



## Colombia hacia un nuevo Sistema Vertical de Referencia

### *Colombia towards a new Vertical Reference System*

Anderson Leal Vélez<sup>a</sup>, Diego Armando Cortés<sup>b</sup>, Juan Sebastián Sánchez Cárdenas<sup>c</sup>  
Francisco Javier Sarmiento<sup>d</sup>, Francisco Javier Mora<sup>e</sup>, Ivan Dario Mora Urquiza<sup>f</sup>,  
Jonnathan Haider Fandiño Bohórquez<sup>g</sup>, Juan Sebastián Sánchez Cárdenas<sup>h</sup>, Leidy  
Johanna Moises Sepúlveda<sup>i</sup>, Lina Maria Barrera Avellaneda<sup>j</sup>, Luis Eduardo Gómez Daza<sup>k</sup>,  
Nancy Paola Gutierrez Rueda<sup>l</sup>, Natalia Carolina Sánchez Torres<sup>m</sup>, Ricardo Guevara Lima<sup>n</sup>,  
Samuel Andres Perez Castiblanco<sup>o</sup>, Sandra Milena Gonzalez Giraldo<sup>p</sup>, Santiago Venegas<sup>q</sup>.

Innovaciones en el desarrollo tecnológico y aplicaciones de observación de  
la tierra para el ordenamiento territorial.

Colombia hacia un nuevo Sistema Vertical de Referencia

### Resumen

La asamblea general de la Naciones Unidas publicó en febrero de 2015 la resolución 69/266 que promueve el Marco de referencia geodésico mundial para el desarrollo sostenible. La Asociación Internacional de Geodesia, IAG (por sus siglas en inglés), emite la resolución el 1 de julio de 2015, en la que se describe las características para la definición y realización de un Sistema Internacional de Referencia de Alturas (IHRs), promoviendo la mejora y la compatibilidad de los sistemas espaciales de navegación y de determinación de la posición, incluidos los Sistemas Mundiales de Navegación por Satélite (GNSS) y el acceso universal a estos.

De esta manera Colombia, bajo la dirección del Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC), como organismo rector de la geodesia en el país, específicamente desde el Grupo Interno de Trabajo (GIT) Geodesia, concentra sus esfuerzos actuales en mejorar y ajustar las redes de nivelación, las redes de gravedad y las redes de posicionamiento, con el objetivo de mejorar su sistema vertical. Las tareas asociadas al mejoramiento consisten en otorgar cierre a los circuitos que componen las diferentes redes de medición actuales, aplicar un ajuste en bloque, conectar las tres diferentes redes de medición, realizar el cálculo de números geopotenciales y alturas físicas asociadas. La determinación de un modelo geoidal nacional actualizado con mayor precisión es necesario para la definición de un nuevo sistema vertical de referencia nacional. Este permite definir parámetros locales que facultan la conexión entre sistemas verticales de países vecinos y su implementación al IHRs e IHRF.

**Palabras clave:** Modelo Geoidal, Sistema Vertical de Referencia, Cuasi-Geoide, IHRs.

i. Ingeniera en Catastral y Geodesta leidyjohanna.moises@igac.gov.co





## Abstract

*The General Assembly of the United Nations, in February 2015, issued the resolution 69/266, which promotes the Global Geodetic Reference Framework for Sustainable Development. The International Association of Geodesy (IAG) issued the resolution #1 on July of 2015 describing the characteristics for the definition and realization of an International Heading Reference System (IHRs), promoting the improvement and compatibility of Space Systems Navigation and the determination of the positioning, including Global Navigation Satellite Systems (GNSS), and universal access to them.*

*In this way Colombia, with the direction of the Geographic Institute Agustín Codazzi (IGAC) as guiding agency of geodesy in the country, the Internal Group of Work (GIT) in Geodesy, concentrates its current efforts in improving and adjusting leveling networks, gravity nets and positioning networks, aiming to improve its vertical system. The tasks associated with the improvement consist in granting closure to the circuits that compose the different current measurement networks, apply an adjustment in block, connect the three different measurement networks, perform the calculation of geopotential numbers and associated physical heights.*

*The determination of an updated national geoid model with greater precision is necessary for the definition of a new national vertical reference system, which allows to define local parameters that enable the connection between vertical systems of neighbour countries and their implementation to IHRs and IHRF.*

**Keywords:** Geoid Model, Vertical Reference System, Quasi-Geoid, IHRs.





## Introducción

La IAG estableció el Sistema Global de Observación Geodésica, GGOS, como uno de los componentes que integra las diversas contribuciones geodésicas, para consolidar la cuantificación de los cambios en el espacio y el tiempo de nuestro planeta. El sistema cuenta con la precisión y fiabilidad que se requiere para obtener datos de buena calidad.

La Asamblea General de las Naciones Unidas adoptó la resolución de un Marco de Referencia Geodésico Global para el Desarrollo Sostenible (A/RES/69/266) en Febrero 26, 2015, donde invita a los estados miembros a comprometerse a mejorar la infraestructura geodésica nacional como un medio esencial para mejorar el marco de referencia geodésico mundial

Para la realización de esto se requiere hacer actividades de mantenimiento y mejora continua de las redes geodésicas, el análisis combinado de las mediciones geométricas y gravimétricas, utilizando también diferentes técnicas geodésicas terrestres y espaciales. En este contexto, **Global Geodetic Reference Frame** (GGRF) desempeña un papel clave, facilitando la integración de las diferentes observaciones geométricas y gravimétricas, con el objetivo de proporcionar productos y servicios geodésicos confiables y de alta calidad, incluyendo los cambios a través del tiempo.

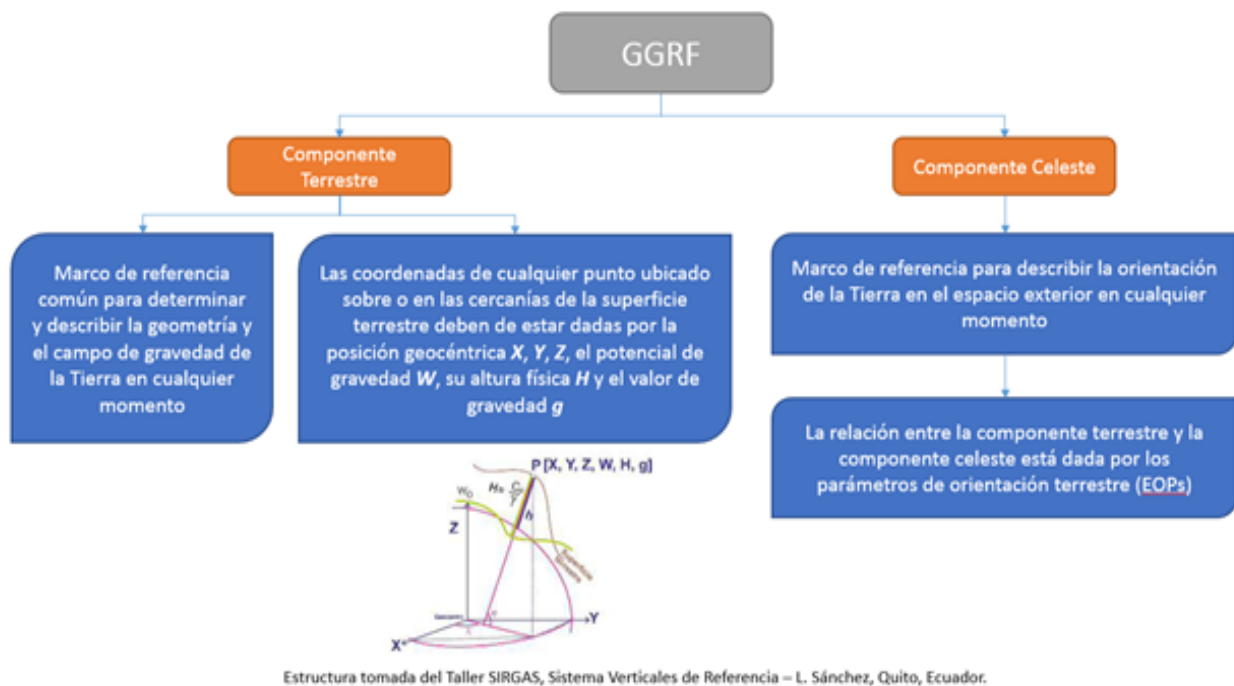
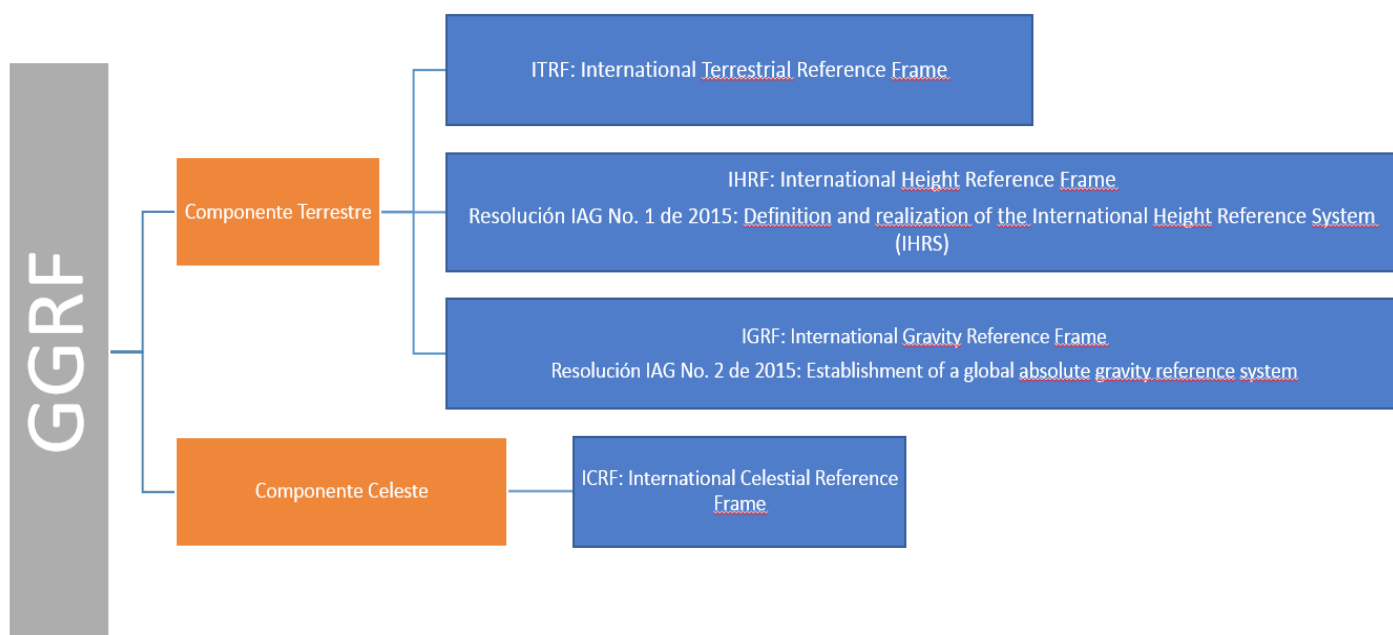


Figura 1. Estructura del GGRF

Fuente: IGAC





Estructura tomada del Taller SIRGAS, Sistema Verticales de Referencia – L. Sánchez, Quito, Ecuador.

**Figura 2.** Instalación paneles solares Estación continua Fúneque  
Fuente: IGAC

En el Instituto Geográfico Agustín Codazzi, IGAC, el Grupo GIT-Geodesia ha enfocado sus esfuerzos en el levantamiento de información geodésica por todo el territorio nacional. Esto comprende los levantamientos de nivelación, GNSS, valores de gravedad y mantenimiento de la Red MAGNA – ECO, para actualizar y densificar la Red Geodésica Nacional. Teniendo en cuenta la importancia del desarrollo sostenible para Colombia, es importante participar activamente en la implementación, actualización y mejora continua de los procesos geodésicos, para proporcionar información en la implementación, definición y estructura del Sistema Internacional de Referencia de Alturas (IHRF: *International Height Reference System*), y así mismo definir un nuevo Sistema Vertical de Referencia para Colombia, que sea físico y para que permita combinar las técnicas GNSS adecuadamente, para optimizar los recursos económicos, tiempo y obtener productos de alta precisión .

El Datum vertical clásico para Colombia está definido al nivel medio del mar en el mareógrafo de Buenaventura, el cual se asemejaría al geoide, entendido como una superficie equipotencial del campo de gravedad terrestre. Como es bien sabido, el mar presenta diferentes niveles que dependen de variaciones temporales y de la posición geográfica, lo que indica que la topografía dinámica del océano varía entre -2 m +2 m, lo que genera diferencias de nivel en varios metros. Pero dichas variaciones no son iguales en todos los lugares del mar.

Esto implica que el nivel medio del mar registrado en los mareógrafos no siempre coincide con el geoide y las alturas asociadas a los mareógrafos no son compatibles entre sí, debido a que el nivel medio del mar registrado depende del periodo utilizado. La nivelación geodésica permite determinar el comportamiento de las superficies equipotenciales mediante los desniveles, que no son paralelos, y en consecuencia la determinación de alturas por medio de la nivelación geométrica se ve influenciada por el campo de gravedad terrestre.





En los cálculos realizados para la definición del datum vertical no se tuvo en cuenta el campo de gravedad terrestre ni los movimientos de la corteza terrestres, bajo la premisa de que estos eran errores sistemáticos. Esto implicaría que las alturas en Colombia no sean compatibles con proyectos internacionales y que las alturas no satisfacen lo suficiente la precisión de la ecuación:

$$h \approx H^o + N, h \approx H^N + N$$

Teniendo en cuenta lo mencionado anteriormente, las alturas existentes resultan ser arcaicas para la precisión que se obtienen actualmente con los sistemas de posicionamiento y navegación satelital.

El IGAC tiene como objetivo determinar el W0 local para el territorio nacional y así mismo establecer estaciones que sean vinculadas al IHRF con coordenadas primarias X (coordenadas X,Y,Z), W (potencial del campo de gravedad de la Tierra), H (Altura física) y el vector de gravedad  $g$ . El Sistema Vertical moderno permite la combinación exacta de datos geométricos verticales con datos físicos (alturas físicas); y la combinación con modelos geoidales. Así se garantiza la compatibilidad entre alturas físicas existentes en cualquier país, ya que todas estarían referidas a la misma superficie de referencia.

## Desarrollo teórico y metodológico

Las actividades a desarrollar en Colombia para la vinculación del IHRF – IHRS son las siguientes:

- Establecer y seleccionar estaciones de referencia de operación continua que permita garantizar la perdurabilidad, estabilidad a largo plazo del marco de referencia y permita detectar posibles deformaciones del marco de referencia.
- Realizar la nivelación con equipos electro ópticos de las estaciones seleccionadas.
- Definir puntos gravimétricos que estarán distribuidos homogéneamente alrededor de las estaciones definidas para el IHRF, hasta una distancia de 210 km (2°).
- Densificar las redes regionales y locales para proveer accesibilidad al marco de referencia en cualquier lugar y en cualquier momento, teniendo en cuenta que en áreas montañosas se debe tener un promedio del 50 % de información adicional.
- Definir el nuevo modelo geoidal para el territorio nacional.
- Integrar los mareógrafos de referencia y las redes de nivelación.
- Determinar coordenadas GNSS para los puntos que se van a densificar.
- Determinar las coordenadas GNSS en el mareógrafo de Buenaventura.
- Realizar las respectivas conexiones de las redes verticales por medio de nivelación con los países cercanos.
- Calcular los circuitos de nivelación en términos de números geopotenciales.
- Definir el potencial para Colombia.
- Establecer estaciones de referencia del nuevo Global Absolute Gravity Reference System (Resolución IAG 2015 No. 2, Praga 2015).

## Actividades a realizar o en ejecución

### GNSS

- Actualización del Marco de Referencia de Colombia SIRGAS95 (ITRF94 época 1995.4).
- Como prioridad se requiere que las coordenadas de los puntos que tienen la componente de nivelación y gravimetría sean transformados al ITRF actual.





## Nivelación

- Digitalización de los desniveles medidos por las líneas de nivelación del territorio nacional. Dichos desniveles incluyen otros, de las líneas antiguas y de las líneas nuevas.
- Identificación de los puntos nodales de las líneas de nivelación (son los puntos que conectan diferentes líneas de nivelación).
- Correcciones de los desniveles (temperatura, ortométricos, si se requiere).
- Análisis de la precisión de los circuitos de nivelación.
- Creación de una base de datos para el manejo de los desniveles medidos por las líneas de nivelación. Esto con el fin de facilitar al usuario interno el uso de la base, ya que la nivelación no se ha realizado en orden geográfico.
- Al realizar la estandarización de la información, se requiere que se haga una evaluación de la información faltante por nivelar para que esta sea programada, y durante los próximos años se le dé prioridad al levantamiento de dicha información.

El resultado de este proceso es obtener los desniveles para que sean procesados con los datos de gravedad con el fin de obtener números geopotenciales.

## Gravimetría

- Digitalización de las lecturas instrumentales de las campañas anteriores al año 2008.
- Definición de los circuitos para realizar el cálculo de la información gravimétrica.
- Cálculo de la información gravimétrica de los años 2008-2017.
- Análisis de los resultados obtenidos del cálculo.
- Evaluación de la toma de información gravimétrica para los próximos años con base a los circuitos de nivelación.
- Definición de los cierres que están pendientes por realizar en el año 2017.

De acuerdo con lo mencionado anteriormente, esto es una de las principales actividades para la modernización del sistema vertical de referencia de Colombia. Por tal razón, y de acuerdo con los documentos consultados, se requiere determinar las tareas pendientes para geodesia en cuanto a la estrategia de trabajo para la determinación e implementación del IHRS/IHRF.

## Actividades futuras a ejecutar

### Mareógrafo

Vincular los mareógrafos de Colombia que estén actualmente en funcionamiento, para procurar un mejor ajuste del  $W_{oi}$ . Para esto se tendrán en cuenta estas tareas:

- Con levantamientos GPS sobre los mareógrafos calcular la tendencia del desplazamiento de la componente vertical de la corteza de la tierra. (GNSS)
- Calcular la tendencia del nivel del mar con los datos de registro histórico de los mareógrafos.
- Estimar la superficie del mar en las áreas aledañas al mareógrafo con datos de altimetría satelital.

Realizadas las tareas anteriores, se procede a realizar lo siguiente con los resultados obtenidos:





- Corregir los niveles medios del mar por movimientos verticales de la corteza, combinando los tres productos anteriores.
- Reducir el parámetro del Datum obtenido a la misma época de cuando el nivel cero fue realizado.

Para esta actividad son necesarios los siguientes datos:

- Registro de los datos históricos del mareógrafo de Buenaventura principalmente.
- Datos GNSS del punto del mareógrafo de Buenaventura CMB-10

### **Números Geopotenciales**

Las tareas pertinentes a este tema serían las siguientes:

- Determinar la metodología para el cambio de época de los números geopotenciales teniendo en cuenta su cambio en la componente vertical.
- Determinar los circuitos de ajuste de redes de nivelación y gravimetría, generando los nodos.
- Ajuste por bloque de la red de gravimetría.
- Cálculo de las correcciones a datos de nivelación (desniveles)
- Interpolación de datos de gravimetría.

### **Compensación de la Red (Altimétrica y Gravimétrica)**

La compensación de las redes gravimétricas incluye el estudio pertinente para determinar qué tipos de alturas físicas se deben calcular en Colombia. En este capítulo se requiere que sean evaluadas todas las metodologías para definir el tipo de alturas ortométricas que se utilizaran y se le proporcionaran al usuario tanto interno como externo.

### **Vinculación de altimetría y gravimetría con otros países**

La vinculación de las redes de nivelación y gravimetría son importantes para el desarrollo de las actividades propuestas por SIRGAS para la definición del IHRS. La actividad de Colombia consiste en realizar la conexión de las redes verticales y gravimétricas con los países de Panamá, Ecuador, Perú, Brasil y Venezuela. Esto hace a Colombia un país de gran relevancia, dado que, además, conecta hacia los países de Centro América.

Esta tarea implica analizar y evaluar las metodologías propuestas por otros países y, así mismo, generar propuestas técnicas para que el IGAC realice la vinculación con los países vecinos.

### **Ubicación de la Red de Estaciones GNSS de Operación Continua**

Las estaciones GNSS de rastreo continuo se encuentran ubicadas estratégicamente en el territorio nacional y sirven como base de referencia para los levantamientos diferenciales, ya que reciben información satelital en tiempo real.

La red de estaciones GNSS (Sistemas Globales de Navegación Satelital) de funcionamiento continuo MAGNA-ECO (Marco Geocéntrico Nacional de Referencia - Estaciones Continuas) forma parte de la Red SIRGAS, Sistema de Referencia Geocéntrico para las Américas, de funcionamiento continuo (SIRGAS-CON) con 44 estaciones GNSS que se encuentran registradas. A continuación se dan a conocer algunas imágenes de las nuevas actualizaciones de la Red MAGNA-ECO de las Estaciones GNSS de Operación Continua.





La instalación de los kits de Protección, Comunicación y Energía Solar, conformados por el Tablero Eléctrico de Control del Sistema Fotovoltaico y los Paneles Solares, se hace con el fin de optimizar el funcionamiento de las Estaciones que conforman la Red MAGNA-ECO, dejándolas totalmente autónomas y operativas para la transmisión de información en Tiempo Real.

Para los años subsiguientes, se continuará con la densificación de la Red MAGNA-ECO con cobertura Nacional, para optimizar el servicio, e implementar nuevos Sistemas de Transmisión de Información en Tiempo Real a Múltiples usuarios.



**Figura 3.** Instalación paneles solares  
Estación continua Fúquene  
Fuente: IGAC



**Figura 4.** Estación continua Fúquene  
Fuente: IGAC

Teniendo en cuenta los criterios para la implementación del Marco de Referencia Internacional de Alturas (IHRF) y Sistema Internacional de Referencia de Altura (IHRF) – IGRFG, las nuevas estaciones deben ser materializadas a nivel del piso, para dar cumplimiento a los anteriores criterios. Actualmente se está trabajando para materializar las Estaciones de Funcionamiento Continuo de la Red MAGNA-ECO, a nivel del suelo.



**Figura 5.** Modelo Estación continua Fúquene  
Fuente: Berkely Seismology Lab - California



A continuación se da a conocer uno de los modelos de monumentación para implementar la materialización a nivel del suelo:

### ***¿Qué aplicaciones presenta el GGRF y el IHRS/IHRF?***

Algunas de las aplicaciones consisten en:

- Dar soporte a la demanda creciente de posicionamiento, navegación, sincronización, cartografía y en el ámbito de las geociencias.
- El GGRF es esencial para la determinación de cambios en el sistema Terrestre.
- Ofrece información para mitigar desastres naturales.
- Monitorear los cambios del nivel del mar y del cambio climático.
- Provee información precisa para la toma de decisiones en cuanto al desarrollo sostenible.

## **Conclusiones**

La implementación de esta metodología permite que Colombia genere, de forma confiable y precisa, información para el intercambio de datos a nivel transcontinental.

Un Sistema Vertical moderno permite la combinación de alturas geométricas con alturas físicas, garantizando la compatibilidad de estas, en un marco global al ser referidas a una misma superficie de referencia.

La vinculación de estaciones continuas al IHRF/IHRS, permite monitorear la deformación del marco de referencia nacional.

La inclusión de Colombia al IHRF permite la participación activa en el desarrollo del GGRF.

A futuro permite generar un modelo de velocidades en su componente vertical por medio del estudio de alturas físicas.





## Bibliografía

- Heiskanen, W. A., y Moritz, H. (1967). *Physical Geodesy*. San Francisco, USA: Freeman and Company.
- Hofmann, B., y Moritz, W. (2005). *Physical Geodesy Second, corrected edition*. GRaz, Austria: SpringerWienNewYork.
- Martínez, W., y Sánchez, L. (2001). Improving the quasigeoid in Colombia. *IAG Symposia*, 124, pp. 152-156.
- Martínez, W., Sánchez, L., & Flórez, J. (1995). *Determinación de nuevas estaciones absolutas de gravedad en Colombia*.
- Sánchez, L. R. (2003). *Determinación de la superficie vertical de referencia para Colombia*. Dresden: Technische Universität Dresden.
- Sánchez, L., & Drewes, H. (2001). Comparison of the classical and the modern vertical reference system in Colombia. *IAG Scientific Assembly*, 8-9.
- Sánchez, L., & Martínez, W. (2001). *Approach to the New Vertical Reference System for Colombia*. *IAG Symposia*, 124, pp. 27-33.
- Sánchez, L., Drewes, H., Blitzkow, D., & Freitas, S. (2001). *Sistema Vertical de Referencia para América del Sur*.

## Ponencias:

- Sánchez, Laura. (2016). *Sistemas Verticales Referencia*. Ponencia presentada en Simposio SIRGAS, Quito, Ecuador, 16-18 de noviembre.

