



Sistema de Referencia Geocéntrico para las Américas (SIRGAS)

Agenda de investigación – Abril de 2014

1. Planteo del problema

La cantidad y la variedad de información geoespacial capturada remotamente mediante sensores pasivos (cámaras) o activos (radares) a bordo de satélites artificiales se han incrementado sostenidamente a lo largo de los últimos veinte años y todas las previsiones sugieren que esa tendencia se mantendrá en las décadas venideras. Los sensores remotos se usan para recabar información detallada y actualizada sobre procesos que pueden deberse tanto a la acción del hombre (urbanizaciones, obras de infraestructura, explotación de recursos naturales, etc.), como a la de la naturaleza (movimientos de la corteza terrestre, variaciones del nivel del mar, presencia de vapor de agua disuelto en la atmósfera, etc.).

El desarrollo social y económico implica una variedad de acciones humanas que modifican severamente el entorno natural (urbanizaciones, vías de comunicación, agricultura, explotación forestal, ductos diversos, etc.). El resultado de tales acciones debe ser registrado con fines jurídicos y fiscales y a los efectos de planificar el desarrollo y administrar los recursos disponibles.

Muchos procesos naturales condicionan el desarrollo y la sostenibilidad social, en algunos casos de una manera muy drástica engendrando desastres de gran magnitud (terremotos, erupciones volcánicas, inundaciones, sequías, huracanes, etc.). Para prevenir esos desastres y mitigar sus consecuencias es necesario entender los mecanismos que los desencadena y, para ello, es necesario capturar información sobre las variables que los gobiernan.

La frontera que separa los procesos de origen natural de los inducidos por el hombre no es una línea delgada y nítida, sino una franja ancha y difusa, dentro de la cual resulta difícil cuantificar que fracción del efecto resultante se debe a un agente o al otro. Las evidencias disponibles apuntalan la hipótesis que las actividades humanas de gran escala modifican significativamente la dinámica de los procesos naturales, pero se requiere todavía mucho trabajo para cuantificar el impacto antrópico de una manera conclusiva. Dicho trabajo solo puede basarse en información confiable y sostenida en el tiempo de las principales variables dinámicas de los procesos que se intenta entender.

Tradicionalmente, las geociencias han dividido al planeta en diferentes 'esferas' con el fin de facilitar su estudio (geosfera, hidrosfera, atmósfera, criosfera y biosfera). Actualmente se acepta que esas esferas interactúan entre sí de una manera tan compleja que no es posible entender la dinámica del conjunto si las componentes se estudian aisladamente. La tendencia actual se orienta a conceptualizar al 'Sistema Tierra' como conjunto de subsistemas complejos, cuyo estudio se complejiza aún más al considerar los procesos de acoplamiento que los vinculan entre sí. El estudio de ese sistema complejo solo es posible sobre la base de información con atributos de: i) precisión para cuantificar la incertidumbre intrínseca de cada fuente de datos; ii) exactitud para permitir la comparación y combinación de datos provenientes de diferentes fuentes; iii) localización espacial y



SISTEMA DE REFERENCIA GEOCÉNTRICO PARA LAS AMÉRICAS

Subcomisión 1.3b de la Asociación Internacional de Geodesia (IAG)

Proyecto de la Comisión de Cartografía del Instituto Panamericano de Geografía e Historia (IPGH)

temporal para poder correlacionar los procesos que se intentan estudiar; iv) globalidad para poder entender al Sistema Tierra integralmente; y v) continuidad en el tiempo para identificar los diferentes rangos espectrales con que cambia el planeta.

Recapitulando:

- la cantidad y diversidad de información espacial capturada mediante satélites dedicados a la observación de la Tierra crece a ritmo sostenido;
- la sociedad depende cada vez más de esa información para:
 - conformar las infraestructuras de datos espaciales sobre las que se asientan tanto la seguridad jurídica de los bienes y la base fiscal de los Estados, como la planificación y administración del desarrollo social y económico; y
 - comprender y desarrollar estrategias de convivencia con los procesos de cambio que experimenta el planeta, sean estos debidos a la acción de la naturaleza o del hombre o la combinación de ambas;
- los principales atributos de la información espacial capturada con satélites artificiales dependen –en muchos casos drásticamente– de la localización espaciotemporal del satélite que la captura (conocimiento de la órbita del satélite) y de las características de la misma información capturada (georreferenciada).

La tendencia que se ha sostenido a lo largo de la última década convirtió a los sistemas globales de navegación apoyados en satélites (en inglés GNSS) en la principal herramienta para determinar el tiempo, T , y las tres coordenadas geométricas (rectangulares, $[X(T), Y(T), Z(T)]$ o equivalentemente coordenadas elipsoidales latitud, longitud y altura $[\phi(T), \lambda(T), h(T)]$), ya sean de un satélite orbitando la Tierra, ya del vértice de una parcela en el terreno. No hay indicios de que esa tendencia vaya a modificarse en el futuro mediano; más bien al contrario, se prevé un incremento en la cantidad y en la variedad de aplicaciones de los GNSS.

Muchos problemas que involucran al campo de gravedad de la Tierra no pueden abordarse usando la altura elipsoidal, $h(T)$, porque no permite calcular el trabajo necesario para mover un cuerpo (por ejemplo, un volumen de agua) entre dos puntos de altura elipsoidal conocida. Para calcular ese trabajo se requiere conocer la diferencia de potencial gravitatorio entre ambos puntos y esa diferencia se cuantifica usando la altura física, $H(T)$, que difiere, en general, de la elipsoidal, $h(T)$ hasta ± 100 m a nivel global. La técnica clásica de la ‘nivelación geodésica’ continúa siendo irremplazable para determinar alturas físicas confiables. La tendencia actual es reemplazarla por la técnica GNSS complementada con un modelo de geoide, lo cual resultará factible, en el mediano plazo, para muchas pero no para todas las aplicaciones prácticas. Una contribución fundamental a la factibilidad de esa idea proviene de una clase especial de satélites de observación de la Tierra –los gravimétricos– que están realizando un aporte decisivo al mejoramiento del modelo de geoide.

La noción de localización espaciotemporal conlleva inevitablemente a la de sistema de coordenadas, pues no es posible imaginar una coordenada que no esté unívocamente asociada con



SISTEMA DE REFERENCIA GEOCÉNTRICO PARA LAS AMÉRICAS

Subcomisión 1.3b de la Asociación Internacional de Geodesia (IAG)

Proyecto de la Comisión de Cartografía del Instituto Panamericano de Geografía e Historia (IPGH)

un sistema. Y la noción de sistema de referencia conlleva inevitablemente a la de marco de referencia, que es la materialización práctica del sistema de referencia. Si el sistema es imprescindible para desarrollar el marco teóricoconceptual en el que se puede entender un problema, el marco lo es para realizar las mediciones que permiten estudiarlo. Es así como las geociencias y las geoingenierías necesitan de sistemas y marcos de referencia a los que se puedan vincular las coordenadas de localización espaciotemporal, es decir las coordenadas geométricas $[X(T), Y(T), Z(T)]$ o $[\phi(T), \lambda(T), h(T)]$, la altura física, $H(T)$ y el tiempo T para el cual ellas son válidas.

SIRGAS se ocupa de proporcionar los marcos de referencia para las coordenadas geométrica y para la altura física, en la región de América Latina y el Caribe. Tales marcos de referencia deben ser consistentes a escala planetaria, porque la información espacial derivada de satélites es, por naturaleza, global y no puede localizarse en un marco de referencia regional o nacional sin deteriorar sus atributos. Igualmente, ellos deben servir tanto al desarrollo de las infraestructuras de datos espaciales, cuanto al estudio de los procesos geodinámicos y de cambio global que experimenta el Sistema Tierra y de los fenómenos naturales que engendran desastres naturales. Las infraestructuras de datos espaciales no demandan precisiones ni exactitudes extremas en la materialización del marco de referencia, pero sí demandan seguridad jurídica y posibilidades de acceso confiable mediante procedimientos simples y económicos. Los estudios orientados a comprender la geodinámica y el cambio global y a prevenir las consecuencias de los desastres naturales demandan precisiones y exactitudes extremas, en el rango de muy pocos milímetros, para la determinación de la coordenadas geométricas y física. Y demandan también que esos atributos se mantengan inalterables a lo largo del tiempo, para garantizar que las señales de cambio que se trata de medir sean efectivamente causadas por cambios del Sistema Tierra y no por inestabilidades del marco de referencia.

2. Problemas abiertos a la investigación

2.1 Mantenimiento de alta precisión del marco de referencia

Uno de los mayores desafíos que enfrenta SIRGAS (y en general la Geodesia) es el mantenimiento del marco de referencia, esto es: lograr que la precisión y la exactitud del marco de referencia sean homogéneas geográficamente (la misma calidad en cualquier parte) y que se mantengan inalterables con el paso del tiempo (la misma calidad en cualquier momento). Para ello, es necesario determinar el cambio que sufren las posiciones de las estaciones de referencia como consecuencia de una multiplicidad de procesos geofísicos. Muchos de esos procesos se desarrollan con cierta regularidad, por ejemplo: la deriva continental, deformaciones de la corteza terrestre en las regiones tectónicamente activas, ajustes isostáticos, respuesta de la corteza terrestre a las fuerzas de marea y a las cargas hidrológica y atmosférica, etc.; otros son episódicos y, en general, abruptos, por ejemplo: los terremotos y las erupciones volcánicas.

El estado del arte en lo concerniente al mantenimiento del marco de referencia terrestre consiste en asumir que el cambio que experimentan las posiciones de los puntos de referencia como consecuencia de todos esos procesos es lineal en el tiempo, esto es: que los puntos de referencia se



mueven con una velocidad constante. Esa hipótesis de trabajo se ha vuelto inconsistente con la precisión actual de las mediciones geodésicas, que ponen en evidencia variaciones no lineales en muchas estaciones de referencia, originadas por la respuesta elástica (o casi elástica) de la corteza terrestre a la carga variable que ejercen sobre ella la hidrósfera y la atmósfera. Pero más dramático aún que esas variaciones no lineales, son las episódicas que se producen abruptamente con los movimientos sísmicos de gran intensidad y/o cercanos a la superficie de la Tierra. Tales fenómenos originan no solo un cambio de magnitud considerable en las posiciones de las estaciones de referencia, sino también en sus velocidades, que tardan años en estabilizarse en un valor constante, similar al que tenían antes del sismo.

No existe en la actualidad un criterio unificado en cuanto al modo en que la Geodesia debe afrontar el mantenimiento preciso del marco de referencia terrestre. Este problema forma parte de la agenda de investigación de SIRGAS, donde se lo viene abordando desde dos perspectivas complementarias: una de plazo más inmediato (tres a cinco años) consiste en utilizar la infraestructura observacional existente en la región de SIRGAS para modelar los movimientos no lineales; y otra de más largo aliento (cinco a diez años) se apoya en expandir la infraestructura observacional de la región agregando otras técnicas geodésicas diferentes de los GNSS y calcular marcos de referencias por época (por ejemplo, uno por mes).

2.2 Disponibilidad en tiempo real del marco de referencia

La georreferenciación de la información espacial que conforma las infraestructuras de datos espaciales de los países de la región se realiza mayormente con GNSS. La tendencia actual se orienta a reducir los costos del proceso de georreferenciación y simplificarlo al punto de tornarlo casi ‘invisible’ para muchos productores de información espacial. Las técnicas usadas con ese fin se basa principalmente en aprovechar la conectividad vía Internet entre las estaciones de referencia y el agente que captura la información espacial, para que este pueda lograr la georreferenciación de la información capturada en el mismo momento que la está capturando (en ‘tiempo real’) y realizando un mínimo de procedimientos sencillos. La implementación de estas técnicas de tiempo real también forma parte de la agenda de investigación de largo aliento de SIRGAS.

2.3 Establecimiento del marco de referencia vertical asociado al campo de gravedad terrestre

Otro desafío mayor que enfrenta la geodesia en general, y SIRGAS en particular, es el establecimiento (y en el futuro el mantenimiento) de un marco de referencia vertical para la altura física, $H(T)$. Esta tarea implica una variedad de acciones de largo aliento (diez años), que han alcanzado un desarrollo variable en los países miembros de SIRGAS, pero que, en todos los casos, es insuficiente. Estas actividades abarcan: i) el establecimiento de un potencial gravitatorio de referencia de validez global y universalmente aceptado; ii) la materialización de ese nivel en los diferentes países de la región mediante la combinación de mediciones del nivel del mar realizadas con mareógrafos en las costas continentales y satélites de altimetría oceánica en mar abierto; iii) la vinculación de las redes gravimétricas y de nivelación de primer orden de todos los países de la región y de estas con los mareógrafos de referencia y con los puntos fundamentales de SIRGAS; y el ajuste continental de todas esas redes.



2.4 Estudios geodésicos de fenómenos geofísicos.

2.4.1 Contribuciones al estudio de la atmósfera

Para la materialización y el mantenimiento del marco de referencia, SIRGAS se vale de una red de estaciones GNSS de medición continua distribuida en todo el continente. Las señales GNSS son ondas electromagnéticas que atraviesan la atmósfera del mismo modo que los rayos de un tomógrafo atraviesan los órganos de un paciente que se somete a un estudio tomográfico. La analogía es tan valedera que las técnicas tomográficas de la medicina no difieren conceptualmente de las que se han desarrollado en el ámbito de la Geodesia para extraer de las mediciones GNSS información sobre diferentes variables de la atmósfera.

Los planes de investigación de SIRGAS incluyen el uso de las mediciones GNSS para realizar mapas espaciotemporales de la distribución del vapor de agua y de los electrones libres en la atmósfera terrestre. El vapor de agua se halla disuelto en la capa más bajas de la atmósfera (la troposfera) y es el principal gas del efecto invernadero. Es también una variable crítica de los modelos meteorológicos empleados para los pronósticos sinópticos, de allí la importancia de mapear su dinámica en todo el continente. Los electrones libres forman la región más alta de la atmósfera (la ionosfera) y su influencia es determinante para las tecnologías de navegación apoyada en satélites, comunicación por ondas de radio y radares a bordo de satélites o terrestre por sobre el horizonte.

2.4.2 Contribuciones al estudio del nivel del mar

Un efecto mensurable del calentamiento global es el aumento del nivel medio del mar causado por la expansión termal de los océanos y el derretimiento de las grandes masas glaciares. La medición del nivel medio del mar se lleva a cabo con dos técnicas complementarias: los satélites de altimetría oceánica (radares), que tienen la ventaja de medir sobre todo la superficie oceánica del planeta y la desventajas de que sus series de datos son relativamente cortas (veinte años); y los mareógrafos, que tienen la ventaja de que contar con largas series de datos (centurias) y la desventaja de medir en locaciones puntuales sobre las costas continentales o insulares. Como los mareógrafos están fijos a la corteza de la Tierra, sus registros muestran las variaciones del nivel del mar acopladas con los movimientos verticales de la corteza terrestre en el sitio de emplazamiento del mareógrafo. Para obtener la variación del nivel del mar es necesario determinar los movimientos verticales de la corteza, tarea que forma parte de los planes de investigación de SIRGAS.