

CONTRIBUCION ARGENTINA AL PROYECTO INTERNACIONAL MERIT/COTES

Raúl Perdomo y Rubén Rodríguez

Grupo de Trabajo de Geodesia Satelitaria

Buenos Aires - Argentina

RESUMEN

La definición de sistemas de referencia para astronomía y geodesia es el motivo principal de este trabajo. En la primera parte, se resumen los sistemas en uso y las técnicas clásicas y modernas para su determinación. A fin de hacer compatibles todos los sistemas, la Unión Astronómica Internacional (UAI) y la Unión Geodésica y Geofísica Internacional (UGGI) planificaron la campaña internacional MERIT que con la intervención de la Asociación Internacional de Geodesia (AIG) se convirtió en el grupo MERIT/COTES.

La Argentina se incorporó a la campaña MERIT/COTES con la creación de un Grupo de Geodesia Satelitaria que coordinó el rastreo intensivo de satélites Transit y está - ahora - analizando los resultados y proyectando diversas actividades vinculadas que contribuirán al desarrollo geodésico argentino.

ABSTRACT

The definition of reference systems in astronomy and geodesy is the principal subject of this paper. In the first part, the systems in use and the classic and modern techniques for its determination are summarized. To make all systems compatible, the International Astronomic Union (IAU) and the International Union of Geodesy and Geophysic (IUGG) have planned the MERIT INTERNATIONAL CAMPAIGN, which the intervention of the INTERNATIONAL ASSOCIATION OF GEODESY (IAG) became the MERIT/COTES Group.

Argentine joined the MERIT/COTES Campaign with a Satellite Geodesy Group which coordinated the tracking of Transit satellites. It is now analyzing the data and projecting several activities which will contribute to the Argentine geodetic development.

2 CONTRIBUCION ARGENTINA...

1. COMPONENTES DEL PROBLEMA Y PRINCIPIOS PARA SU SOLUCION

El problema de la definición y materialización de sistemas de referencia en Astronomía y Geodesia mantiene plena vigencia, renovada en los últimos años en que adquirieron relevancia técnicas no tradicionales. A raíz de esta situación se han llevado a cabo muy importantes campañas internacionales para replan-tear y resolver los distintos aspectos del problema fundamental.

Cuatro componentes principales pueden separarse en su planteo global. Estas componentes son independientes, aunque en la práctica están fuertemente relacionadas. Son ellas, la definición y materialización de un sistema inercial convencional (CIS: conventional inertial system), la definición y materialización de un sistema terrestre convencional (CTS: conventional terrestrial system), la vinculación entre ambos, dada por los parámetros que describen la orientación de la Tierra en el espacio (EOP: Earth orientation parameters), y finalmente, una escala de tiempo uniforme (en la práctica este aspecto puede considerarse resuelto mediante el empleo de la escala de Tiempo Atómico Internacional).

1.1. Sistema de referencia inercial

La definición astronómica clásica del CIS es esencialmente dinámica: el Ecuador medio de una época fija es el plano desde el cual se mide la coordenada latitudinal y la eclíptica media de la época interseca al plano ecuatorial en dos puntos (equinoccios) uno de los cuales es el origen de la coordenada longitudinal. La teoría dinámica de movimiento de estos planos fundamentales (precesión general y nutación) permite transformar posiciones del sistema verdadero de la fecha al sistema de la época (es decir, al CIS).

El sistema queda materializado por las posiciones de objetos exteriores a la Tierra: clásicamente un catálogo fundamental de posiciones medias y movimientos propios estelares, pero también puede ser una efemérides satelitaria o planetaria expresada en el CIS.

1.2. Sistema de referencia terrestre

Está definido por una terna de ejes fijos a la Tierra con origen en su centro de masa. El eje z está dirigido hacia un punto en las proximidades del eje instantáneo de rotación, y los otros dos ejes están en el plano ecuatorial.

Dicho sistema está materializado por las coordenadas de un conjunto de puntos sobre la superficie terrestre.

1.3. La orientación de la Tierra en el espacio

En un instante cualquiera, la relación que existe entre coordenadas de un

mismo punto referidas al sistema inercial (X, Y, Z) o referidas al sistema terrestre (x, y, z), depende de la orientación de la Tierra en el espacio. La transformación de coordenadas puede escribirse de la siguiente manera (Lambeck, 1971):

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = R(P + N) \cdot R(TSV) \cdot R(u, v) \cdot \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} \quad (1)$$

En esta expresión $R(P + N)$ es una manera simbólica de escribir la matriz de rotación que contiene los elementos que definen el movimiento del eje de rotación terrestre en el espacio (precesión y nutación). En principio, estos elementos se obtienen teóricamente y en consecuencia no constituyen elementos conflictivos en el planteo global del problema.

La matriz $R(TSV)$ representa una rotación en torno al eje instantáneo de rotación terrestre de magnitud TSV (tiempo sidéreo verdadero). Por medio de este giro el eje x queda dirigido al equinoccio verdadero de la fecha. TSV depende de la velocidad angular de rotación de la Tierra y contiene uno de los parámetros desconocidos en esta transformación: TUI - TUC. Este parámetro describe la diferencia entre la escala rotacional de tiempo (TUI) y una escala de tiempo uniforme derivada del tiempo atómico (TUC).

La matriz $R(u, v)$ produce las rotaciones necesarias para llevar a coincidir al eje z terrestre con el eje instantáneo de rotación. Es decir que u, v son las coordenadas del polo instantáneo de rotación en el sistema terrestre. Con estos parámetros se describe el llamado "movimiento del polo" y junto con TUI - TUC constituyen los tres parámetros desconocidos "a priori" de la transformación (1).

En efecto, estos parámetros (EOP), que describen el movimiento del eje de rotación dentro de la Tierra misma, y la velocidad angular de rotación, presentan irregularidades de carácter geofísico que imposibilitan su predicción teórica.

1.4. Los principios generales del análisis

Cualquiera sea la técnica utilizada para resolver los distintos elementos del problema, pueden encontrarse principios generales comunes.

La cantidad observada "O" se compara con la pronosticada "C" calculada teóricamente. Las diferencias "O - C" se interpretan como errores en "C" originados por el mal conocimiento de alguno de los parámetros de la teoría.

Por ejemplo, la teoría de movimiento de un satélite artificial desarrollada en un sistema inercial permite calcular su posición X, Y, Z para un instante

4 CONTRIBUCION ARGENTINA...

cualquiera. La transformación inversa de (1) transforma esas coordenadas inerciales en coordenadas terrestres x, y, z .

Si en el instante considerado, desde una estación terrestre de coordenadas conocidas, se realiza una determinación de la distancia al satélite (con disparos laser, por ejemplo) se dispondrá de todos los elementos para comparar la distancia observada con la que resulte del cálculo descripto.

Las diferencias " $O - C$ " pueden tener varios orígenes: errores en la teoría de movimiento del satélite (incorrecta materialización del CIS), errores en los parámetros utilizados en la transformación (1), o bien, en las coordenadas de las estaciones terrestres.

Según las características particulares del problema, podrán determinarse correcciones a algunos de los elementos mencionados aunque no a todos simultáneamente.

2. TECNICAS CLASICAS VS. NUEVAS TECNICAS

Las técnicas astronómicas clásicas son las técnicas de posicionamiento basadas en la observación de estrellas con una gran variedad de instrumentos. Las llamadas nuevas técnicas son básicamente tres: la radiointerferometría de larga base, las técnicas de rastreo satelitario (laser y Doppler) y la telemetría lunar (laser).

2.1. La radiointerferometría de larga base

Esta técnica opera con el siguiente principio: dos radiotelescopios observan la misma radiofuente y graban el producto de la observación con marcas muy precisas de tiempo. La longitud de la base (distancia entre antenas) varía desde algunos cientos hasta varios miles de kilómetros, por lo que existe una diferencia de camino entre las señales que arriban a uno u otro extremo de la base.

Esta diferencia de caminos se traduce en una diferencia de fase medible que es función de la longitud de la base, de la frecuencia de la señal y del ángulo entre la base y la radiofuente (Elsemore, 1979).

El resultado de la observación se consigue cuando las señales grabadas en los extremos de la base se correlacionan mediante las marcas de tiempo mencionadas.

Las radiofuentes materializan al CIS y en ese sentido presentan una formidable ventaja sobre otros sistemas, puesto que pueden seleccionarse radiofuentes extragalácticas cuyo movimiento propio es verdaderamente despreciable. Dicho de otro modo, este sistema está realmente fijo en el espacio.

En consecuencia, de la observación puede deducirse la evolución de la línea de base en el espacio (y de ella, los parámetros de la rotación terrestre) y

también la longitud de la base (que permite establecer coordenadas relativas entre los extremos).

2.2. Rastreo satelitario

Las dos técnicas de rastreo satelitario más precisas son: la medición de distancias por disparos laser, y la determinación de la variación de distancias mediante la medición del desplazamiento Doppler de una señal de frecuencia fija emitida por el satélite.

Las efemérides satelitarias se calculan en un sistema inercial y de la comparación de las posiciones observadas y calculadas se obtienen los parámetros de la rotación terrestre conjuntamente con 6 parámetros orbitales que equivalen a una corrección en la posición y la velocidad iniciales del arco orbital observado.

El ajuste se realiza en base a las observaciones obtenidas por un conjunto de estaciones terrestres de coordenadas conocidas. Típicamente, el arco orbital ajustado es de unos pocos días, dado que las fuerzas perturbadoras no son perfectamente conocidas. (Smith et al, 1979).

Una vez ajustado el arco orbital y determinados los parámetros de la rotación terrestre, deducidos a partir de las observaciones realizadas desde estaciones con coordenadas conocidas, las nuevas efemérides pueden utilizarse para dar coordenadas a estaciones de posición desconocida. Estas coordenadas están referidas al sistema terrestre materializado por las estaciones conocidas.

2.3. Determinación de distancias Tierra-Luna

La determinación de distancias Tierra-Luna por disparos laser permite, en principio, seguir el mismo procedimiento descrito para los satélites. En este caso el sistema inercial está materializado por la efemérides de la Luna.

Sin embargo, en la práctica existen importantes diferencias con las técnicas satelitarias. La primera de ellas se refiere a que la Luna agrega nuevos parámetros a considerar: las posiciones selenocéntricas de los retroreflectores que devuelven los disparos laser. Naturalmente, también la rotación lunar juega un papel semejante al de la rotación terrestre. Como contrapartida, la órbita lunar es mucho "menos perturbada" que las órbitas satelitarias.

En segundo lugar, desde el punto de vista práctico, esta técnica es muy compleja. Requiere gran potencia de disparo, muy baja dispersión del haz laser, y un alto rendimiento en el receptor para detectar, entre otras cosas, el pulso reflejado.

A raíz de esta situación solamente dos o tres estaciones han funcionado con cierta regularidad, sin embargo, ellas han contribuido a mejorar notablemen

6 CONTRIBUCION ARGENTINA...

te el conocimiento del movimiento lunar (Mulholland, 1980).

2.4. La Astronomía clásica

Las técnicas astrométricas determinan los parámetros de la rotación terrestre midiendo las variaciones locales de tiempo y latitud en cada estación. Los resultados individuales son enviados a dos centros internacionales: el Bureau International de l'Heure (Francia) y el International Polar Motion Service (Japón).

Las determinaciones locales se hacen en base a la observación de estrellas que materializan el CIS. En general, "el sistema inercial" no está libre de rotaciones residuales debidas a la rotación galáctica.

Las coordenadas medias de las estaciones, determinadas sobre largos períodos de tiempo, materializan la orientación del sistema terrestre (un polo medio de una época origen y el correspondiente meridiano de longitud cero).

El sistema astrométrico ha mantenido este servicio en forma ininterrumpida desde fines del siglo pasado. En la actualidad, unas setenta estaciones contribuyen con sus observaciones.

3. PRIMERO MERIT, LUEGO MERIT/COTES

La descripción sintética de las distintas técnicas que se acaba de hacer, muestra hasta qué punto el panorama se ha enriquecido, como así también, complejado. Cada técnica utiliza distintos sistemas de referencia, tanto exteriores como terrestres. La forma en que determinan la rotación terrestre también difiere sensiblemente entre ellas.

La necesidad de proveer información homogénea con fines comparativos que permita determinar las diferencias sistemáticas entre los sistemas, obtener los parámetros de la rotación terrestre con la máxima precisión posible, etc., llevó a la Unión Astronómica Internacional (UAI), conjuntamente con la Unión Geodésica y Geofísica Internacional (UGGI), a planificar y recomendar la campaña internacional MERIT (Monitor Earth Rotation and Intercompare Techniques).

La primera fase de MERIT fue una campaña observacional con participación de todas las técnicas, que se desarrolló exitosamente desde agosto a octubre de 1980. Los resultados del análisis de esta campaña corta fueron muy satisfactorios (Wilkins and Feissel, 1982) y condujeron al replanteo de la campaña principal MERIT (desarrollada entre setiembre de 1983 y octubre de 1984).

En efecto, se estableció un grupo de trabajo conjunto con miembros de la UAI, de la UGGI y de la AIG (Asociación Internacional de Geodesia) que se denominó MERIT/COTES (Conventional Terrestrial System).

El grupo MERIT/COTES se constituyó con el objeto de reorganizar la fase

principal de la campaña MERIT, de manera que sus resultados contribuyeran eficazmente para el establecimiento de un nuevo sistema terrestre de referencia.

Las resoluciones internacionales más trascendentes, respecto de este proyecto, fueron aprobadas por la Reunión General de la AIG (Tokio, 1982) y auspiciadas por la Asamblea General de la UAI (Patras, 1982), y de la UGGI (Hamburgo 1983). Las resoluciones 1 y 2 pueden resumirse de la manera siguiente:

Res. 1: Considerando que los resultados obtenidos durante la campaña principal MERIT serán beneficiosas para la Geodesia y sus aplicaciones, decididamente apóyanse las proposiciones de los grupos de trabajo MERIT y COTES en el sentido de realizar una campaña intensiva por un período limitado durante el cual se superpongan más de una técnica en sitios apropiados, urgiendo a los países involucrados a apoyar el proyecto.

Res. 2: Considerando que las determinaciones y resultados obtenidos de este proyecto deben extenderse y relacionarse con todos los servicios existentes lo más pronto y precisamente posible, se urge a la utilización de sistemas satelitarios Doppler en las estaciones de otras técnicas, así como en un mayor número de sitios bien distribuidos en todo el mundo.

Estas resoluciones pueden interpretarse del modo siguiente: la colocación de técnicas distintas en un mismo sitio permite relacionar los distintos sistemas y obtener exactitudes sin precedentes. La vinculación de todos los otros sistemas mundiales con el que surja de la campaña, puede hacerse rápida y precisamente utilizando Doppler, que es sin duda la técnica más extendida y accesible.

La contribución argentina a la campaña MERIT se desarrolló, desde 1980, en el marco de las técnicas clásicas. Cuatro estaciones astrométricas colaboran habitualmente con los servicios de rotación de la Tierra.

La ampliación de los objetivos de la campaña MERIT y la existencia de varios receptores Doppler en el país, condujeron a la proyección y concreción de la primera campaña argentina de rastreo Doppler intensivo.

4. GRUPO DE TRABAJO DE GEODESIA SATELITARIA

Las recomendaciones de la III Reunión Latinoamericana de Astronomía, sugiriendo la participación en la campaña MERIT/COTES, la recomendación del VI Congreso Nacional de Cartografía promoviendo los estudios e investigaciones de geodesia satelitaria y la vinculación de astrómetras y geodestas dio lugar a la constitución de un grupo de trabajo que se dedicara al tema. El grupo empezó a funcionar a partir de diciembre de 1983 en el Subcomité de Geodesia del Comité Nacional de la UGGI y está presidido por el Ing Angel A. Cerrato. Lo integran el Instituto de Geodesia de la Facultad de Ingeniería (UBA), el Instituto Geográfico Militar, la Facultad de Ciencias Astronómicas y Geofísicas (UNLP), la Direc-

8 CONTRIBUCION ARGENTINA...

ción de Tránsito Aéreo, Yacimientos Petrolíferos Fiscales, el Servicio de Hidrografía Naval, la Secretaría de Minería, la Comisión Nacional de Investigaciones Espaciales, el Instituto Antártico Argentino y la Facultad de Ciencias Exactas y Tecnología (UNT), quedando abierto a otros entes con posibilidades de contribuir al desarrollo de la tecnología. A partir de su constitución el grupo se reunió mensualmente coordinando la campaña argentina del proyecto internacional MERIT/COTES.

4.1. Campaña argentina MERIT/COTES

A fin de contribuir a los objetivos del programa internacional MERIT/COTES y realizar diversas experiencias de cálculo con datos provenientes de la campaña se proyectaron siete estaciones que deberían rastrear en forma permanente, durante el mes de mayo de 1984, todos los satélites Transit disponibles.

Tres estaciones - San Martín, San Juan y Río Grande - coincidían con la ubicación de otros tantos astrolabios de Danjon; una - Punta Indio - con un tubo cenital fotográfico (PZT) y las tres restantes eran ubicadas en puntos de la red geodésica fundamental o en posiciones con posibilidad de vinculación a la misma. La pretensión era lograr una distribución armónica sobre la red compatible con las posibilidades económicas de las entidades participantes y sin interferir substancialmente sus programas regulares.

La ubicación geográfica de las estaciones de rastreo y la configuración de la red geodésica se pueden apreciar en la fig. 1.

Respondiendo al proyecto la campaña se cumplió durante el mes de mayo y parte de junio de 1984. La tabla siguiente ilustra acerca del desarrollo de la campaña:

ESTACION	PERMANENCIA (días)	PASOS REGISTRADOS	EQUIPO UTILIZADO	ENTIDAD A CARGO DE LA ESTACION	VINCULACION A LA RED
1-San Martín	33	303	JMR 1	1	sí
2-Río Grande	31	466	JMR 1A	2	no existe red
3-Tartagal	32	220	JMR 4	3	pendiente
4-Punta Indio	40	257	JMR 4	4	pendiente
		153	Motorola	5	pendiente
5-San Juan	28	248	Motorola	5	pendiente
6-Córdoba	22	120	Magnavox	6	sí
7-El Maitén	23	150	Magnavox	7	pendiente

1 Instituto Geográfico Militar; 2 Yacimientos Petrolíferos Fiscales; 3 GEOMATTER S.A.; 4 Secretaría de Minería; 5 Servicio de Hidrografía Naval; 6 Dirección de Tránsito Aéreo (Fuerza Aérea Argentina); 7 Comisión Nacional de Investigaciones Espaciales (Fuerza Aérea Argentina).

4.2. Los primeros cálculos fueron la reducción de los datos con los microprocesadores a fin de evaluar la calidad de los datos y de la grabación, así como la colección de toda la información complementaria: datos meteorológicos de las estaciones del Servicio Meteorológico Nacional próximas al lugar de rastreo, coordenadas terrestres existentes, vinculación a la red cuando fue efectuada, itinerario para el acceso al punto y su marcación, etc.

La información registrada mediante equipos JMR fue posible grabarla en cintas magnéticas compatibles con las computadoras digitales por intermedio del convertidor que pertenece a YPF y la participación de su Departamento de Topografía. Estos datos podrán ser calculados así mediante efemérides de precisión en la Agencia Cartográfica de Defensa de E.U.A.

5. PERSPECTIVAS FUTURAS Y USO DE LOS DATOS

El volumen de datos registrado en los 2000 pasos rastreados durante la campaña ofrece un amplio número de posibilidades de ensayos e investigaciones para el desarrollo de la tecnología dentro de nuestro país, que podemos resumir de la siguiente manera:

- 5.1. La remisión de los datos al coordinador del programa mundial permitirá la inserción argentina en dicho proyecto y recibir como contrapartida la experiencia internacional y los valores numéricos a aplicar en las transformaciones.
- 5.2. El análisis de la información recogida durante la campaña, su procesamiento total o parcial ofrece la posibilidad de adquirir una amplia experiencia propia en el tratamiento de datos satelitarios.
- 5.3. Estudio del fenómeno de refracción ionosférica y troposférica y su influencia en las observaciones, ajustando los modelos existentes al hemisferio sur o diseñando uno propio. El examen deparará también, como consecuencia de las perturbaciones originadas por los fenómenos atmosféricos, el conocimiento de las precauciones a tener en cuenta durante el proceso de observación.
- 5.4. Desarrollo de programas propios de traslocación y ajuste orbitales.
- 5.5. Definición del modelo de geoide correspondiente a nuestro país cuya importancia está dada por la necesidad de su conocimiento para la reducción de las observaciones geodésicas planimétricas y altimétricas, particularmente entre estas últimas las registradas con receptores satelitarios.

10 CONTRIBUCION ARGENTINA...

5.6. Compatibilización de las observaciones efectuadas con distintos equipos.

5.7. Recálculo de la red geodésica fundamental con elementos provenientes directa o indirectamente de la campaña.

5.8. Constitución de un banco de datos que brinde información a todos los usuarios del sistema nacional de coordenadas.

En definitiva una amplia práctica y la formación de los recursos humanos necesarios para abordar el empleo de la utilización de la actual constelación de satélites Transit y la que se encuentra en etapa experimental: el sistema de posicionamiento global (GPS).

BIBLIOGRAFIA

Elsemore, B., 1979: An Introduction to Radio Interferometric Techniques; International Astronomical Union, Symp. N° 82 "Time and the Earth's Rotation", 177-181.

Lambeck, K., 1971: Determination of the Earth's Pole of Rotation from Laser Range Observations to Satellites; Bulletin Géodésique, 101, 263-281.

Mulholland, D., 1980: Scientific Achievements from Ten Years of Lunar Laser Ranging; Rev. Geophys. Space Phys., 18, 549-564.

Smith, D., Kolenkiewicz, R., Dunn, P., Torrence, M., 1979: Determination of Polar Motion and Earth Rotation from Laser Tracking of Satellites; International Astronomical Union, Symp. N° 82 "Time and the Earth's Rotation". 231-238.

Wilkins, G., Feissel, M., editors, 1982: Project MERIT. Report on the Short Campaign and Graz Workshop with Observations and Results on Earth Rotation during 1980 August - October; Royal Greenwich Observatory, Herstmonceux.

