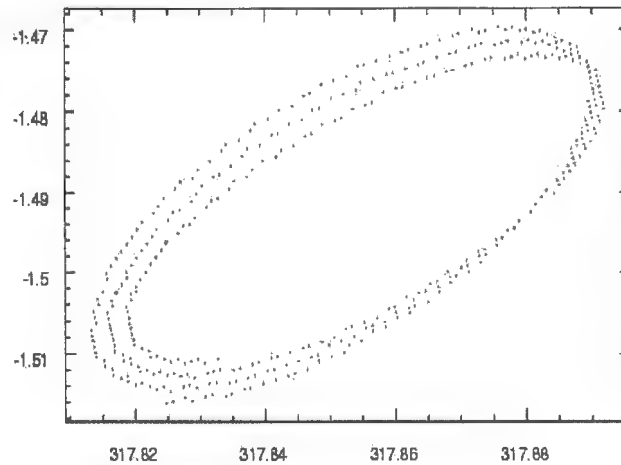


Fig. 8. Composición de observaciones de una misma noche y gráfico obtenido a partir de los datos predichos por la agencia Intelsat. Ambos relacionados con el satélite Intelsat 706 e interviniendo el sistema Refractor-CCD del OAN.

El CCD utilizado en las observaciones no resulta ser el adecuado debido principalmente a su pequeño tamaño, tanto en número de píxeles como en el tamaño de los mismos, lo cual trae como consecuencia que el campo no abarque por lo general el desplazamiento diurno del satélite. Pero resultó ser suficiente para ver en el método, el futuro de las observaciones del proyecto.

La Figura 8 nos muestra cómo se manejan las observaciones llevadas a cabo con el telescopio refractor, componiendo las diferentes exposiciones en una sola, y donde sus datos serán usados para el ajuste de las funciones que representan el movimiento diurno del satélite.

Carlos Abad (CIDA). Beca Alvargonzález 2005

3. Las observaciones desde el ROA

- ***El telescopio Astrógrafo Gautier***

El ROA cuenta desde finales del siglo XIX, cuando se decidió su participación en una importante colaboración internacional, con un telescopio Astrógrafo fabricado por la casa francesa Gautier,. En 1887, siendo Director del Observatorio el Contralmirante D. Cecilio Pujazón y con motivo del Congreso Internacional de Astronomía que se celebró en París, se consiguieron los fondos necesarios para la adquisición de dicho telescopio por parte del Ministerio de Marina. En ese mismo año se iniciaron los trabajos de instalación, los cuales concluyeron al año siguiente, y a partir de entonces comenzó un período de pruebas, de año y medio de duración, en el cual se realizaron los ajustes instrumentales necesarios para que en abril de 1891 entrara en funcionamiento. Cabe resaltar la muerte en dicho año de D. Cecilio Pujazón. (Azcarate, T., 1921)

El instrumento ha estado, desde su inicio, involucrado en importantes proyectos, nacionales e internacionales, pudiendo destacar los siguientes: el proyecto de formación del Catálogo Astrográfico y la Carta del Cielo (Eichhorn, H., 1974) causante de su adquisición, la realización de la segunda serie de placas del proyecto Catálogo Astrográfico que se produjo a mediados del siglo XX y también el relativo a la determinación de posiciones de Pequeños Planetas que se vino realizando durante muchos años, casi hasta finales del siglo XX,.

Se pueden contabilizar en más de 100 años los años de producción fotográfica, los cuales llegaron a su fin antes del siglo XXI, aunque el trabajo de reducción de placas continuó y en la actualidad sigue involucrando a parte del personal integrante del proyecto PASAGE, entre otros.



Fig. 9. La primera noche de observación en el ROA con la nueva cámara CCD una vez ya instalada en el telescopio Astrógrafo Gautier. Aparecen varios de los investigadores que componen el grupo de investigadores del proyecto PASAGE.

Podemos enumerar las causas más importantes para el declive del uso científico de este telescopio a finales del siglo XX, según lo que considero su grado de importancia: la falta de proyectos científicos a los cuales aportar sus observaciones en las condiciones de operatividad originales, la contaminación luminosa existente en la ciudad de San Fernando y la práctica desaparición del uso de la fotografía como detector astronómico al aparecer en la astronomía observacional el uso de los detectores CCD.

Un primer intento de adaptación del telescopio a los nuevos retos se llevó a cabo a finales de los años 90, cuando se compró e instaló un pequeño CCD, ST-6, que aunque no dio el desarrollo científico esperado, sí mostró que la reactivación del telescopio pasaba por la adquisición de un buen detector CCD. Ese paso está dado y es ahora, con el proyecto PASAGE, cuando pareciera ser que el telescopio puede alargar su vida útil, contribuyendo sus datos a una actividad novedosa dentro del campo de la Astrometría que se desarrolla en esta Institución

• *La nueva cámara CCD*

En abril del presente año 2005, se compró, por parte del personal científico que compone el grupo de investigadores del ROA en el proyecto PASAGE, la nueva cámara CCD, fabricada por Apogee Instruments INC y que consta de 2048×3072 píxeles cuadrados de 9 micras de lado cada uno. Dicha cámara tuvo su bautizo científico inaugural en mayo al que corresponden las fotografías de las figuras 9 y 11.

La nueva cámara CCD posee además un mecanismo para el control del tiempo durante la observación que permite datar la observación con una precisión de la centésima de segundo de tiempo, lo que es más que suficiente para nuestros intereses. Entre los diferentes programas ofrecidos por la casa Apogee y que acompañan al CCD en su compra, existe un programa de control del retardo entre el momento de enviar la orden de ejecución de comienzo de la observación hasta el momento en que efectivamente comienza la observación. Dicho programa muestra en pantalla una tabla de 100 cuadrados, distribuidos en columnas paralelas de 10 cuadros cada una, los cuales se van a iluminar correlativamente uno tras otro a la orden de ejecución de la observación, con un intervalo de tiempo en separación de una centésima de segundo. Por supuesto que la cámara CCD debe ser colocada y enfocada de forma tal que vea dicha

pantalla y en la observación quedarán grabados los cuadros encendidos durante el tiempo de exposición. Las pruebas realizadas con el programa revelan un retardo de alrededor de una centésima de segundo, siendo esta cantidad casi constante a lo largo de todas las pruebas, lo cual quiere decir que su error de repetitividad debe ser del orden de pequeñas milésimas de segundo.

Esta determinación nos lleva a afirmar que las observaciones van a estar dentro de unos límites muy aceptables de cálculo, al tener en cuenta que un error de una centésima de segundo de tiempo correspondería aproximadamente a un movimiento real del satélite de 30 m.



Fig. 10. La nueva cámara CCD acoplada al astrógrafo del ROA. A la derecha una vista frontal de la misma.



Fig. 11. Otro momento de la primera noche de observación en el ROA con la nueva cámara CCD una vez ya instalada en el telescopio Astrógrafo Gautier. Aparecen varios de los investigadores que componen el grupo de investigadores del proyecto PASAGE.

La cámara no posee el modo de operación en forma de barrido continuo, pero sí que permite la adaptación de su electrónica al mismo. Este modo de operar se quiere implementar al CCD en un futuro no muy lejano.

• *Las observaciones*

Las primeras observaciones con el conjunto astrógrafo-CCD del ROA se realizaron en mayo del presente año. Éstas consistieron en una primera toma de contacto con el instrumento y un ensayo de las técnicas ya experimentadas en el OAN, salvo la técnica del barrido continuo que es necesario instalar en la programación del manejo del CCD. Problemas de enfriado de la cámara CCD no afectaron a dichas observaciones aunque aconsejaron el envío temporal de la cámara a su lugar de origen para la corrección de la falla en el mes de junio.

El primer problema a resolver era el posicionamiento del CCD en el plano focal del telescopio y para ello se usaron e intercompararon dos métodos. La cámara CCD lleva consigo un programa de cálculo de foco que realiza una serie de exposiciones sobre un campo, analiza sus imágenes y selecciona aquella que considera la mejor, atendiendo a un máximo de concentración de cuentas. Por otro lado se diseñó, construyó y adaptó una máscara de Hartmann de dos huecos al objetivo del telescopio, como segundo método de cálculo de foco. La máscara tiene la ventaja de ser independiente de la variabilidad de las condiciones de seeing durante la observación. El método de observación con dicha máscara está basado en que las imágenes van a ser dobles siempre y cuando la observación se realice fuera del plano focal. Las distancias entre el foco puesto durante la observación al verdadero foco -que es desconocido en principio- son proporcionales a las distancias entre la pareja de imágenes que se crean para un conjunto de observaciones. Una solución obtenida de esta proporcionalidad para observaciones realizadas con diferentes focos, dos como mínimo, nos dará el punto exacto de posicionamiento del plano focal del telescopio. Ambos métodos dieron resultados parecidos aunque condicionados por la ausencia de filtros, muy convenientes e incluso yo pondría que necesarios, en observaciones afectadas por un grave problema de cromatismo como son las realizadas por este telescopio.

La figura 12 nos muestra la máscara de Hartmann colocada en el objetivo del astrógrafo del ROA.



Fig. 12. Objetivo del Astrógrafo del ROA en el cual se le ha adosado una máscara de Hartmann para la búsqueda del plano focal del telescopio una vez adaptada la nueva cámara CCD.

Igualmente, se comenzaron a realizar observaciones sistemáticas sobre algunos de los satélites geoestacionarios para los cuales disponíamos de coordenadas, tales como los Hispasat y algunos Intelsat. Estas observaciones carecían del conocimiento previo de las predicciones dadas por los consorcios que manejan los satélites y tenían únicamente la finalidad de comenzar las pruebas de ajuste de funciones, por el método de mínimos cuadrados, a los datos obtenidos durante las observaciones realizadas en forma similar a sus homólogas del Refractor del OAN.

De igual manera se ensayó y se creó un programa para la inclusión de estrellas brillantes, obtenidas de los catálogos Hipparcos y Tycho, en el campo observado, realizando varias pruebas de captación de las mismas en diferentes formas. La primera de ellas, en la forma de un solo trazo continuo durante la observación. La segunda, haciendo pasar una estrella brillante y realizar varias exposiciones de muy corta duración, con el fin de obtener un objeto lo más puntual posible, tantas veces como el sistema de control del CCD lo permitiera. Éstas son de alrededor de 8 o 9 exposiciones por campo del CCD para exposiciones de pocas centésimas de tiempo de exposición. De igual

forma, los puntos podían convertirse en pequeños trazos al subir el tiempo de exposición de cada una de las intercaladas.

El objetivo para este tipo de exposiciones era, como ya se ha repetido en varias ocasiones en la presente memoria, el poder asignar una posición sobre la esfera celeste a cualquier punto o píxel del CCD. Es decir, definir el sistema de referencia que nos va a unir el CCD y las imágenes al sistema astronómico del cielo.

En una segunda época, en octubre de 2005, se programaron observaciones en combinación con datos reales emitidos por Hispasat, que abarcaran las tres coordenadas, distancia, longitud y latitud del satélite, para intentar meternos de lleno con el problema de determinación de sus elementos orbitales. También se realizaron las pruebas de control del retardo en tiempo de la orden de ejecución de la observación, pero problemas graves de falta de señal en las exposiciones obligaron a cancelar el programa establecido y enviar de nuevo la cámara a reparación, estado en que se encuentra hasta el momento de la redacción de esta memoria..

Estos problemas surgidos retardan la ejecución del proyecto, pero no han impedido el ver la factibilidad de realización del mismo y estamos todavía dentro de los límites establecidos y expuestos en la solicitud del proyecto, sabiendo que el trabajo de desarrollo de modelos y métodos de cálculo dependen del investigador, teniendo total confianza en la capacidad de ejecución de cada uno de sus investigadores. Por la parte observacional todavía queda mucho por hacer pero estamos en el convencimiento de que está todo bajo nuestro control.

4. Primeros resultados

- ***Observaciones sobre los satélites Hispasat***

Estas observaciones se corresponden a tres noches de observación, las correspondientes a los días 14, 15 y 16 de junio del año 2005. A ellas se les ha aplicado un ajuste por el método de mínimos cuadrados a las funciones (2):

$$\begin{aligned}x &= a_0 + a_1 \cdot \cos(2 \cdot \pi \cdot t) + a_2 \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot t) + t \cdot [a_3 + a_4 \cdot \cos(2 \cdot \pi \cdot t) + a_5 \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot t) + a_6 \cdot t] \\y &= b_0 + b_1 \cdot \cos(2 \cdot \pi \cdot t) + b_2 \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot t) + t \cdot [b_3 \cdot \cos(2 \cdot \pi \cdot t) + b_4 \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot t)]\end{aligned}$$

(2)

donde:

x corresponde a la variación de la longitud respecto a un punto dado,
 y corresponde a la variación de la latitud respecto a un punto dado, y
 t al instante de la observación expresado en la escala sidérea.

Estas funciones se corresponden, en primer orden, a las del sistema (1), aunque se le ha añadido, en la correspondiente a la longitud, un término cuadrático que absorbe parte de las perturbaciones del problema general. Los datos se acomodan en una forma casi perfecta a las funciones encontradas para el movimiento diurno durante los tres días para los cuales existen observaciones, aunque su proyección a días futuros o previos no es la correcta.

En la siguiente tabla (Tabla 1) exponemos los valores obtenidos para cada una de las variables, así como sus errores en la determinación de los mismos por el método de mínimos cuadrados. También se dan los errores cuadráticos medios del ajuste para cada uno de los satélites Hispasat, pudiendo ver un gran paralelismo en todas y cada una de las cifras encontradas. Lógicamente, no están introducidos términos que representen perturbaciones de mayor orden. Para ello será necesario el control de las predicciones de las posiciones de los satélites dadas por la agencia, así como el resultado de las

Tabla 1.

Resultados del ajuste de los datos obtenidos de la observación de los satélites Hispasat durante los días 14, 15 y 16 de junio a las funciones (2). Se dan los valores obtenidos para cada uno de los parámetros, a_i para el ajuste en longitud y b_i para el de latitud, junto a sus errores para cada uno de los satélites Hispasat. De igual manera se dan los errores cuadráticos medios para el ajuste en longitud y latitud de cada uno de los satélites. Las unidades se expresan en píxeles.

	Hispasat 1		Hispasat 2	
<i>parámetro</i>	<i>Valor</i>	<i>error</i>	<i>Valor</i>	<i>error</i>
a_0	983.23	0.59	741.58	0.35
a_1	61.93	0.59	-97.96	0.36
a_2	316.48	0.25	496.56	0.15
a_3	-9.53	0.31	-2.98	0.19
a_4	-4.49	0.26	-15.21	0.16
a_5	-3.58	0.12	-4.06	0.07
a_6	10.59	0.04	9.69	0.03
<i>parámetro</i>	<i>Valor</i>	<i>error</i>	<i>Valor</i>	<i>error</i>
b_0	2055.65	0.23	2053	0.21
b_1	-450.6	0.27	-89.55	0.24
b_2	79.75	0.15	-366.17	0.13
b_3	2.16	0.04	2.06	0.03
b_4	-11.89	0.06	-11.65	0.06
Satélites	Hispasat 1		Hispasat 2	
Errores cuadráticos medios en longitud (píxeles)	0.17		0.11	
Errores cuadráticos medios en latitud (píxeles)	0.19		0.17	

maniobras realizadas en su momento y comparar datos predichos y obtenidos por otros medios, con los observados por el proyecto PASAGE.

La Fig. 13 nos muestra una representación de la función de ajuste y los puntos observados.

En la Fig.14 se ha compuesto el conjunto de las observaciones correspondientes a las tres noches. Se puede ver algún trazo, imagen del paso de alguna estrella por el campo de observación durante la observación. Se ha resaltado, enmarcándola, una sección de la composición, que luego es utilizada en la Fig. 15 para sobreponer sobre ella, y a la misma escala, el movimiento diurno de cada uno de los satélites Hispasat predicho por las funciones de ajuste a las observaciones.

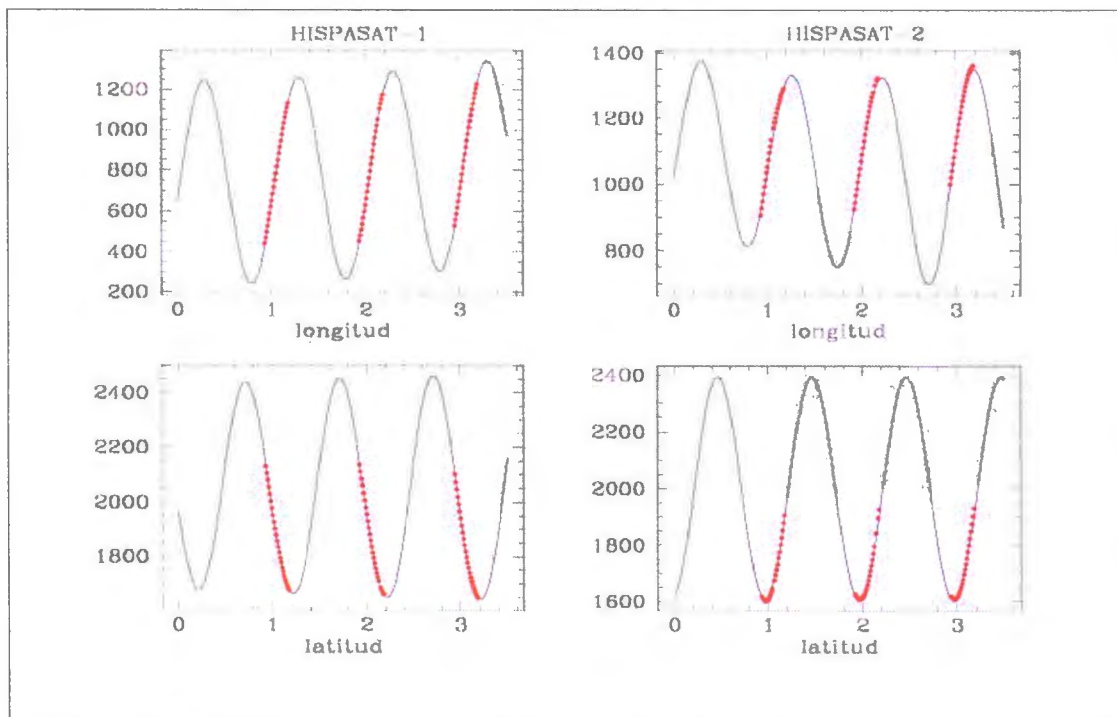


Fig.13. Representación del ajuste en longitud y latitud a los datos obtenidos (puntos) de la observación de los satélites Hispasat. Las líneas continuas y en negro se corresponden a las funciones obtenidas de los ajustes. Los puntos rojos se corresponden a las observaciones. El eje X representa el tiempo y el eje Y la variación en píxeles de la coordenada tratada.

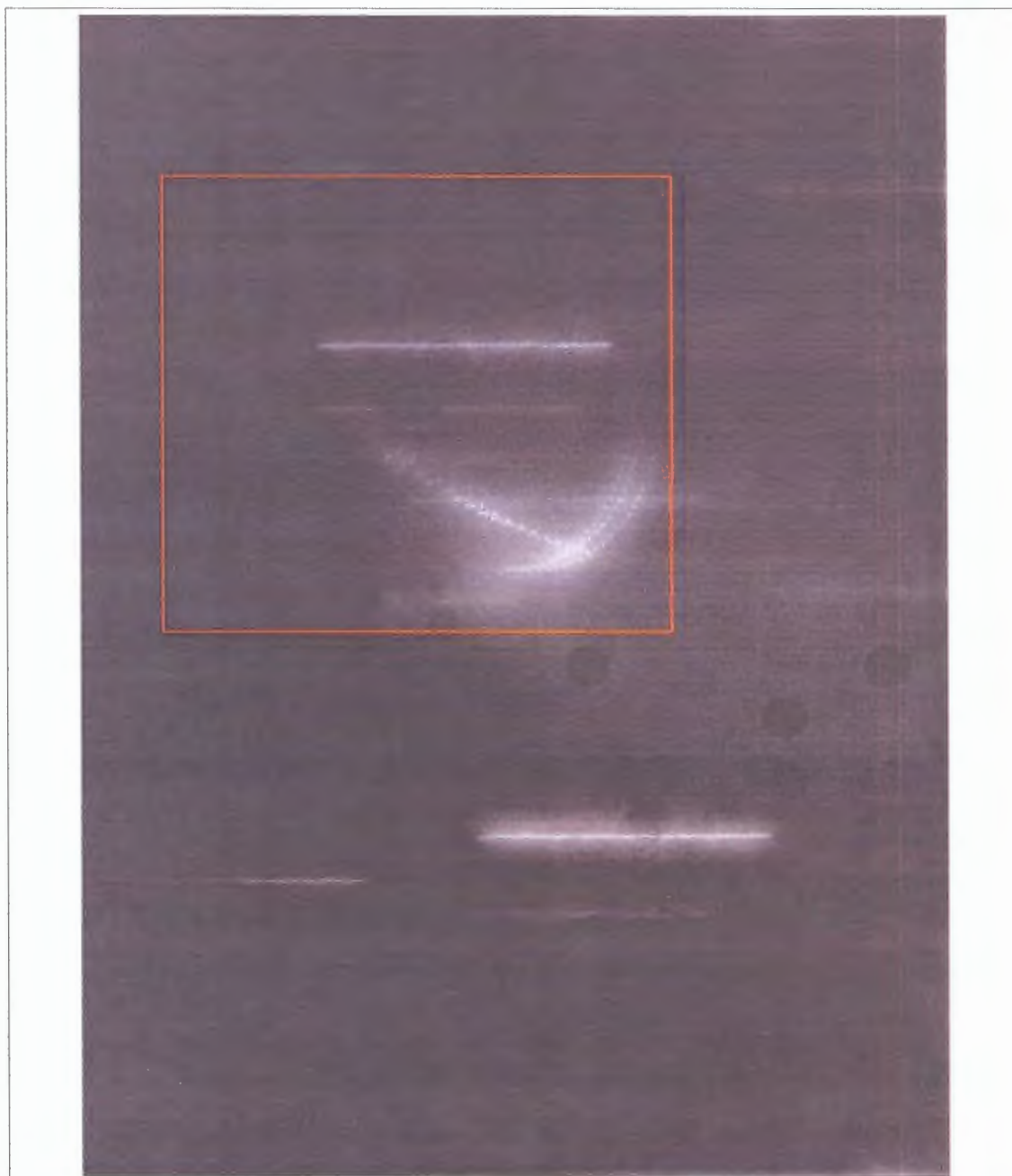


Fig. 14. Composición de 3 noches consecutivas de observación de los satélites Hispasat. Pueden verse trazos correspondientes a estrellas que van pasando por el campo de observación y el efecto del *seeing* sobre dichos trazos.

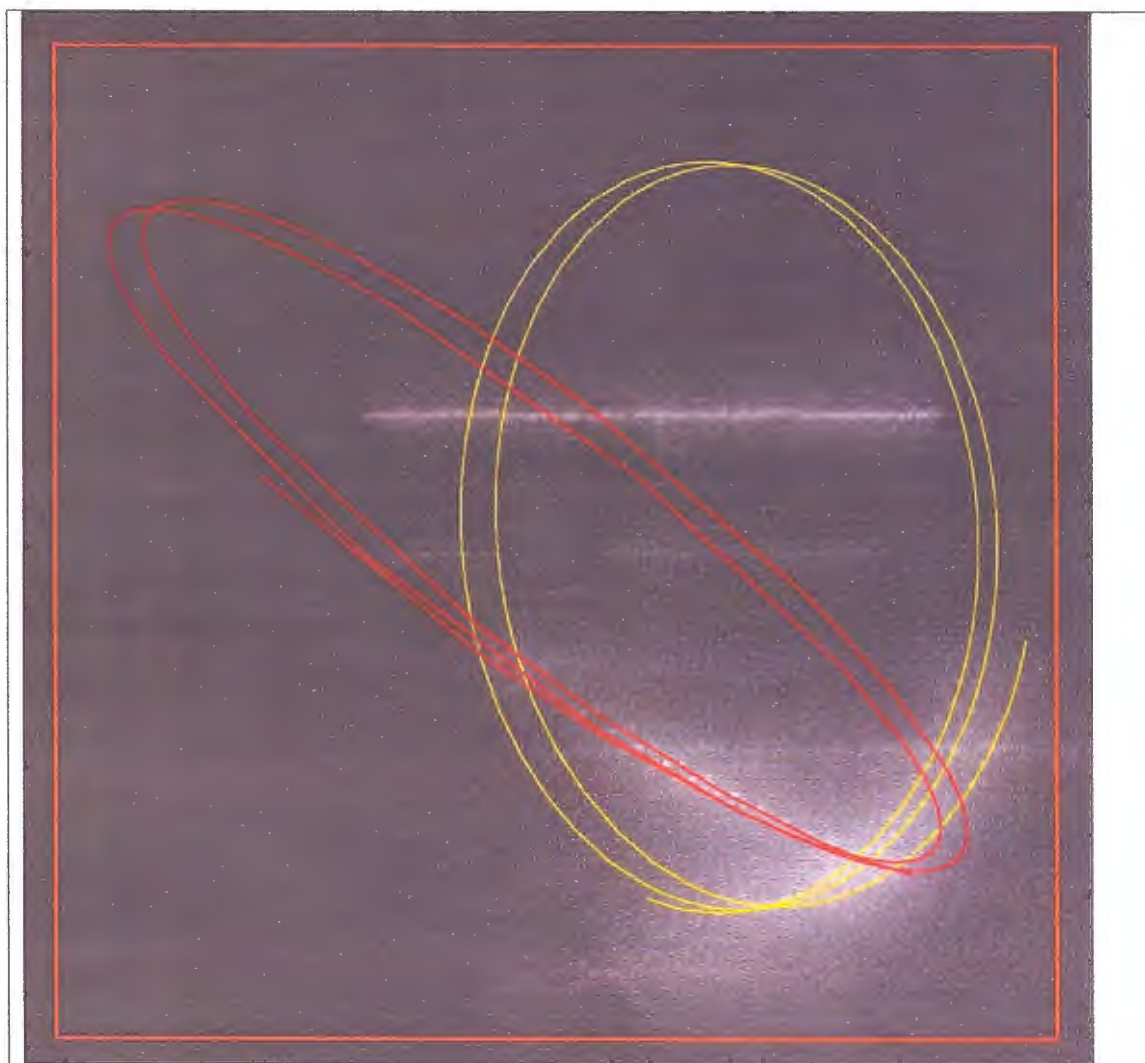


Fig. 15. Composición de 3 noches de observación de los satélites Hispasat. Las líneas de color y continuas se corresponden a la representación de las funciones obtenidas por el método de mínimos cuadrados como ajuste a los datos observados. Estas líneas son una representación, calculada, de los movimientos diurnos de los satélites durante esos días.

• *Observaciones sobre los satélites Intelsat*

Destacamos aquí un segundo grupo de 9 noches de observación distribuidas entre los días 25 de mayo y 6 de junio. Estas observaciones se realizaron sobre el satélite Intelsat 1002 y en ellas se puede apreciar claramente la ejecución de maniobras de mantenimiento en estación.

Una muestra de la composición de las observaciones de una de esas noches viene dada en la Fig. 16.

Un ajuste del mismo tipo de funciones utilizadas para los satélites Hispasat nos muestra una inexactitud en los resultados cuando los acoplamos a los datos observados (Fig. 17), debido casi con total seguridad a las maniobras realizadas sobre el satélite durante el período de observación. El desconocimiento del instante de realización de las maniobras impide realizar el ajuste correctamente.

La agrupación de los datos por noches de observación con características similares respecto a las posiciones observadas, nos muestra que es posible el seguimiento de las maniobras y que cuando se disponga de información suficiente y coordinada con las agencias que manejan los satélites, va a ser posible determinar los verdaderos parámetros que deben de figurar en las funciones de ajuste. (Fig. 18)

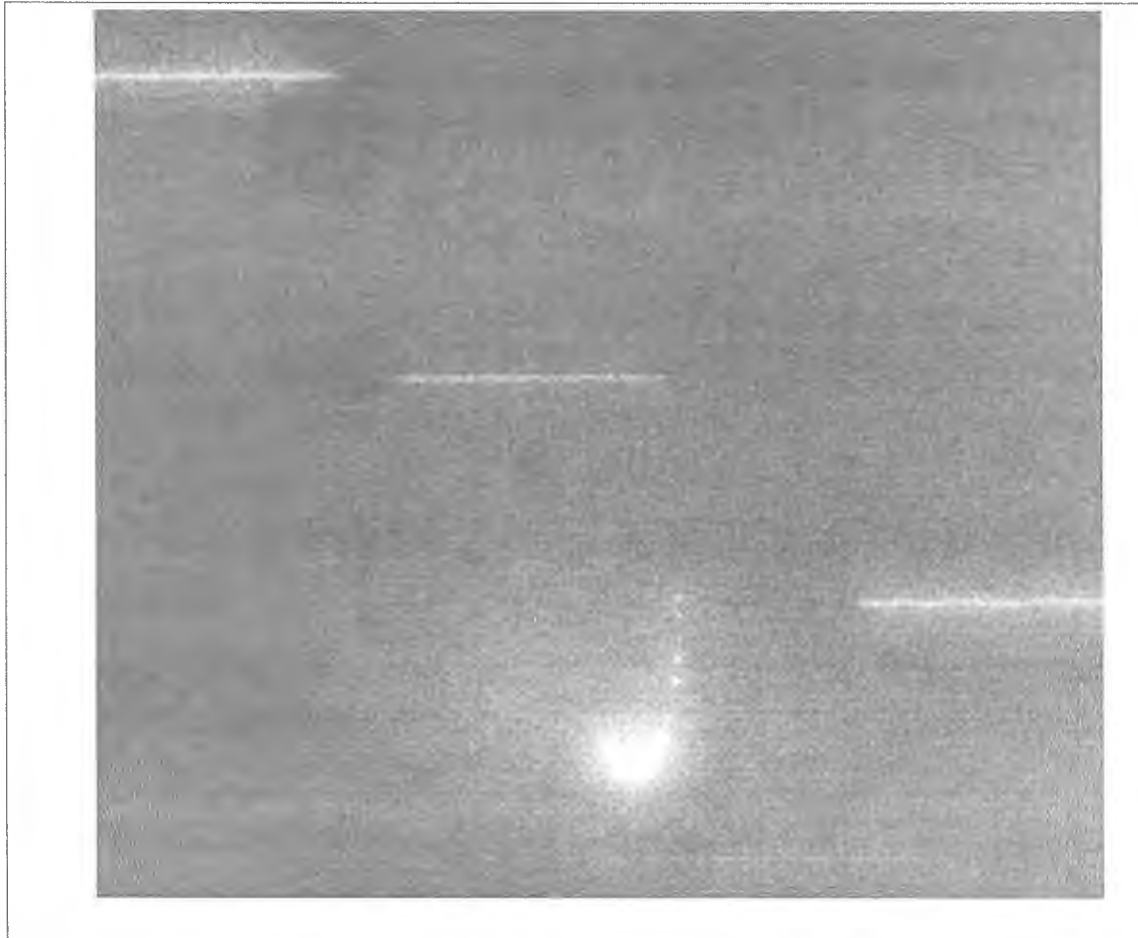


Fig. 16. Composición de una noche de observación del satélite Intelsat-1002.

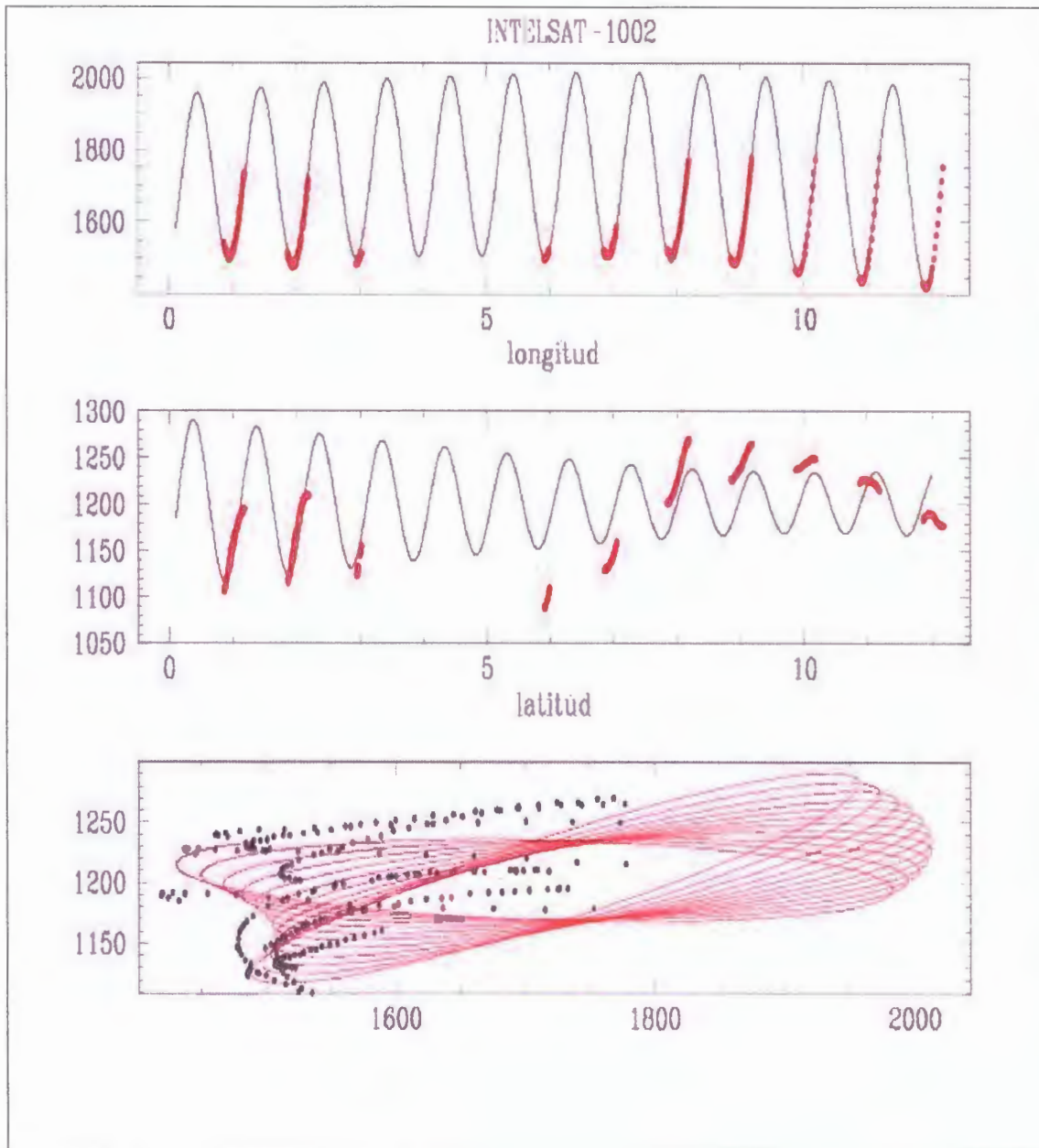


Fig. 17. Ajustes al conjunto de observaciones (9 noches de observación en un período de 12 noches consecutivas) en función de la longitud y de la latitud, incluyendo la representación conjunta de las trayectorias diurnas calculadas. Las líneas que son continuas representan los cálculos, mientras que los puntos las observaciones. En el gráfico superior, las unidades del eje X son días consecutivos de observación y en el eje Y píxeles, mientras que en el gráfico inferior ambas coordenadas vienen dadas en píxeles.

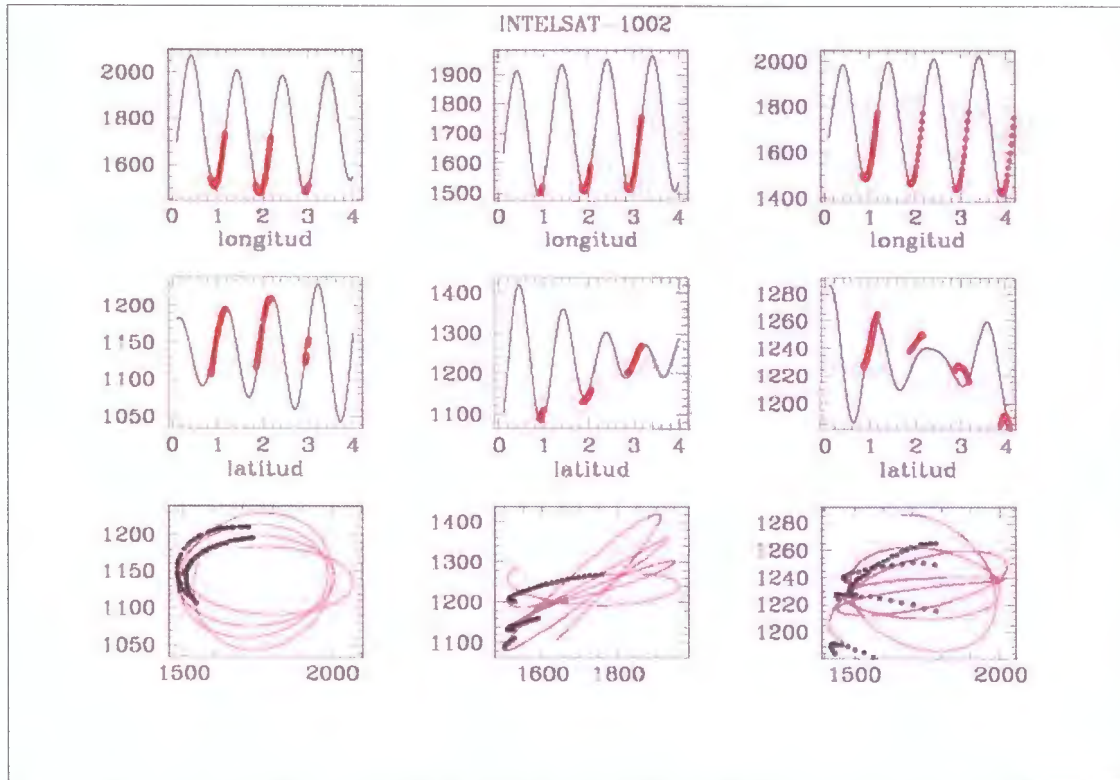


Fig. 18. Representación, por grupos de noches observadas, de los ajustes en longitud y latitud y las predicciones de las trayectorias del satélite Intelsat 1002. Los días de observación están comprendidos entre el 25 de mayo y 6 de junio de 2005. En los gráficos situados en la última fila de gráficos, los puntos en negro indican observaciones y los puntos en rojo las predicciones que dan las funciones de ajuste. Las unidades están dadas en píxeles. Para el resto de los gráficos, el color rojo indica datos de observación y el color negro predicciones de estas funciones de ajuste, mientras que las unidades en el eje X son días consecutivos de observación y en el eje Y píxeles.

• *Algunos resultados en números*

Es difícil asignar cifras a las observaciones cuando éstas no han podido realizarse en una forma sistemática y con propósitos cuantitativos, pero existen observaciones que nos pueden dar una estimación de la bondad de las mismas y por tanto la posible calidad de los datos que de ellas se obtienen.

Un ejemplo de ello lo hemos expresado en la Tabla I con el ajuste de funciones que representan las variaciones de la longitud y la latitud respecto a los satélites Hispasat durante tres noches de observación.

Respecto al telescopio J. Stock son varias las series de observaciones realizadas a lo largo del año 2005 y muchas de ellas han sido reducidas, es decir, se han calculado posiciones astronómicas de los satélites involucrados en la observación, para distintos instantes de la observación.

Quisiera exponer a continuación, algunas de las conclusiones que se pueden sacar de ellas.

En primer lugar, debemos destacar que el método de observación aplicado en dicho telescopio crea un nuevo sistema de referencia a cada salto del telescopio en declinación, conteniendo estrellas comunes a las ya existentes pero en posiciones diferentes, mientras que aparecen otras nuevas y algunas del sistema anterior desaparecen. Esto complica la identificación de cada uno de los sistemas pero también, en caso de lograr esa identificación, esos sistemas pueden hablarnos de la estabilidad de los puntos que definen a los satélites.

Otro tema a destacar es que todas las reducciones de posiciones se realizaron con el programa CMI, el cual consiste en un ajuste entre las coordenadas esféricas cuando las posiciones de las imágenes que corresponden a las estrellas de referencia son llevadas a la esfera celeste y las posiciones dadas por los catálogos de referencia para dichas estrellas. El error medio determinado para la reducción es inferior a la décima de segundo de arco, casi 0.07 segundos de arco, tal y como se esperaba de anteriores reducciones de observaciones correspondientes a otros proyectos que usan el mismo telescopio y mosaico de CCDs llevadas a cabo con el mismo programa CMI.

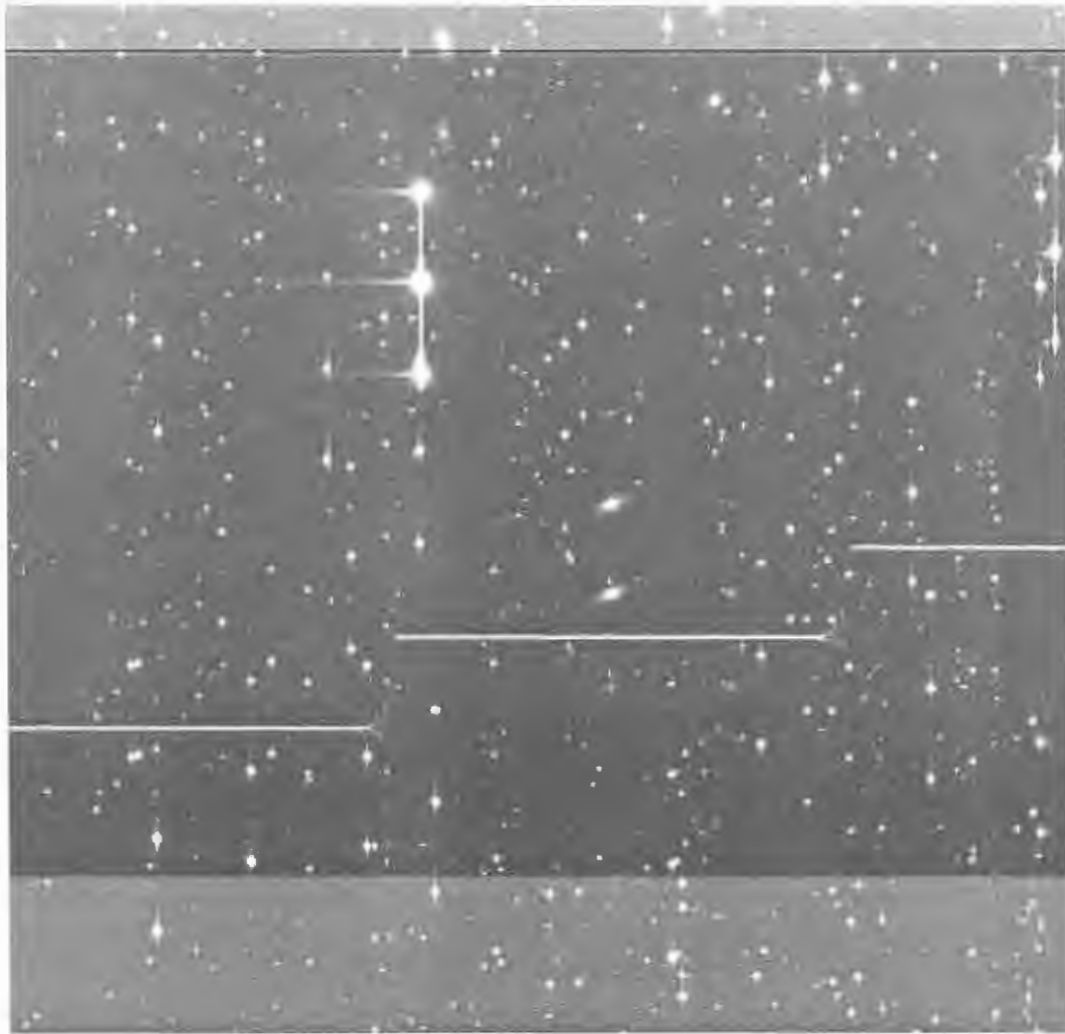


Fig. 19. Observación en modo de barrido continuo sobre el satélite INTELSAT 906, donde se puede apreciar la complejidad de los sistemas de referencia que serán usados durante la reducción y la profundidad alcanzada por el telescopio J. Stock.

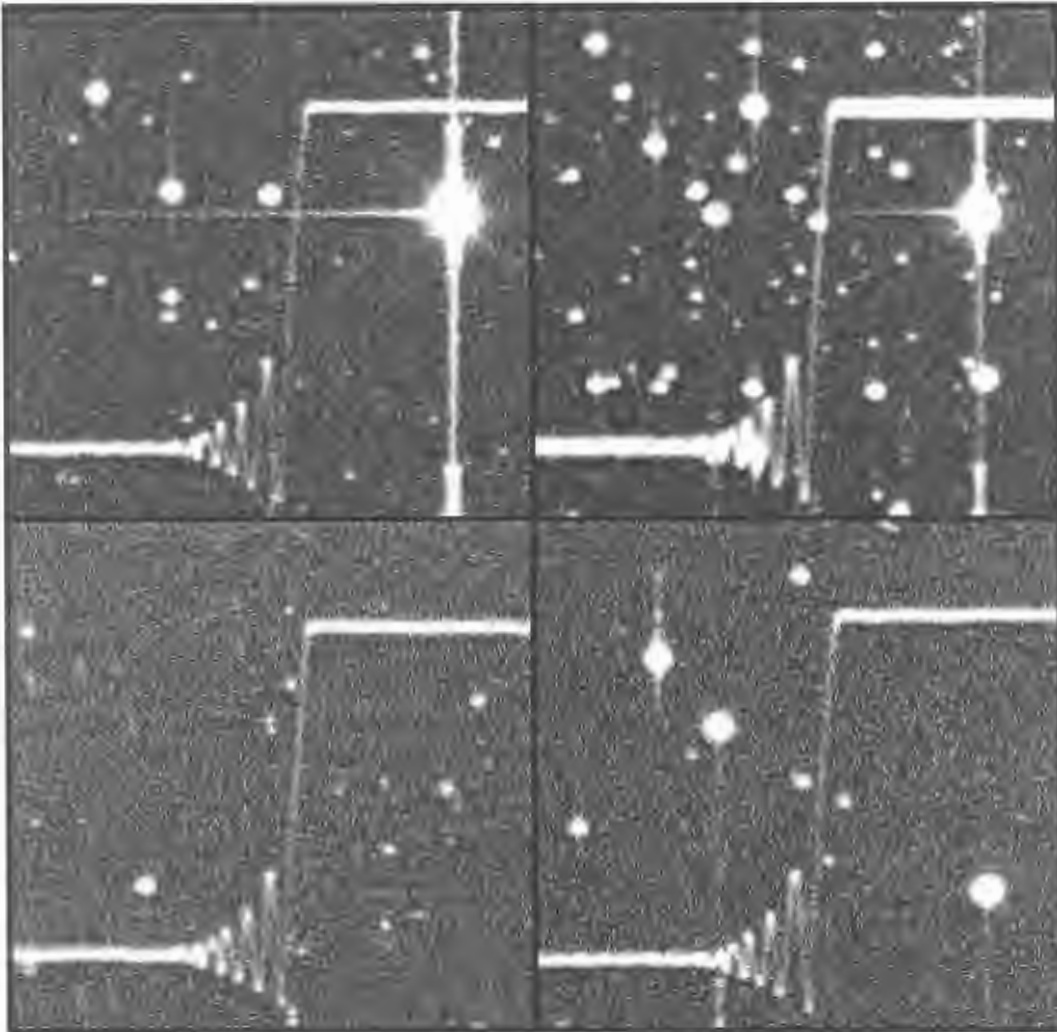


Fig. 20. Cuadro correspondiente a una observación en modo de barrido continuo sobre el satélite Intelsat 906. Los puntos a medir son los saltos en las trayectorias que sigue el satélite durante la observación mostrando aquí unos cuantos de ellos.

En la Fig. 19 mostramos una sección de 2048×2048 píxeles correspondientes a una observación sobre el satélite INTELSAT 906. Se distingue claramente cómo se multiplican los sistemas de referencia, tantos como saltos del telescopio se han producido en el cuadro, y también es posible ver la profundidad de las observaciones al aparecer en el campo objetos no puntuales como galaxias y nebulosas.

En la Fig. 20 resaltamos alguna área de salto del conjunto de la observación del satélite INTELSAT 906, mostrada parcialmente en la Fig. 17. Se aprecian claramente las dos trayectorias de satélite sobre la imagen, antes y después del salto, y la línea que une ambas. Esta línea es la que hay que definir por medio de un ajuste por el método de mínimos cuadrados y definir el punto de intersección con el trazo anterior al salto. El punto intersección es el correspondiente al instante de comienzo de salto en declinación dado al telescopio.

En ambos casos, el caso del satélite Intelsat y el caso de los satélites Hispasat, tomaremos en cuenta los puntos de salto respecto a cualquier sistema de referencia que exista en su cuadro. Alguno de estos sistemas será el correlativo a ese salto, pero en su mayoría serán los sistemas creados en el salto anterior o posterior a su verdadera posición. Un estudio de las posiciones de los saltos para sistemas que permanecen con la misma ascensión recta nos indicará la confiabilidad de la declinación del punto de salto, que en parte viene afectada por la repetitividad del salto, que generalmente fue de 5 minutos de arco en declinación. De igual forma, el cálculo de una serie de saltos realizado con un mismo sistema de referencia nos dará la confiabilidad en la coordenada de ascensión recta, la cual incluye la confiabilidad en la toma del instante en que se produce el salto del telescopio, que por lo general se realizaba a cada minuto de tiempo. Para el caso de los satélites Hispasat incluíamos la separación entre trayectorias de ambos satélites y su estabilidad a lo largo de la observación. En todas estas pruebas está incluido el propio movimiento del satélite, al corresponder muchos de los datos a instantes diferentes de la observación.

Según los datos que disponemos podemos hablar de una estabilidad mecánica en el telescopio J. Stock, que se refleja en una constancia en el movimiento mecánico del salto de 5 minutos de arco, de 0.15 segundos de arco, mientras que un segundo error de 0.07 segundos de arco deberíamos atribuirlo principalmente a movimientos propios de cada satélite durante los intervalos de tiempo entre saltos de 1 minuto.

De igual manera, la no periodicidad de las posiciones en ascensión recta se la puede atribuir al error humano del operador, quien da la señal de arranque en forma visual. El valor medio en esta no periodicidad del minuto entre saltos es de 0.146 segundos de tiempo, o lo que es lo mismo, 2.19 segundos de arco, mientras que un error extra de 1.18 segundos de arco debe incluir los propios movimientos del satélite.

Como se puede apreciar son errores demasiado grandes para los fines que se persiguen en el proyecto, aunque menores que los que actualmente se obtienen por las medidas radiogoniométricas utilizadas por Hispasat para situar sus satélites, que están próximas a 18 segundos de arco.

En las observaciones realizadas en forma directa, que corresponden a observaciones realizadas con telescopios del tipo reflector o refractor, las estrellas dejan un trazo como imagen, más o menos corto dependiendo de cual fue el tiempo de observación con el que se obtuvo. El trazo es largo cuando existe una sola exposición durante la observación y el trazo se compone de pequeños trazos disjuntos cuando se realizan varias exposiciones durante la misma observación. De igual manera, para estrellas muy brillantes se aplicó también el método de realizar el máximo de exposiciones de un tiempo mínimo de exposición, a fin de que el trazo que deje sea lo más puntual posible, eliminando así, teóricamente, posibles miedos al ajuste de funciones no *gaussianas* a imágenes alargadas y obtener una amplia base de puntos que definan la dirección este-oeste.

Cualquiera de los tres casos anteriores: el trazo, la secuencia de trazos disjuntos o la secuencia de puntos, es utilizado para definir la dirección este-oeste, la cual nos va a permitir determinar la declinación relativa del satélite respecto a la de la estrella como distancia de un punto a una recta.

El peor de los casos se corresponde a las múltiples observaciones de corta exposición. En nuestro caso cuando hablamos de corta exposición, hablamos de 0.05 segundos, dando la oportunidad de aparecer 8 o 9 imágenes por cuadro. Las imágenes de las estrellas, si éstas no son muy brillantes, quedan muy afectadas por el seeing, especialmente para observaciones desde el ROA, y sus posiciones astronómicas vienen muy afectadas por el proceso de medición. No obstante después de examinar 6 observaciones de este tipo, el error medio del ajuste de una recta a los diferentes puntos es inferior a las 3 décimas de píxel, mientras que la inseguridad en la dirección este-oeste respecto a la repetición uniforme de las observaciones es menor que el segundo de arco, es

este último dato no es muy significativo y sería necesario repetirlo.

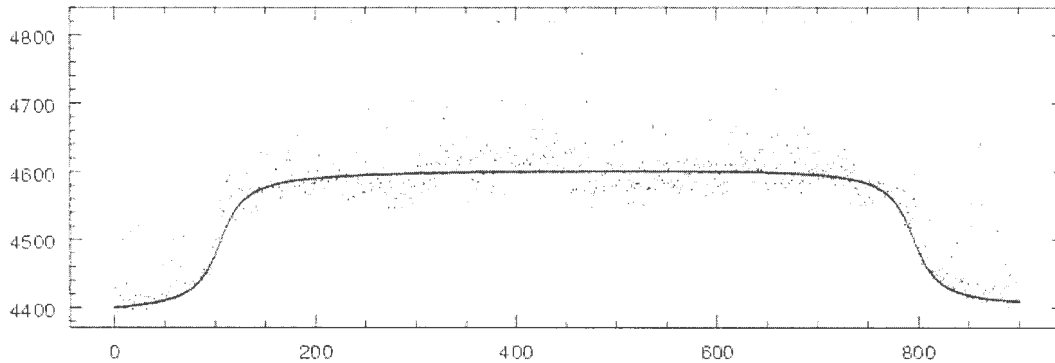


Fig.21 Representación gráfica en 2 dimensiones del ajuste de la función tepui a los puntos que definen la imagen trazada por una estrella que atravesó el campo de observación durante los 30 segundos de tiempo que duró la observación. Eje X se corresponde con la dirección este-oeste y eje Y representa el número de cuentas obtenidos para cada píxel donde hay señal de la estrella en la observación

El resto de los ajustes, los que corresponden a imágenes puntuales o casi puntuales son abordados con la clásica función *gaussiana*.

Respecto a los ajustes de la función *tepui* a los trazos debemos decir que los residuos del ajuste dependerán enormemente de la relación señal/ruido, que suele ser pequeña para estrellas no muy brillantes y la bondad de la función para el ajuste de este tipo de imágenes podemos demostrarla gráficamente con la Figura 21, donde representamos el ajuste obtenido para uno de los trazos únicos, correspondiente a una exposición sobre el satélite Intelsat 1002, de 30 segundos de tiempo. También podemos remitirnos a publicaciones anteriores donde se emplea en imágenes de mayor complejidad como lo son las estrellas dobles de corta separación (Abad et al. 2004). Para demostrar la confiabilidad de este ajuste deberían relacionarse las posiciones obtenidas a partir del ajuste con las posiciones dadas por los catálogos y lo mejor sería obtenerlas de observaciones sobre cúmulos estelares conocidos y brillantes y relacionar la observación guiada con la fija. Estas pruebas no han sido realizadas todavía.

Carlos Abad (CIDA). Beca Alvargonzález 2005

5. Apuntes sobre las herramientas de trabajo.

- ***El uso de exposiciones con telescopio y CCD estáticos.***

Como se ha apuntado anteriormente, este método, en principio, exige la permanencia del sistema telescopio-CCD en reposo durante toda la noche o noches de observación.

Lógicamente los problemas de temperatura y dilatación, los problemas de viento y los problemas accidentales pueden hacer variar dicho reposo y la probabilidad de que esto ocurra va a ser mayor cuanto mayor sea el tiempo de reposo que se intenta conseguir.

Un ajuste de las direcciones X, Y del CCD a las verdaderas de ascensión recta y declinación nos permite hablar simultáneamente del azimut y de la altura del satélite y por tanto del paso a coordenadas horizontales.

La superposición o composición de imágenes en un solo cuadro, el del CCD, nos permite realizar un seguimiento de las variaciones de azimut y altura o de longitud y latitud del satélite a lo largo de todo el intervalo de tiempo de observación. Son justo estas variaciones las que van a dar la llave para los ajustes y el cálculo de las funciones que van a representar los movimientos diurnos del satélite.

• *Posiciones astronómicas del satélite.*

Para ello, y en un campo tan reducido como el que muestra el CCD a través del telescopio, bastará con el cálculo de las posiciones astronómicas de las estrellas que aparecen en dicho campo durante la observación u observaciones, despreciando términos de corrección debidos, por ejemplo, a la refracción diferencial. Estas estrellas harán de estrellas de referencia en la reducción.

Al estar frente a un problema de coexistencia de imágenes estáticas y móviles, las técnicas a seguir pueden variar y de entre ellas seleccionamos o tenemos en mente seleccionar aquellas que involucran procesos como los siguientes:

- Cálculo de las posiciones de las estrellas que aparecen durante la observación en forma de trazos.
- Cálculo de las posiciones de las diferentes imágenes que deja una estrella sobre el campo de observación cuando, en su paso por el, se le realizan exposiciones múltiples.
- Cálculo de posiciones obtenidas por el método de barrido continuo realizado expresamente para este fin.

De todas maneras, sea cual sea la técnica de observación seleccionada, una vez realizada la reducción de la observación por medio del uso de las posiciones dadas por un catalogo de referencia, podremos asignar una coordenada astronómica a cualquier punto del campo del CCD. Y como puntos significativos del campo podemos destacar; un punto que represente al satélite, un punto que represente a un astro o un punto cualquiera del CCD, como por ejemplo, un píxel.

Cada una de estas tres técnicas tiene su método: su programación, su realización y su reducción.

Relativo a la primera de ellas. El uso de los trazos que aparecen sobre la exposición, los cuales pertenecen a estrellas que coinciden su paso por el campo en el momento de la observación, lleva implícito el problema de que estos trazos se ven afectados por el "seeing", siendo irregulares en cuanto a los

límites que los determinan e irregulares en cuanto al número de cuentas que le corresponde a cada píxel que define el paso de la misma sobre el CCD.

Lógicamente, la marcha irregular o camino seguido por la estrella quedará bien definido en promedio y mucho mejor cuanto más largo sea este camino, equivalente al tiempo de exposición. Digamos que la dirección Este-Oeste puede quedar bien definida en promedio, a pesar del inconveniente, y tanto mejor cuanto mayor sea el tiempo de exposición.

La figura creada por el movimiento hace desaconsejable el uso de una función de tipo *gaussiano* para su ajuste, por mucho que se acondicionen los parámetros que la definen a través de pesos que nos den una simetría en dos direcciones. La función *gaussiana* siempre buscará el ajuste integral de la figura, sin distinción de aquellos puntos que conforman las alas externas de la imagen respecto de aquellos que la culminan. Es por ello, que aquí se propone el uso de la función *tepui*, función especialmente diseñada para su uso astrométrico sobre imágenes que tienen simetría en uno o dos ejes, atendiendo por igual a todos y cada uno de los puntos que forman la imagen.

La función *tepui* es una composición de funciones arco-tangentes, 2 por eje, las cuales llegan o pueden llegar a formar esa parte relativamente plana que en uno de sus ejes conforma el trazo.

Se diseñó para resolver problemas de saturación y problemas de imágenes obtenidas en noches con viento, donde las imágenes son alargadas en una misma dirección, pero también se aplico a imágenes mas complicadas, como pueden ser imágenes irregulares en uno o dos ejes, como las afectadas por coma, o imágenes múltiples como las estrellas dobles de corta separación donde aparentemente se deforman por superposición de cuentas sobre un mismo píxel.

Creemos, y las pruebas que se han realizado en este proyecto así lo demuestran, que es la función ideal de ajuste para la determinación de las posiciones cartesianas de estos trazos provenientes de la exposición.

Otro problema más complicado es el cálculo de la coordenada que define la ascensión recta, azimut o longitud para un instante dado. Es decir, el problema de la coordenada que depende del tiempo.

El problema de cómo fijar una posición de un objeto móvil respecto a un fondo fijo o viceversa pasa por determinar el instante preciso para el cual

se le quiere calcular unas coordenadas.

De la misma forma, si nos referimos al par telescopio-CCD, debemos tener conciencia de la ubicación del par respecto al cielo en cada instante respecto a un punto del mismo, o dicho de otra forma, debemos tener la seguridad de que podemos determinar en cada momento la coordenada que depende del tiempo a través de una observación.

Si sabemos la posición de un píxel del CCD para un instante dado, la posición del mismo respecto a otro instante es un problema de conversión de tiempo universal a tiempo sidéreo, cuando se mantiene la estabilidad de las condiciones iniciales.

Pero podemos decir que una vez asignada una posición a un objeto estelar o un punto cualquiera sobre la exposición, debemos aprovecharla para trasladársela al satélite y esto es posible siempre que sepamos la orientación del CCD y la escala.

En todos los casos es necesario disponer de una buena información del tiempo universal y eso no debe ser difícil en una institución como es el ROA de quien depende el patrón de la señal horaria en España.

En el caso en que se use el método de barrido continuo para determinación de coordenadas, el control del tiempo durante la toma continua de datos nos permite conocer en cada instante la columna de píxeles que está siendo extraída de la observación o lo que es lo mismo, estamos resolviendo el problema de la coordenada que depende del tiempo. La otra coordenada puede obtenerse de la reducción clásica, puede ser con el programa CMI, de una observación.

6. Futuro.

Por todo lo expuesto anteriormente es fácil deducir el gran trabajo que queda por delante todavía. Son pocas las observaciones sistemáticas y con objetivos claros que se han realizado por el momento y es necesario realizarlas. Por otro lado, la experiencia obtenida de las observaciones preliminares realizadas en el OAN da pie a que se intente aplicar a las observaciones de la cámara CCD del ROA. Podríamos decir que hay varios frentes de trabajo a realizar en un futuro próximo.

Relacionado con la cámara CCD del ROA se va a manipular la electrónica de la cámara para conseguir la adaptación de la misma al modo de observación en barrido continuo. La ventaja que se buscaría con ello, al poder controlar el tiempo de lectura de cada una de las columnas de píxeles que se van leyendo, será el poder asignar un tiempo a cada columna de píxeles, resolviendo con esto el principal problema de las observaciones que contienen objetos móviles y fijos. Las observaciones en modo de barrido continuo servirán para posicionar el CCD, que se mantendrá fijo durante la noche de observación, respecto a la esfera celeste.

El uso de la técnica de barrido continuo es efectivo si se dispone de un mecanismo confiable de control de la medida del tiempo acoplado a la observación. En caso contrario, variaciones como el salto en declinación durante la observación no son eficaces para un trabajo sistemático y cotidiano.

Relacionado con las observaciones podemos hablar de la necesidad de estudiar la precisión conseguida en la asignación de posiciones astronómicas a los puntos del CCD por medio del uso de la función *tepui* para el ajuste de las imágenes. Deberían realizarse, como ya se dijo en un apartado anterior, observaciones guiadas sobre un campo denso, conocido y más o menos brillante y compararlas con observaciones del mismo campo en forma directa y con el telescopio fijo, donde saldrían trazos. La comparación entre las posiciones obtenidas de las imágenes de ambos métodos de observación nos dará la confiabilidad del uso de esa función de ajuste.

Por otro lado el uso de la función *tepei* para el ajuste a las imágenes creo que es el más adecuado si se emplean éstas como referencia en la búsqueda de dar un marco de referencia a las observaciones.

Un segundo punto sobre las observaciones, es la determinación de las funciones de ajuste. Qué parámetros son significativos y hasta qué orden deben ser las funciones. Para ello es necesaria una planificación que incluya la comunicación con las agencias de los satélites para el intercambio de datos, predicciones y problemas surgidos durante la aplicación de las maniobras. Se está en contacto con Hispasat para la coordinación mencionada en el futuro.

Como un nuevo punto debe destacarse el manejo y cálculo del parámetro distancia Tierra-satélite, bien sea desde la estación o desde el centro de masas de la Tierra. Es un tema todavía sin tratar y hay que diseñarlo desde el principio y corregirlo según los datos obtenidos a partir de ese diseño. La inclusión de la paralaje para una red de observatorios con vértices en el OAN, en el ROA y en Observatorio Catalán que acoja a la cámara Baker-Nunn, puede ser un buen comienzo. Para esto es necesaria la ayuda que puede aportar el método de las pseudo-distancias obtenidas por la doble vía que, en la actualidad, está aplicando la sección de Hora del ROA con algunos satélites como método de intercomparación de relojes.

Por último, y relacionado con el trabajo a futuro está el desarrollo científico del cálculo de órbitas para conseguir, a corto plazo, la proyección de las posiciones del satélite. Los elementos orbitales que definen estas órbitas y las variaciones de los mismos por influencia de las perturbaciones serán necesarios a la hora de querer planificar los movimientos de puesta en estación del satélite y para ello deben desarrollarse todavía las funciones de ajuste a las observaciones y el contacto con las agencias.

Como conclusiones obtenidas de las observaciones preliminares en el OAN podríamos destacar que el método de observación ideal es aquel que use un telescopio con dedicación exclusiva hacia un solo satélite, donde telescopio y CCD quedan fijos. De esta forma es posible capturar, con la composición de observaciones, las variaciones de las coordenadas astronómicas del satélite a lo largo del período de observación. Las observaciones pueden realizarse en forma automática con el CCD del ROA ya que el programa de manejo del CCD lo permite. De estas observaciones podríamos calcular la posición del CCD sobre la esfera celeste aprovechando las coordenadas de las estrellas que pasan por delante del campo durante la exposición, en forma casual o planificada.

7. Bibliografía

C. Abad, J.A. Docobo, V. Lanchares, J.F. Lahulla, P. Abelleira, J. Blanco and C. Álvarez: 2003. *Reduction of CCD observations of visual binaries using the **Tepui Function** as PSF*. *Astronomy & Astrophysics* 416, 811-814

Abad, C., Vieira K. y Zambrano, A.: 1998. *Reduction of the Astrographic Catalogue, zone of S. Fernando*. *A&AS* 132, 275-279.

Alby F., Boer M., Deguine B., Escane I., Newland F. & Portmann C.: 2004. *Advances in Space Research*, Volume 34, Issue 5, p. 1143-1149

Azcárate, T.: 1921. *Introducción al Catálogo Astrográfico*, Publicación del Real Instituto y Observatorio de la Armada.

Baltay et al.: 2002. *A Large-Area CCD Camera for the Schmidt Telescope at the Venezuelan National Astronomical Observatory*, *Proceedings of the Astronomical Society of the Pacific*, 114.

Eichhorn, H.: 1974. *Astronomy of star positions - A critical investigation of star catalogues, the methods of their construction and their purpose*. New York: Ungar, 1974.

Escane I., Delong N. & Newland F.: 2001. *First results for the ROSACE autonomous orbit determination system using deviation on CCD*, *International Symposium on Space Flight Dynamics*, Pasadena, California (USA)

García, S. y de Azcárate, T., 1921. *Introducción al Catálogo Astrográfico y apuntes relativos a la Práctica de su Cálculo*. Eds. Int. Publicación del Real Instituto y Observatorio de la Armada en San Fernando.

T. López Moratalla, M. Lara y C. Abad, 2003. *Los satélites geoestacionarios: un proyecto del Observatorio de San Fernando para la astrometría basada en tierra*. *Actas de las Jornadas Científicas: 250 años de Astronomía en España*. San Fernando, Cádiz. Editor M. Vallejo. Real Instituto y Observatorio de la

Carlos Abad (CIDA). Beca Alvargonzález 2005

Armada, San Fernando, Cádiz.

López Moratalla T., Abad C., Belizón F., Coma J.C., Montojo F.J., Muñós J.L., Palacio J. & Vallejo M.: 2004. *Astrometric Positioning of Geostationary Satellites*. Tercer Reunión Astronomía Dinámica en Latinoamérica (ADeLA), Mérida, Venezuela. RevMexAA(SC) Vol.25

Soop E.M.: *Handbook of geostationary orbits*. Kluwer Academic Publishers.

Stock J.: 1981. *Block Adjustment in Photographic Astrometry*. RmxA 6, 115-118.

Vicente B.: 2003. *Reducción Astrométrica de las Placas Fotográficas Carte du Ciel (Zona de San Fernando)*. Eds. Int. Publicación del Real Instituto y Observatorio de la Armada en San Fernando. Boletín ROA, No. 5/2003.









MINISTERIO
DE DEFENSA

