

Astrometría moderna: el desafío del trabajo interdisciplinario

L.I. Fernández^{1,2,3}

¹ Facultad de Ciencias Astronómicas y Geofísicas (FCAG), UNLP, Argentina

² Laboratorio MAGGIA, FCAG-UNLP, CICPBA, Argentina

³ Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas, Argentina

Contacto / lauraf@fcaglp.unlp.edu.ar

Resumen / La astrometría entendida como la medida de las posiciones, distancias y movimientos de objetos celestes juega un rol muy importante contribuyendo con las otras áreas de la astronomía. Durante las últimas cuatro décadas la disciplina ha atravesado profundas transformaciones que resultaron en dramáticas mejoras en la precisión abarcando desde las posiciones hasta las escalas de tiempo asociadas. Tales logros van de la mano con las mejoras en los sistemas de referencia involucrados y en sus parámetros de conexión. Haremos un repaso de las aplicaciones científicas interdisciplinarias más usuales hoy en día. Este escenario de trabajo fue estableciéndose de modo paulatino desde la década de los años 90 acompañando los desarrollos tecnológicos. Presentaremos una visión actual de las diferentes temáticas de trabajo, sus aplicaciones, las técnicas y/o misiones espaciales involucradas, su relación y punto de contacto con los profesionales de otras disciplinas mayormente asociadas a la ciencias de la Tierra. Para ello trataremos brevemente la materialización de los sistemas de referencia celeste y terrestre, así como la determinación y el estudio de las variaciones de los parámetros de la orientación terrestre (EOP, del inglés: Earth Orientation Parameters).

Abstract / Astrometry, understood as the measurement of the positions, distances and motions of celestial objects, plays a very important role in contributing to the other areas of astronomy. During the last four decades the discipline has undergone profound transformations resulting in dramatic improvements in accuracy ranging from positions to the associated time scales. Such achievements go hand in hand with improvements in the reference systems involved and their connecting parameters. We will review the most common interdisciplinary scientific applications today. This working scenario has been gradually established since the 90's, accompanying technological developments. We will present a current view of the different work topics, their applications, the techniques and/or space missions involved, their relationship and point of contact with professionals from other disciplines mostly associated with Earth sciences. We will briefly discuss the materialization of celestial and terrestrial reference systems, as well as the determination and study of the variations of Earth Orientation Parameters (EOP).

Keywords / astrometry — reference systems — atmospheric effects

1. Introducción

La astrometría está involucrada en la medida de las posiciones, distancias y movimientos de objetos celestes. Sin dudas es la rama más antigua de la astronomía. Las primeras civilizaciones ya fueron capaces de advertir una periodicidad en el movimiento de los objetos celeste lo que les permitió determinar direcciones geográficas y establecer las primeras escalas de tiempo.

Son muchos los autores que vinculan al astrónomo griego Hiparco de Nicea (190-120 A.C.) con el nacimiento de astrometría como tal. Entre otros logros se asigna a Hiparco ser el primero que completó un catálogo con precisión cercana a 1° y, dado que también se le asigna la creación de la escala de magnitudes estelares, brindó información del brillo relativo de cada objeto. Además fue el primero en evidenciar las diferencias entre un año sidéreo y un año trópico y dedujo el efecto que más tarde N. Copérnico definiría como *la precesión de los equinoccios* (Hockey et al., 2014).

Ya en el siglo XVIII las observación y el cálculo de

posiciones estelares se usó no sólo para la navegación sino también para determinar posiciones en el marco de referencia terrestre y así poder georeferenciar sitios de interés (de Asúa, 2009). De este modo el vínculo de la astrometría con las geociencias resulta inmediato.

Es bien sabido que desde sus inicios, los principales centros astronómicos de nuestro país han protagonizado importantes contribuciones a la astrometría de su época. Como ejemplos podemos citar la Uranometría Argentina, el Catálogo de Zonas, el Catálogo General Argentino y Córdoba Durchmusterung, entre otros trabajos realizados en el Observatorio Nacional Argentino* (Paolantonio & Minniti, 2009). Para el Observatorio de La Plata podemos mencionar las determinaciones regulares de latitud, longitud en distintas localidades de la provincia y determinaciones de tiempo no sólo para determinar la hora al público sino también para proveer servicio de hora a los buques en el puerto de Ensenada ((de Asúa, 2009);(Perdomo, 2009)). Asimismo, los oríge-

*Actual Observatorio Astronómico de Córdoba.

nes del Observatorio Astronómico Félix Aguilar también fueron exclusivamente astrométricos (López, 2009).

Sin embargo, sin ánimo de resumir la historia, propongo al lector un rápido recorrido por algunos de los trabajos que hoy día la astrometría realiza en íntima colaboración con profesionales de otras disciplinas. Estas tareas surgen como una consecuencia lógica del avance tecnológico y se han desarrollado sin interrupción en todo el mundo desde la última década del siglo pasado.

Efectivamente, las técnicas de observación evolucionaron, y esto provocó en algunos casos una ampliación de la ventana del espectro electromagnético de trabajo para instrumentos localizados en la Tierra, mientras que en otros casos el instrumental se colocó a bordo de diferentes misiones espaciales.

En 1989 la Agencia Espacial Europea (ESA, European Space Agency) lanzó el primer satélite astrométrico (*Hipparcos*, acrónimo del inglés High Precision PARallax Collecting Satellite). Las ventajas evidentes de la colocación del instrumental de medición fuera de la superficie de la Tierra se resumen en: la eliminación de la refracción y la turbulencia atmosférica, además de la posibilidad de observar casi todo el cielo desde un mismo observatorio, entre otras.

La misión *Hipparcos* logró posiciones, paralajes y movimientos propios (μ) para casi 118000 objetos, que resultaron 100 veces más precisas que las obtenidas en Tierra alcanzando así el milisegundo de arco (mas, del inglés: milliarcsecond) (Van Leeuwen, 2007). Estos resultados impactaron positivamente en un amplio rango de áreas de la astronomía que incluyen desde estructura y dinámica de la galaxia hasta restricciones sobre la evolución estelar (Perryman, 2009); además de las esperadas contribuciones a la mecánica celeste y al estudio de las variaciones a la rotación terrestre.

Actualmente el progreso alcanzado por *Hipparcos* palidece frente a los recientes resultados de otro satélite astrométrico de la ESA: la misión *Gaia* (Gaia Collaboration et al., 2016). Sólo para tener una referencia mencionaremos que el tercer lanzamiento temprano de datos *Gaia* (EDR3, Early Data Release 3), brindó posiciones, paralajes y μ referidas a J2016.0 para 1.468×10^9 fuentes. Estos dos últimos parámetros tienen con un error medio de 0.02-0.5 mas dependiendo de su magnitud (Lindgren et al., 2021). El sinfín de posibilidades y los extraordinarios logros que los resultados de *Gaia* están logrando en la comunidad astronómica exceden esta presentación y no se tratarán aquí.

Hemos visto que los avances tecnológicos logrados en las décadas de los '80 y '90 del siglo XX fortalecieron enormemente la materialización de los sistemas de referencia celeste, por ejemplo. Pero en otros casos el impacto de ese avance sobre la astrometría sumó aplicaciones desde nuevas misiones espaciales que originalmente fueron concebidas con objetivos más allá de la astronomía. Podemos citar rápidamente un ejemplo de ello en los sistemas globales de navegación por satélite, (GNSS, Global Navigation Satellite Systems), entre los cuales GPS (Global Positioning System) es el más popular.

En las próximas secciones presentaremos brevemente algunos ejemplos de diferentes temáticas de trabajo en

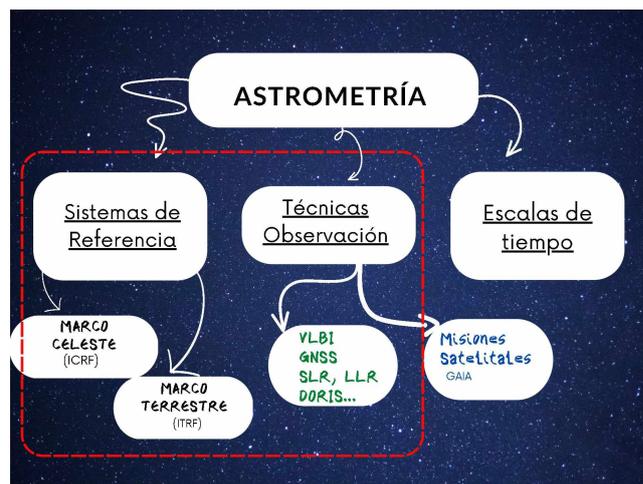


Figura 1: Esquema en bloques de las áreas de aplicación de la astrometría. Los ejemplos aquí presentados pertenecen a los bloques destacados en rojo.

la astrometría al día de hoy, sus aplicaciones, las técnicas de observación involucradas, su relación y el punto de contacto con los profesionales de otras disciplinas mayormente asociadas a la ciencias de la Tierra.

2. Áreas de impacto interdisciplinar

Comenzaremos definiendo que áreas de la astrometría vamos a presentar como ejemplos de trabajo interdisciplinario. La Fig. 1 nos muestra los tres grandes bloques en los que podemos clasificar generalmente a las aplicaciones astrométricas. Nos enfocaremos en los sistemas de referencia, en el estudio de los parámetros de la orientación terrestre que vinculan los marcos de referencia celeste y terrestre y, finalmente, pondremos foco en el procesamiento de los datos de medición que permiten hoy la construcción de los marcos de referencia. Con respecto a este último punto, cabe aclarar que sólo nos referiremos a algunas de las técnicas instaladas en la superficie de la Tierra y/o a ciertas misiones satelitales, algunas de ellas concebidas con fines no astrométricos**.

Por otro lado, encontramos un nuevo enfoque a las aplicaciones *clásicas* de la astrometría, esto es materialización de los sistemas de referencia y análisis de los Parámetros de la Orientación de la Tierra (EOP, del inglés Earth Orientation Parameters). Es aquí donde un incremento en los niveles de precisión alcanzados requiere del trabajo interdisciplinario para poder brindar una adecuada fundamentación física de los fenómenos observados.

Con respecto al análisis y el procesamiento de las observaciones, la mayoría de los ejemplos que presentaré usan el mismo principio general: a partir de los errores y/o sistematismos de una dada medición, se encuentra, utiliza y aprovecha una fuente de datos alternativa para el desarrollo de nuevos estudios de interés para profesionales en ciencias afines.

Si bien la cantidad de ejemplos que podríamos enumerar es muy grande, nos concentraremos sólo en algu-

**En conjunto se denominan *técnicas de la geodesia espacial*.

nas de las aplicaciones donde la interacción interdisciplinaria es mas notoria.

3. Las técnicas de observación

A partir de la década de 1980, el instrumental usado hasta ese momento para llevar a cabo las observaciones de la astrometría óptica (astrolabios, tubos cenitales, círculos meridianos) fue cediendo paso al uso de satélites, observaciones en radio ondas y la medida de distancias a satélites usando láser. Resumiremos a continuación las principales técnicas de observación usadas hoy para la materialización de los sistemas de referencia y la estimación de los EOP. La Fig. 2 nos muestra el rol de cada una de las técnicas de observación que trataremos en la materialización de los sistemas de referencia.

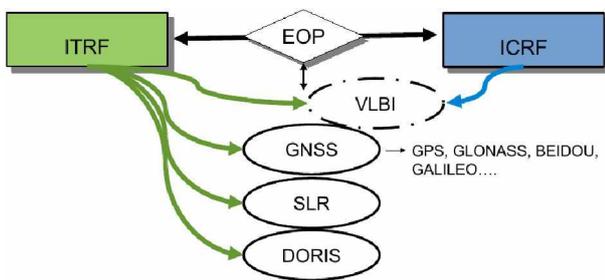


Figura 2: Rol de las técnicas de observación en la materialización de los sistemas de referencia celeste y terrestre.

La Interferometría de Línea Base Muy Larga (VLBI, Very Long Baseline Interferometry) mide la diferencia en los tiempos de llegada de las señales provenientes de las radio fuentes extragalácticas puntuales, que forman parte del Marco de Referencia Celeste Internacional (ICRF, International Celestial Reference Frame), por correlación cruzada. Esta técnica también contribuye a la materialización del Sistema de Referencia Terrestre Internacional (ITRF, International Terrestrial Reference Frame). A diferencia de otros interferómetros, VLBI se caracteriza por formar líneas de base de miles de kilómetros. Esta característica le permite al sistema determinar directamente el ángulo de rotación de la Tierra además de los parámetros de la nutación. Por lo tanto, VLBI es la única técnica que puede proporcionar el conjunto completo de los EOP (Schuh & Böhm, 2013).

Actualmente todos estamos familiarizados con los Sistemas de Navegación Global por Satélites (GNSS). El sistema mas conocido es NAVSTAR GPS (Navigation Signal Timing and Ranging Global Positioning System) popularizado como GPS y perteneciente al gobierno de E.E.U.U. Los GNSS son desarrollados y mantenidos por distintos estados y pueden considerarse una herramienta geopolítica. Si bien GPS ha liberado de restricciones al sistema desde el año 2000 permitiendo así, su uso civil y todas las alternativas de aplicaciones de las que disponemos hoy día, no siempre fue así.

Efectivamente GPS y GLONASS (GLobalnaya NAVigatsionnaya Sputnikovaya Sistema), este último per-

tenciente a la U.R.S.S.^{***}, nacen casi en simultáneo durante la guerra fría. Sus objetivos eran militares y estaban vinculados al posicionamiento y guiado de armas. Por razones económicas GPS alcanza su madurez operativa a mediados de los años 90, mientras que GLONASS lo hace varios años después. Hoy en día podemos mencionar otros sistemas operativos como *BeiDou* (Osa Mayor) perteneciente a China, IRNSS (Indian Regional Navigation Satellite System, también conocido como NavIC) de India o GALILEO perteneciente a la Unión Europea. Este último, que alcanzó su madurez operativa ya en el siglo XXI, nace concebido como un sistema civil.

La finalidad de los GNSS es posicionar a un receptor en Tierra (en superficie y/o hasta una dada altura de seguridad permitida) las 24 horas del día, cualquier día del año y bajo cualquier condición climática^{****}. Esta última condición es muy importante y se desarrollará en la Sec. 3.1.

Para cumplir con sus objetivos, además de un receptor en Tierra el sistema necesita de satélites activos en un arreglo de órbitas tal que cualquier usuario pueda encontrar al menos cuatro satélites sobre el horizonte cuando encienda su receptor. Los satélites poseen a bordo patrones de frecuencia ultra estables (se utilizan para materializar escalas de tiempo) y el receptor (que emula la señal que emite el satélite y posee también un patrón de frecuencias aunque de menor calidad) correlaciona señales y estima distancias a partir de medidas de tiempo. Por su fácil portabilidad y moderado valor económico los receptores GNSS forman una densa red mundial que materializa el ITRF. Pero como el funcionamiento del sistema exige conocer las órbitas de los satélites con mucha precisión, también se usan para estimar los EOP.

La técnica de medición que usa disparos láser a un satélite (SLR, Satellite Laser Ranging) permite obtener distancias de modo muy preciso. Desde una base óptica cuidadosamente calibrada y anexada a un telescopio se envía un pulso láser a un objetivo (generalmente satélites pasivos de órbita baja y dedicados, pero también algunas naves GNSS) que posee un arreglo de espejos retroreflectores. El haz es reflejado en la dirección de incidencia y recibido por un detector sensible que está acompañado por un patrón ultra estable de frecuencias. Se calcula entonces el tiempo de viaje y, si asumimos la distancia conocida (órbita conocida), se puede materializar ITRF o estimar los EOPs. En particular es la técnica más confiable para establecer el geocentro, origen del ITRF. Esta técnica también admite usar los arreglos retroreflectores colocados en la superficie de la Luna (LLR, Lunar Laser Ranging) aunque la sensibilidad del detector es diferente y por lo tanto el sistema es sensiblemente más caro.

DORIS (Doppler Orbitography and Radio-positioning Integrated by Satellite) es un sistema desarrollado y administrado por Francia. Fue creado para el mantenimiento y monitoreo de las órbitas precisas que necesitan sus misiones satelitales altimétricas. Su principio de funcionamiento está basado en el efecto

^{***}Hoy Rusia.

^{****}Evento meteorológico en la superficie, ciertos eventos meteorológicos espaciales pueden afectar al sistema.

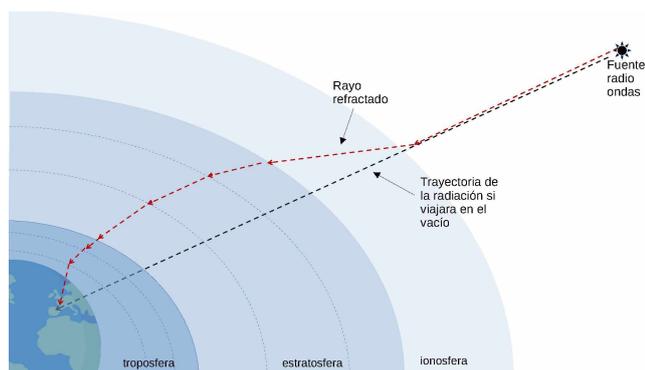


Figura 3: Esquema de la refracción atmosférica. El haz refractado recorre un camino óptico mayor que su propagación en el vacío. Esto produce un *retraso* en tiempo de arribo de la señal.

Doppler, pero contrario a los GNSS, el emisor es la antena en tierra mientras que el receptor se encuentra a bordo del satélite. Esta técnica contribuye al ITRF.

3.1. El rol de la atmósfera

Tanto VLBI como los GNSS, por ejemplo, trabajan con señales en el rango microondas-radio del espectro electromagnético. Esta característica tiene una ventaja evidente con respecto a los telescopios y/o anteojos en el rango visible: las observaciones pueden realizarse sin importar el *estado del tiempo*. Efectivamente, no importa si la antena receptora se encuentra en un sitio afectado por niebla, lluvia, nieve, granizo o simplemente nublado[†] la medición puede realizarse igual. Esta es justamente una de las características principales de los GNSS: el usuario (receptor) podrá estimar su posición en cualquier momento, en cualquier lugar y bajo cualquier condición climática.

Desde nuestra formación, los astrónomos ya sabemos que el pasaje de la radiación electromagnética por la atmósfera en su viaje hacia el observador modifica el camino óptico. Este efecto se conoce como refracción atmosférica y para las señales en el rango visible sabemos que podemos estimarla al primer orden aplicando sucesivas veces la ley de Snell.

En el caso de las radio señales la situación es un poco diferente. Las transiciones rotacionales de la molécula de vapor de agua son responsables de la absorción de la radiación electromagnética en las regiones de microondas-radio del espectro. Por lo tanto, la mezcla atmosférica que atraviesa la señal admite dividirse en vapor de agua (parte húmeda), cuyo momento dipolar contribuye a la refractividad y una parte seca (o hidroestática) (Bevis et al., 1992).

Por otro lado, la ionosfera constituye un medio dispersivo para las radio señales y la velocidad de propagación resultará una función de la frecuencia. Ambas técnicas (VLBI y GNSS) tienen en cuenta este hecho y por ello trabajan con dos frecuencias de modo tal que

[†]En el caso de las antenas VLBI debe tenerse en cuenta el viento que podrían afectar la operación dadas las dimensiones y características constructivas de las grandes antenas.

una combinación lineal de las mismas reduzca al primer orden la refracción ionosférica. Sin embargo, las perturbaciones ionosféricas de orden superior permanecen.

La llegada de la información desde una fuente posicionada en el marco de referencia celeste hacia un receptor en Tierra impone que la radiación electromagnética emitida atraviese la atmósfera terrestre. En consecuencia el haz será refractado por la atmósfera y el camino óptico resultante será mayor a la trayectoria rectilínea que corresponde al viaje fuente-receptor en el vacío. En la Fig. 3 podemos ver que la señal refractada tardará más tiempo en llegar al receptor y es por ello que al efecto de refracción atmosférica sobre la señal se la denomina *retraso atmosférico*, en general. Pero analicemos las contribuciones a la refracción de las distintas partes de la atmósfera.

La contribución debida al vapor de agua, que se concentra en los primeros 2 km de la atmósfera desde la superficie de la Tierra, se denomina *retraso troposférico* (ZTD, del inglés Zenith Tropospheric Delay). Por lo anterior, el ZTD admite dividirse en dos: la contribución de las componentes no dipolares de la mezcla atmosférica a la refractividad, que pueden modelarse como un gas en equilibrio hidrostático y se denomina *componente seca* (ZDD, del inglés: Zenith Dry Delay); y el contenido de vapor de agua en la mezcla, que no puede modelarse y se denomina *componente húmeda* (ZWD, del inglés: Zenith Wet Delay). El ZWD es directamente proporcional al *contenido vertical integrado de vapor de agua atmosférico sobre el receptor*, esta cantidad se la denomina PWV (del inglés: Precipitable Water Vapor) o también IWV (del inglés: Integrated Water Vapor).

Por otro lado, el efecto debido a la parte superior de la atmósfera se la conoce como *retraso ionosférico* y será proporcional a la cantidad total de electrones atravesada por la señal (TEC, del inglés: Total Electron Content).

Si analizamos el problema del posicionamiento, tanto en el marco terrestre como en el celeste, el retraso atmosférico constituye una fuente de error de las observaciones y debe ser reducido. Sin embargo, conociendo las posiciones precisas puede reconstruirse matemáticamente la distancia fuente-receptor en el vacío y a partir de las mediciones, estimar el aumento en el camino óptico real. De este modo podrá deducirse, por ejemplo, la cantidad de vapor de agua que atravesó la señal.

El vapor de agua atmosférico es uno de los gases más abundante del efecto invernadero. Sin embargo, no está suficientemente muestreado ya que las mediciones son especialmente escasas en grandes áreas de Latinoamérica donde su disponibilidad, de uno o dos valores diarios de radiosondeo, a menudo está vinculada a la operatoria de los grandes aeropuertos. Además, los valores estimados desde satélites meteorológicos son muy imprecisos (Fernández et al., 2010). El IWV estimado desde GNSS tiene la misma precisión que los radiosondeos (Bianchi et al., 2016), no tiene un costo operativo adicional (gratis) y puede proveer típicamente 24 datos diarios. Por todo esto el IWV desde GNSS es una importante fuente de datos para la Meteorología que admite ser usado en pronósticos e ingestado en modelos numéricos (NWM, del inglés: Numerical Weather Models). Además de otras aplicaciones menos convencionales como la esti-

mación de un índice de severidad de incendios forestales (Fernández et al., 2019).

De modo análogo el TEC GNSS se usa para estudios ionosféricos, geomagnéticos y/o de la física solar. Por ejemplo, el análisis de variaciones ionosféricas durante tormentas geomagnéticas inducidas por algún evento solar que afecta al medio Sol-Tierra. También se producen índices ionosféricos de alta resolución espacial en tiempo casi real, importantes tanto para las aplicaciones civiles como para la comunidad científica (Perez Bello et al., 2019).

El laboratorio MAGGIA (Meteorología espacial, Atmósfera terrestre, Geodesia, Geodinámica, diseño de Instrumental, Astrometría; UNLP-CICPBA) administra dos servicios gratuitos y operacionales a tiempo casi real. Uno de ellos proporciona desde 2019 el TEC GNSS ionosférico regional para 270 estaciones cada 15 minutos <https://wilkilen.fcaglp.unlp.edu.ar/ion/ultimo.png>, (Mendoza et al., 2019). El otro provee desde 2022 ZTD e IWV GNSS para 110 estaciones regionales cada 60 minutos <https://wilkilen.fcaglp.unlp.edu.ar/tro/latest.html> (Aragón Paz, 2020; Aragón Paz et al., 2023). La Fig. 4 muestra la distribución de los sitios GNSS y los correspondientes valores de ZTD e IWV calculados para un dado instante. En estos dos casos, MAGGIA es el único proveedor regional de datos con estas características: procesamiento multi sistema, multi banda, baja latencia, generado con software propio y validado con resultados publicados.

4. Marcos de referencia

Históricamente la astrometría siempre estuvo involucrada en la materialización de los sistemas de referencia celestes. En 1997 la International Astronomical Union (IAU) establece el Sistema de Referencia Celeste Internacional (ICRS, International Celestial Reference System) materializado a partir de las observaciones VLBI a un conjunto de radiofuentes extragalácticas compactas (Ma & Feissel, 1997). Este primer marco de referencia celeste (ICRF) sólo construido a partir de mediciones en el rango de radio del espectro constaba de unas 200 fuentes de definición, con un total aproximado en 600 fuentes y alcanzaba una incerteza en las posiciones de 0.5 mas (Arias et al., 1995). Años más tarde, en el 2000, la IAU extendería el ICRF al rango visible (HCRF, Hipparcos Celestial Reference Frame) usando algunas de las posiciones *Hipparcos* (Zacharias, 2006).

Desde 1997 y hasta su actual realización, VLBI (operando en las frecuencias S/X) fue la única técnica de observación involucrada en la materialización del sistema celeste. A partir del 2018, la tercera y última realización del ICRS (ICRF3)[‡] incorpora observaciones adicionales realizadas en frecuencias de radio mas altas (banda K y X/Ka) y provenientes de otras misiones no concebidas con fines astrométricos. Esto no sólo incrementó el número total de objetos sino que también se logró un piso de ruido en las coordenadas individuales de 0.03 mas (Charlot et al., 2020).

[‡]Vigente desde 1 enero 2019.

Las materializaciones del sistema de referencia terrestre internacional (ITRS, International Terrestrial Reference System), o dicho de otro modo las soluciones del marco de referencia terrestre internacional (ITRF), consisten en conjuntos de posiciones y velocidades de estaciones y sus matrices de varianza/covarianza. El ITRF provee además parámetros adicionales que indican, por ejemplo que la estación ha sufrido un sismo reciente. La última realización (ITRF2020) brinda posiciones y velocidades con errores en el orden de los mm y mm y^{-1} , respectivamente para un gran número de sitios en la superficie terrestre (Altamimi et al., 2016). Las soluciones ITRF se construyen a partir del procesamiento de observables de las cuatro técnicas: VLBI, GNSS, SLR y DORIS.

Desde el año 2005 los Parámetros de la Orientación de la Tierra (EOP) calculados por cada una de las técnicas mencionadas también se combinan en simultáneo con las coordenadas de las estaciones. Se denomina EOP al conjunto de 5 parámetros que nos permiten estudiar integralmente la orientación de nuestro planeta, esto es, tanto desde el sistema de referencia celeste como desde el sistema terrestre. Los EOP son esenciales para vincular mediciones en la superficie de la Tierra con objetivos en el espacio como tradicionalmente opera la astronomía, pero también son necesarios para vincular fuentes en el espacio con receptores en Tierra (por ejemplo, funcionamiento de los GNSS).

Para las aplicaciones, nuevamente la astrometría estará involucrada no sólo desde el ICRF, sino también proveyendo los EOP que permiten transformar posiciones entre los marcos de referencia terrestre y celeste. Si bien ya vimos que cada técnica de observación es capaz de calcular sus propios valores EOP, tales valores estarán afectados por errores sistemáticos propios de la técnica y será entonces necesario una combinación estadísticamente óptima de los valores EOP multi técnica (Bizouard et al., 2019). Una vez hallados estos valores[§] nos aseguramos la correcta reducción de las observaciones de cualquier objetivo en el sistema celeste realizadas con cualquier instrumento sobre la superficie de nuestro planeta.

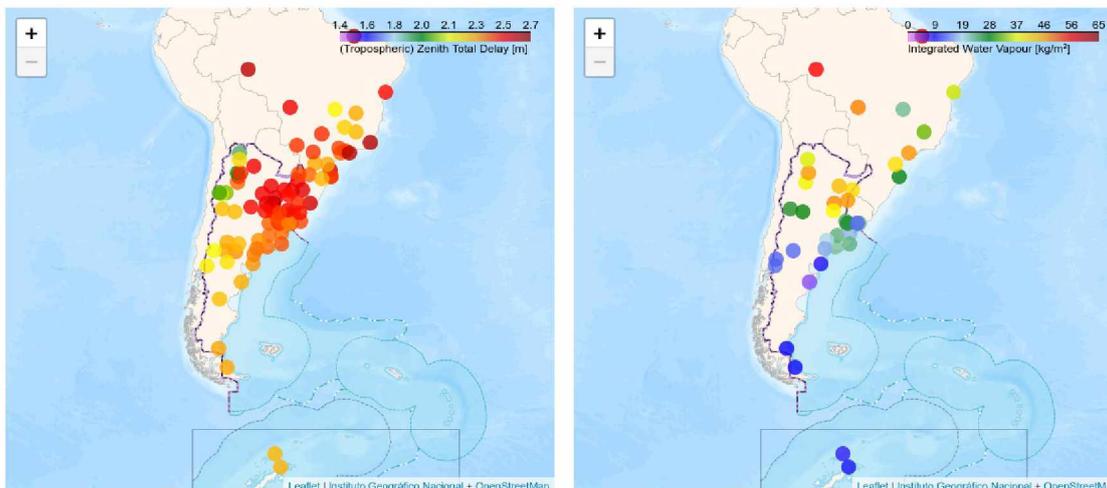
De este modo, si conocemos las posiciones (y/o velocidades) en el sistema de referencia terrestre (ITRF) para los puntos de un área de interés, conociendo los EOP, el abanico de aplicaciones a las geociencias de los observables desde las técnicas de la geodesia espacial es muy vasto. A continuación, y como ejemplo de lo anterior, presentaremos los resultados de algunas aplicaciones de los GNSS en estudios de geodinámica. A partir del monitoreo del cambio en el tiempo de las posiciones a los receptores GNSS se pueden estudiar movimientos de placas tectónicas y terremotos, vigilar actividad volcánica, estudiar mareas, cargas oceánicas y atmosféricas entre otros procesos internos y externos de nuestro planeta. La interpretación de tales fenómenos son competencia e interés de geofísicos y geólogos principalmente.

Como ejemplos de lo anterior pueden mencionarse a la respuesta de la tierra sólida a los cambios de las masas de hielo patagónicos (Richter et al., 2019), o cálculos

[§]Disponible en: <https://hpiers.obspm.fr/eop-pc/>



Near-Real-Time GNSS Tropospheric ZTD & IWV monitoring in South America by MAGGIA



Last update @ 2023-02-14 13:50 UTC; ZTD @ 86 sites; IWV @ 40 sites; ZTD/IWV latency between 1.8 and 4.8 hours; Run by J. M. Aragón Paz; Operational and open access ZTD/IWV data repository [here](#) (registration required); GNSS products by [CODE](#) (ultra rapid, Germany & Switzerland); Software: [BNC](#) & [Bernese GNSS Software](#); GNSS data providers: [BKG](#) (Germany), [IRGE](#) (Brazil), [IGM](#) (Uruguay), [IGN](#) (Argentina), [NASA](#) (USA), [SMN](#) (Argentina).

Figura 4: Imagen de una captura de pantalla del 14 febrero de 2023 mostrando los mapas horarios de retraso cenital total (ZTD, mapa de la izquierda) y vapor de agua integrado (IWV, mapa a la derecha).

de la deformación observada mediante GNSS durante el desagüe de los Brazos Rico y Sur del Lago Argentino por la ruptura del glaciar Perito Moreno en abril 2016 (Marderwald, 2020).

4.1. Variaciones a los parámetros de la rotación terrestre

Sabemos que el estudio de la dinámica terrestre exige aplicar la conservación del momento angular. Cuando planteamos este principio desde un sistema de referencia inercial (celeste), podemos analizar los conocidos efectos de la precesión y la nutación terrestre. Matemáticamente, este cambio de orientación del eje de rotación terrestre en el espacio lo podemos parametrizar con dos de los cinco EOPs[¶]: $d\psi$ y $d\epsilon$ según los modelos clásicos de precesión y nutación (Lieske et al., 1977; Seidelmann, 1982); dX , dY en términos de las Convenciones IERS 2010 (Luzum & Petit, 2012).

Sin embargo, al plantear las ecuaciones de conservación del momento angular para un sistema rotante (terrestre) se obtiene el sistema de ecuaciones de Euler-Liouville en términos de la velocidad angular de rotación (Ω) y el tensor de inercia del planeta (\mathbf{I}), entre otras variables. El cambio de dirección y módulo de Ω en el sistema rotante define los tres EOP restantes y caracteriza los efectos conocidos como movimiento del polo (x_p, y_p) y cambios a la longitud del día (ΔLOD , Length-Of-Day). A este sub-conjunto de parámetros también se lo conoce como Parámetros de la Rotación Terrestre

[¶]CPO: Celestial Pole Offsets.

(ERP, Earth Rotation Parameters). Recordemos que en ausencia de las fuentes de perturbación geofísica a \mathbf{I} y a Ω el problema se reducirá a una rotación libre de Euler, que suponiendo una Tierra rígida, tiene un periodo aproximado de 305 días sidéreos.

Pero la Tierra no es rígida, sino que posee atmósfera y océanos, un núcleo fluido, una corteza y un manto sólidos pero deformables. La solución de las ecuaciones de Euler-Liouville queda expresada entonces en términos de las funciones de excitación, que vinculan los cambios en las componentes del tensor de inercia del planeta ($\Delta \mathbf{I}$, términos de masa) y los momentos angulares relativos (términos de movimiento) provocados por una dada fuente de excitación (atmósfera, océano, aguas continentales, etc.) con las variaciones astrométricamente observadas (x_p, y_p y ΔLOD).

Hoy en día son muchas las causas que a lo largo del tiempo se han identificado como responsables de las variaciones a los ERP en diferentes frecuencias. Numerosos estudios se han llevado a cabo desde las publicaciones pioneras de Wahr (1982, 1983) y Barnes et al. (1983). Uno de los ejemplos mas conocidos fue el descubrimiento de la influencia sobre la rotación terrestre de un fenómeno regional a gran escala que afecta tanto a la atmósfera como a los océanos: El Niño-la Oscilación Austral (ENSO, El Niño-Southern Oscillation). Los trabajos de Eubanks et al. (1986) y Chao (1989) fueron los primeros en evidenciar los notables cambios en el módulo de Ω (y por lo tanto en ΔLOD), motivados por unos de los eventos ENSO (1983) más intensos. Además se mostró que la oscilación estratosférica casi bienal (QBO, Quasi-Biennial Oscillation) se acoplaba

a la perturbación causada por ENSO y contribuía a la excitación observada.

Sin embargo, aún no se ha logrado identificar el origen de la excitación a todas y cada una de las variaciones detectadas en los ERP. Es por ello que planteo, entonces, una inquietud que podría motivar futuras aplicaciones del tema. Actualmente la acción antropogénica está causando evidentes desbalances sobre algunos ciclos naturales en nuestro planeta. Entre ellos el cambio climático provoca un incremento de las temperaturas medias. Se han reportado evidencias de una pérdida anormal de masas de hielo glaciares y polares que, de sostenerse en el tiempo, provocarían un aumento en el nivel medio de los mares (Golledge et al., 2019; Pattyn et al., 2018). Si bien las influencias de tales eventos aun no provocan cambios evidentes ni fácilmente discernibles en la dinámica de la rotación, será una tarea a futuro monitorear las consecuencias de estos cambios en el tiempo.

5. Discusión

El rol interdisciplinar de la astrometría actual también está claramente reflejado en los organismos y asociaciones internacionales de profesionales.

Ya hemos repasado el rol del estudio de las variaciones a los EOP dentro de la astrometría. En ese mismo sentido, es importante remarcar que la Comisión A2 de la IAU (“Rotación de la Tierra”), remarca en su descripción ... “La rotación de la Tierra es un tema interdisciplinario que tiende puentes entre la astronomía y la geodesia...el análisis de las variaciones de rotación de la Tierra proporciona información importante sobre las interacciones entre los distintos componentes del sistema terrestre y los fenómenos de cambio global.” También se enfatiza entre sus objetivos: brindar el nexo entre la comunidad astronómica y las representaciones internacionales encargadas de la materialización de los sistemas de referencia celeste (Centros ICRS), terrestre (Centro ITRS), el IERS (International Earth Rotation and Reference System Service) y cada una de las asociaciones y servicios internacionales con competencia en las técnicas de observación aquí mencionadas: IVS por VLBI, IGS por GNSS, ILRS por SLR e IDS por DORIS.

Este mismo concepto se repite en los objetivos de la Comisión C3 de la IAG (International Association of Geodesy), una de las asociaciones que conforma la IUGG (International Union of Geodesy and Geophysics), que enfatiza: ... “la cooperación y colaboración en teoría, modelado y observación de la rotación terrestre y la geodinámica”. El resumen de los posibles trabajos interdisciplinarios en el tópico lo representa la creación en 2019 de la ICCC (Inter-Commission Committee on geodesy for Climate research) que pertenece a la IAG.

Agradecimientos: Quisiera agradecer al Comité Organizador

Científico de la 64a Reunión anual de la Asociación Argentina de Astronomía por invitarme a presentar esta charla. La Fig. 1 fue creada con Canva, el fondo de la Fig. 1 es una imagen gratuita de <https://www.vecteezy.com/free-photos>. La imagen gratuita del planeta tierra usada en la Fig. 3 pertenece a <https://www.vecteezy.com/free-vector/planet-earth>.

Referencias

- Altamimi Z., et al., 2016, JGR: Solid Earth, 121, 6109
 Aragón Paz J.M., 2020, *Estimación de parámetros troposféricos en tiempo casi real para Sudamérica mediante técnicas GNSS*, Ph.D. thesis, Universidad Nacional de La Plata
 Aragón Paz J.M., Mendoza L.P., Fernández L.I., 2023, GPS Solut en prensa
 Arias E.F., et al., 1995, A&A, 303, 604
 Barnes R., et al., 1983, P Roy Soc Lond A Mat, 387, 31
 Bevis M., et al., 1992, JGR: Atmospheres, 97, 15787
 Bianchi C.E., et al., 2016, AnnGeo, 34, 623
 Bizouard C., et al., 2019, J Geodesy, 93, 621
 Chao B.F., 1989, Science, 243, 923
 Charlot P., et al., 2020, A&A, 644, A159
 de Asúa M., 2009, *Historia de la Astronomía en Argentina*, 1–19, 2, AAA Book Series
 Eubanks T., Steppe J., Dickey J., 1986, *The El-Nino, the Southern Oscillation and the earth rotation*, 163–186, Springer
 Fernández L., et al., 2010, ASR, 46, 879
 Fernández L.I., et al., 2019, Fire Ecol, 15, 1
 Gaia Collaboration, et al., 2016, A&A, 595, A2
 Golledge N.R., et al., 2019, Nature, 566, 65
 Hockey T., et al., 2014, *The biographical encyclopedia of astronomers*, Springer
 Lieske J., et al., 1977, A&A, 58, 1
 Lindegren, et al., 2021, A&A, 649, A2
 López C.E., 2009, 187–216
 Luzum B., Petit G., 2012, IAU Colloq, 10, 227
 Ma C., Feissel M., 1997, *IERS Technical Note*, 23, Observatoire de Paris
 Marderdwald E.R., 2020, *Modelado de efectos de carga en la Patagonia austral*, Ph.D. thesis, Universidad Nacional de La Plata
 Mendoza L.P.O., Meza A.M., Aragón Paz J.M., 2019, Space Weather, 17, 654
 Paolantonio S., Minniti E., 2009, *Historia del Observatorio Astronómico de Córdoba*, 51–167, 2, AAA Book Series
 Pattyn F., et al., 2018, Nat Clim Change, 8, 1053
 Perdomo R.A., 2009, *El Observatorio Astronómico de La Plata*, 169–186, 2, AAA Book Series
 Perez Bello D., Natali M.P., Meza A., 2019, Neural Comput., 31, 8411
 Perryman M., 2009, *Astronomical applications of astrometry: ten years of exploitation of the Hipparcos satellite data*, Cambridge University Press
 Richter A., et al., 2019, Remote Sens, 11, 909
 Schuh H., Böhm J., 2013, *Very Long Baseline Interferometry for Geodesy and Astrometry*, 339–376, Springer
 Seidelmann P., 1982, Celestial Mech, 27, 79
 Van Leeuwen F., 2007, A&A, 474, 653
 Wahr J.M., 1982, GJI, 70, 349
 Wahr J.M., 1983, GJI, 74, 451
 Zacharias N., 2006, IERS Tech Note, 34, 73