

# MATERIALIZACIÓN DE LA RED GEODÉSICA PRINCIPAL Y DE DENSIFICACIÓN DETERMINADA POR LA EMPRESA DE ACUEDUCTO Y ALCANTARILLADO DE BOGOTÁ

Materialization of the main geodetic network and densification network, determined by the water system Bogotá enterprise

Wilmar Darío Fernández G.<sup>1\*</sup>, Pedro Sandoval Cavanzo<sup>2†</sup>, Raúl Almarales<sup>3‡</sup>, Waldo Sierra G.<sup>4‡</sup>

<sup>1</sup> Universidad Distrital “Francisco José de Caldas”, <sup>2</sup> Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá,

<sup>3</sup> Universidad Distrital “Francisco José de Caldas”, <sup>4</sup> Universidad Distrital “Francisco José de Caldas”.

Correspondencia: \*wfernandez@udistrital.edu.co †psandoval@acueducto.com.co

‡rfalmavar@yahoo.es ‡waldosierragomez@gmail.com

Recibido: 15 de febrero de 2011 Aceptado: 2 de mayo de 2011

## Resumen

La realización de una red geodésica requiere diferentes actividades entre las cuales se encuentran el estudio de la geometría de la red, el establecimiento de líneas base, la señalización de puntos, la materialización de puntos y la determinación de señales de azimut.

En la red geodésica principal y de densificación determinada por la Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá en colaboración con la Universidad Distrital y el Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC) se utilizó el sistema de posicionamiento global (GPS) para obtener una red dinámica y versátil que supla las necesidades de los usuarios en zonas en las que el IGAC no tiene cobertura.

El presente artículo muestra la forma como se llevó a cabo la materialización de puntos principales de densificación y las señales de azimut para el establecimiento de la red geodésica de la Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá, y cómo se adaptaron y construyeron nuevos dispositivos para la señalización de puntos de control horizontal.

**Palabras clave:** materialización de vértices, puntos de control, red geodésica, señalización, sistema de posicionamiento global.

## Abstract

The construction of a geodesic network requires different activities, the study of the geometry of the network, the establishment of bases lines, the signaling of points, the materialization of points and the determination of azimuth signals.

In this geodesic network determined by the Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá in collaboration with the Universidad Distrital and the Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC), was used the system of global positioning (GPS), to obtain a dynamic and versatile network that replaces the needs of the users in zones that the (IGAC), does not have cover.

The present article shows the carry out materialization of main points, densification and the signals of azimuth for the establishment of the geodesic network of the Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá and as new devices for the signaling of horizontal control points were adapted and constructed.

**Key words:** Materialization of vertices, control points, geodesic network, global positioning system, signposting.

## Introducción

Bogotá es una metrópoli que posee un área total de 1.732 km<sup>2</sup>, con 6,8 millones de habitantes, con una proyección de 7,4 millones para el 2010 (Fernández-Gómez *et al.*, 2007). Por esto, la Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá (EAAB) realiza continuamente obras de infraestructura que garantizan un adecuado abastecimiento de agua potable y un cubrimiento en los sistemas de saneamiento sanitario y pluvial en el Distrito Capital. Para proyectar y construir el plan maestro de acueducto y alcantarillado de Bogotá, en el nacimiento de la empresa mediante el acuerdo 105 del Concejo administrativo de la ciudad en 1955, se vio la necesidad de establecer una red vertical independiente—ya que no existía aún la red geodésica distrital— con la que se determinó posteriormente una diferencia de 29,48 m con respecto a las cotas determinadas por el IGAC. Esta situación generó confusiones y complicaciones en varios proyectos de suministro y vertimiento de aguas residuales por estas diferencias. Colombia adoptó desde el año 1999 el Marco Geocéntrico de Referencia Nacional Magna, que es la densificación del proyecto Sistema de Referencia Geocéntrico para las Américas (Sirgas). Esta es la oportunidad en la cual la empresa de Acueducto de Bogotá unifica el sistema de coordenadas al Sistema Magna, situación que le conviene al Distrito Capital ya que esta red propuesta por la empresa fortalece también la que ha sido determinada por el IGAC con la participación directa de la Universidad Distrital. La evolución de la red geodésica distrital se inició desde los años setenta, cuando el IGAC estableció en Bogotá una red de puntos topográficos de tercer orden los cuales fueron denominados T . Hacia el año 1986 se realizó una red geodésica de segundo orden, la cual fue materializada por el Instituto Geográfico a petición del Departamento Administrativo de Catastro Distrital y es conocida como la red de CD. Debido a la modernización de la infraestructura urbana, la inclusión de nuevas vías y la ampliación de otras, la red CD se vio muy afectada ya que una gran cantidad de puntos fueron destruidos a raíz de las construcciones. En 1996 se da al servicio una nueva red de CD actualizados y posicionados con GPS, la cual tuvo los inconvenientes mencionados anteriormente y aunque se pretendía ampliarla, algunos puntos se perdieron debido a que sus pares fueron destruidos.

En vista de la necesidad de puntos de apoyo de georreferenciación, la EAAB determinó una red geodésica como apoyo a la construcción y control de obras en la ciudad, con

algunas innovaciones para mejorar el servicio y localizada en sitios que pueden ser protegidos por la seguridad de la empresa. El presente trabajo pretende mostrar la forma como se materializaron los vértices de la red y como se crearon nuevos dispositivos para mejorar el funcionamiento de la misma. Los procesos matemáticos de ajuste y los resultados de coordenadas, errores y precisiones se pueden observar ampliamente en el documento elaborado por Fernández-Gómez *et al.* (2007).

## El sistema de referencia

Un sistema de referencia geodésico es un modelo matemático que permite asignar coordenadas a puntos sobre la superficie terrestre (CNUGGI, 1999).

Deben distinguirse los llamados sistemas locales que utilizan para su definición un elipsoide determinado y un punto datum, y los sistemas globales cuyos parámetros están dados por una terna rectangular  $(x, y, z)$  cuyo origen se encuentra en el geocentro del planeta. Para definir las coordenadas geodésicas (latitud, longitud y altura) cuentan con un elipsoide de revolución asociado. Esta es una definición rigurosa pero abstracta, pues tanto el centro como los ejes son inaccesibles en la práctica (Boucher *et al.*, 1997) (figura 1).

## Marcos de referencia geodésicos

Los marcos de referencia geodésicos constituyen la materialización del sistema de referencia sobre la superficie terrestre. Para fines prácticos un sistema de referencia se materializa mediante un conjunto de mojones geodésicos implantados en una región, a los que se les han asignado coordenadas. Es claro que tales coordenadas han surgido de un cierto proceso de medición estando, por tanto, afectadas de errores. Es cierto también que a un mismo sistema de referencia puede corresponderle más de un marco producto de la materialización de dicho sistema en distintas zonas, países o regiones (Boucher *et al.*, 1997)

## Densificación del marco de referencia

El esfuerzo requerido para la materialización de un sistema de referencia y los estándares que debe cumplir, hacen que los marcos de referencia fundamentales estén constituidos por solo un conjunto de vértices. Debido a esto es necesario un trabajo posterior de densificación a fin de hacer

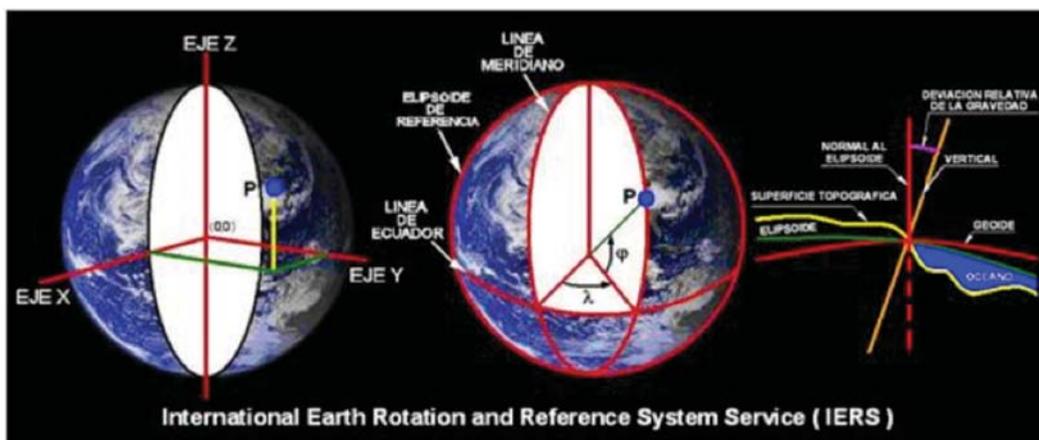


Figura 1. Sistemas de referencia

Fuente: modificado de IERS (1988).

el sistema accesible al mayor número posible de usuarios. En esta etapa se recomienda utilizar todos los parámetros establecidos en el sistema de referencia convencional. Sin embargo, según sea el fin de la densificación, pueden tolerarse condiciones menos restrictivas sobre la exactitud de las coordenadas de los nuevos puntos a fin de lograr un mayor número de ellos (Boucher *et al.*, 1997).

### Densificación del marco ITRF en América del Sur

A pesar de que las materializaciones del sistema de referencia terrestre internacional (ITRS) tienen una buena distribución de puntos en el globo, solo unos pocos se encuentran en Sudamérica (figura 2). Por las características geográficas y económicas del continente, a principios de la década de los noventa solamente algunas zonas estaban cubiertas por un control geodésico clásico de buena calidad. La disponibilidad del Sistema de Posicionamiento Global (GPS) posibilitó la medición de nuevas redes geodésicas en los países de la región. Sin embargo, fue necesaria una densificación del ITRF en el continente para que todos los países pudieran vincular sus marcos de referencia nacionales al Sistema de Referencia Terrestre Internacional. El proyecto Sistema de Referencia Geocéntrico para las Américas (Sirgas) fue establecido en octubre de 1993 durante la Conferencia Internacional para la Definición del Datum Geocéntrico Sudamericano en Asunción, Paraguay, y es auspiciado por la Asociación Internacional de Geodesia (IAG), el Instituto Panamericano de Geografía e Historia (IPGH) y la Agencia Nacional de Imágenes y Cartografía (NIMA) de los Estados Unidos (Souto *et al.*, 2005).

Las mediciones que permitieron materializar el ITRS fueron realizadas entre mayo y junio de 1995 en 10 sesiones consecutivas de 24 horas de duración en alrededor de 60 estaciones. El sistema de referencia elegido para la solución definitiva es el ITRS del IERS en su materialización ITRF94 y la época de las coordenadas se hizo coincidir con la época media de las observaciones, es decir 1995.

La materialización se realizó mediante las coordenadas geocéntricas de estaciones permanentes de rastreo del IGS en Kourou (Guyana Francesa), Bogotá (Colombia), Fortaleza (Brasil), Arequipa (Perú), Brasilia (Brasil), Isla de Pascua (Chile), La Plata (Argentina), Santiago (Chile) y O'Higgins (Antártida) (Sirgas, 1997).

Entre los años sesenta y noventa Bogotá contaba con aproximadamente 4000 vértices de los distintos tipos, en 1994 se materializan y reposicionan cerca de 800 puntos para reemplazar los vértices destruidos y actualizar la red existente; en el año 2003, por las constantes quejas de los usuarios dada la falta de vértices, el Instituto realizó un inventario con el cual se determinó el mal estado en el que se encontraba la red geodésica de la ciudad, por lo cual se hizo un convenio con Catastro Distrital para la construcción y georreferenciación de 20 vértices en Bogotá con las características de precisión de la red Magna (Marco Geocéntrico de Referencia Nacional) (Sánchez, 2005), que a su vez es la densificación del Sistema de Referencia Geocéntrico para las Américas (Sirgas) en Colombia (figura 3).

Actualmente, el Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC) únicamente certifica los vértices georreferenciados en el sistema Magna que son aproximadamente 800 ubicados en la capital y en la parte de la zona rural del

Distrito Especial (Sumapaz) entre los que se encuentran los CT, CX, CD y CD-A (rematerializados para Catastro Distrital en el año 1994).



**Figura 2.** Estaciones de referencia Magna-Sirgas. a) Instituto Geográfico Agustín Codazzi (BOGA), Bogotá, Colombia. b) Universidad Nacional del Sur, Argentina (VBCA).



**Figura 3.** Pilastra red Magna. Densificación de la red geodésica Sirgas en Colombia (Magna), vértice del Departamento Administrativo de Catastro Distrital (Bogotá 15), barrio San Pedro (Bosa)

Si en la capital todos de los vértices materializados estuvieran intactos, georreferenciados en el sistema Magna, y con una visibilidad óptima para la ejecución de actividades topográficas se contaría con una red de alrededor 4820

vértices, pero como estas condiciones no se cumplen, solo el 17% (820) del total de los vértices materializados en un periodo de 45 años se encuentran en uso.

El IGAC debe reposicionar periódicamente los vértices cumpliendo los estándares del IERS, en un periodo no mayor a dos años, con una inversión aproximada de cien mil dólares a fin de mantener vigente la red geodésica en la ciudad; En este momento en Bogotá solo cumplen estas especificaciones 120 vértices incluidos los 20 puntos de la ciudad, lo cual nos da un 15% de la red geodésica en condiciones óptimas para trabajo.

### ***Materialización de las estaciones de rastreo permanentes***

La materialización debe satisfacer el estándar para monumentos de puntos de control geodésicos de primer orden con respecto a la accesibilidad, estabilidad, durabilidad y mantenimiento a largo plazo, debido a que las estaciones de rastreo permanente GPS requieren de una estructura fiable y robusta (INEGI, IBGE 1992; Moirano, 2000).

Por eso se deben tener en cuenta los siguientes criterios en su establecimiento:

- Lugar estable (mínimos movimientos horizontales y verticales).
- Soporte estable de la antena (oscilación menor de 1 cm).
- Mínimo de interferencias electromagnéticas.
- Horizonte relativamente limpio, sin ninguna obstrucción por encima de los 10° y la antena orientada hacia el norte.
- Ubicación de la antena libre de efecto Multipath.
- Energía permanente.
- Protección del cable coaxial.
- Seguridad del receptor (contra el medioambiente y el vandalismo).
- Accesibilidad de los datos.

### **Procedimiento para la construcción de los mojones de concreto de los vértices de primer orden para la Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá**

Concretos: la comprensión de los principios básicos del diseño de los hormigones es tan importante como la realización de los cálculos. Solo con una selección de los materiales y de las características de la mezcla, y una dosificación adecuada, se pueden obtener las propiedades de manejo en el

hormigón fresco: durabilidad, resistencia y uniformidad en el hormigón endurecido, y que sea económico (figura 4).

Incrustaciones: un tipo de materialización frecuente es la incrustación, esta consiste en la colocación de una placa de identificación generalmente de bronce cuya superficie queda a ras con la de una roca superficial bastante rígida o una superficie estable de concreto. Este tipo de materialización no es aconsejable en lugares donde exista acceso vehicular o tráfico pesado que alteren las condiciones de estabilidad del vértice (figura 5).

Diseño y construcción de las señales de azimut: la primera señal tiene las mismas características del diseño y la construcción del pedestal de la estación permanente, por ser este un diseño liviano y de fácil manejo en su instalación (figura 6).

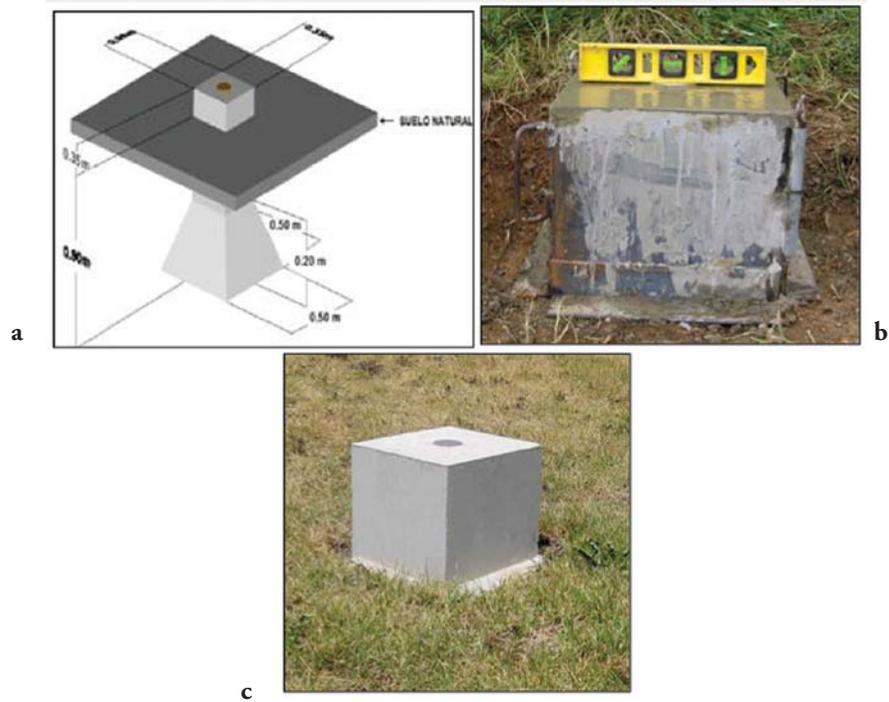
La segunda señal de azimut fue diseñada para que se pueda observar a diferentes distancias, para ello cuenta con una altura de 5,50 m, se emplearon los siguientes materiales:

- 2,50 m de tubería de acero de 8" de diámetro.
- 1,50 m de tubería de acero de 6" de diámetro.
- 1,00 m de tubería de acero de 3" de diámetro.
- 0,50 m de tubería de acero de 2" de diámetro.
- Un acople de acero inoxidable para sujeción de la antena del receptor GPS.
- Una platina de 0,4 x 0,4 m para soporte de la señal.
- Cuatro platinas en forma de triángulo para soporte de la tubería.
- Siete varillas figuradas en forma de triángulo como pasos para escalera.

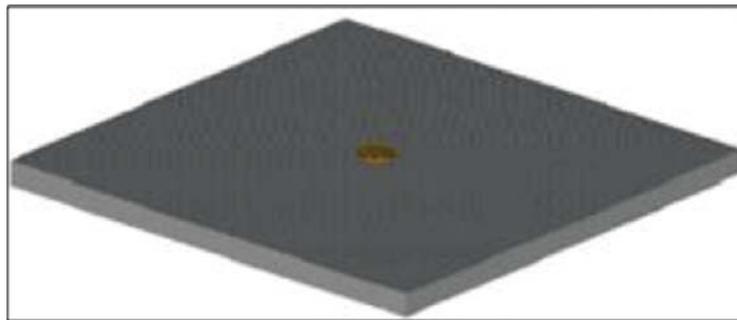
La construcción de la señal se realizó en los talleres de la empresa, ya que cuentan con la maquinaria adecuada para su elaboración.

### ***Señales de azimut***

Se construyeron dos señales de azimut con el ánimo de que se pudiesen observar desde diferentes lugares con el fin de no establecer tantos vértices de referencia, para ello se eligieron los tanques de distribución Alpes II y el Volador ya que son divisados desde diferentes puntos al suroriente de la ciudad (figuras 7 y 8).



**Figura 4.** Elaboración del monumento. a) dimensión; b) construcción; c) monumento terminado



**Figura 5.** Incrustaciones; loza en concreto

**Adecuación e instalación de torre para señal de azimut:** se habilitó la torre removida del sector de Suba que se encontraba almacenada en las instalaciones del IGAC, a la cual se le restauraron los ángulos y las platinas de soporte con el propósito de lograr la verticalidad y la estabilidad de la estructura.

De otra parte, en un posicionamiento previo en el vértice Bogotá-6, ubicado en el tanque de Suba, se observó que las láminas metálicas que sujetan la estructura en la parte superior de las torres interfieren y degradan la señal de los satélites (figura 9).



Figura 6. Escenas de la fabricación de la señal de azimut.



Figura 7. Tanque Alpes II



Figura 8. Montaje y posicionamiento de la señal de azimut en el tanque Alpes II



Figura 9. Deficiencia de recepción

Se procedió entonces a mecanizar las torres colocando dispositivos para mejorar el centrado del pendolón (figuras 10 y 11).

Una vez mejoradas las torres, quedan funcionando de la siguiente forma (figura 12).

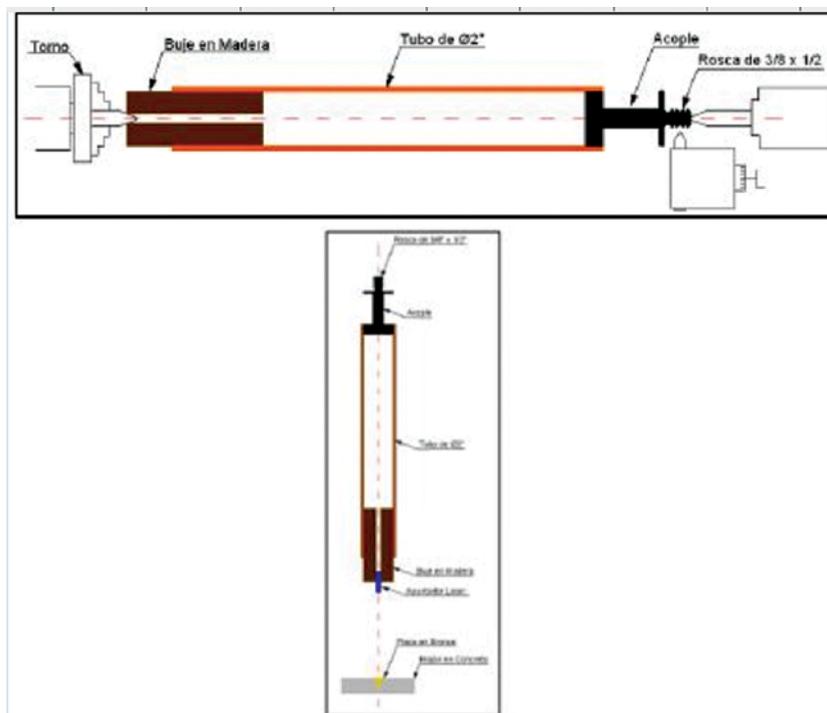


Figura 10. Dispositivo de centrado del pendón de la torre



Figura 11. Imágenes del dispositivo de centrado instalado

### Construcción y montaje de bases para los receptores permanentes

En la construcción de la primera base de rastreo se utilizó un tubo de hierro galvanizado de tres pulgadas de diámetro y dos metros de altura, se adaptó un acople de dieciséis centímetros de altura con rosca de media pulgada para fijar la antena receptora al extremo superior del tubo, y en la parte inferior del mismo se le soldó una lámina como soporte (0,4 x 0,4 x 0,008 m) a la cual se le hicieron 8 agujeros de 3/8" de diámetro; asimismo, se colocaron cuatro platinas en forma triangular soldadas al tubo y a la base para darle mayor firmeza a la estructura (figura 13).

### Bases de rastreo permanente

Siguiendo los anteriores lineamientos para el establecimiento de las bases de rastreo permanentes se instalaron dos, la primera está ubicada en la calle 22C N° 40-99 (Centro Nariño) sobre la terraza del edificio de la Empre-

sa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá (Central de Operaciones) (figura 14).

La segunda base está ubicada sobre la terraza de uno de los bloques de apartamentos del conjunto residencial Nueva Madelena ubicado en la carrera 67 N° 62B-55 sur (figura 15).

### Densificación de la Red

La red de densificación es una prolongación de la red inicial distribuida uniformemente sobre el territorio, constituyéndose en el control geodésico a nivel local el cual servirá de marco referencial planimétrico, altimétrico y gravimétrico ya que los vértices tienen valores absolutos de gravedad para la realización de trabajos topográficos y cartográficos.

La materialización de la red fue la más ardua por el trabajo que representó la ejecución de los vértices; se establecieron 26 mojones y 23 incrustaciones culminando así esta etapa de densificación.



Figura 12. Dispositivo mejorado



Figura 13. Despiece mecánico de la base de rastreo

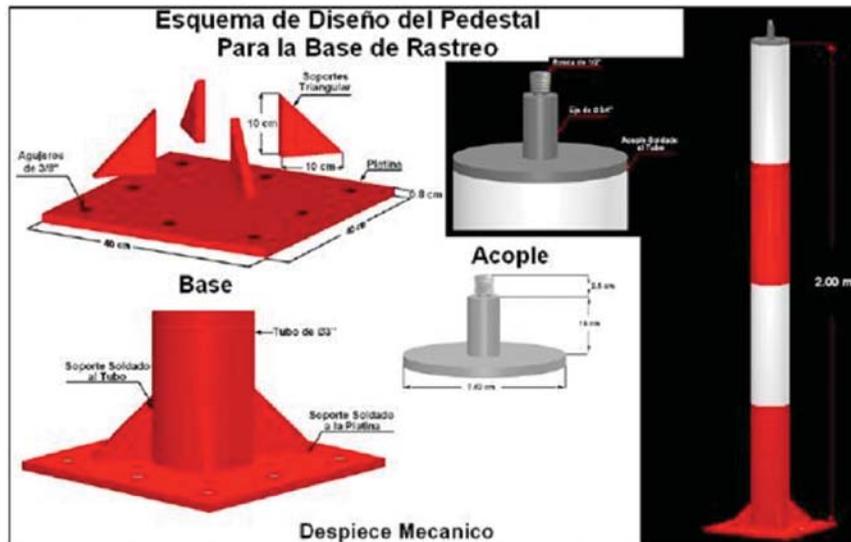


Figura 14. Base de rastreo permanente EAAB



Figura 15. Base de rastreo permanente Madelena

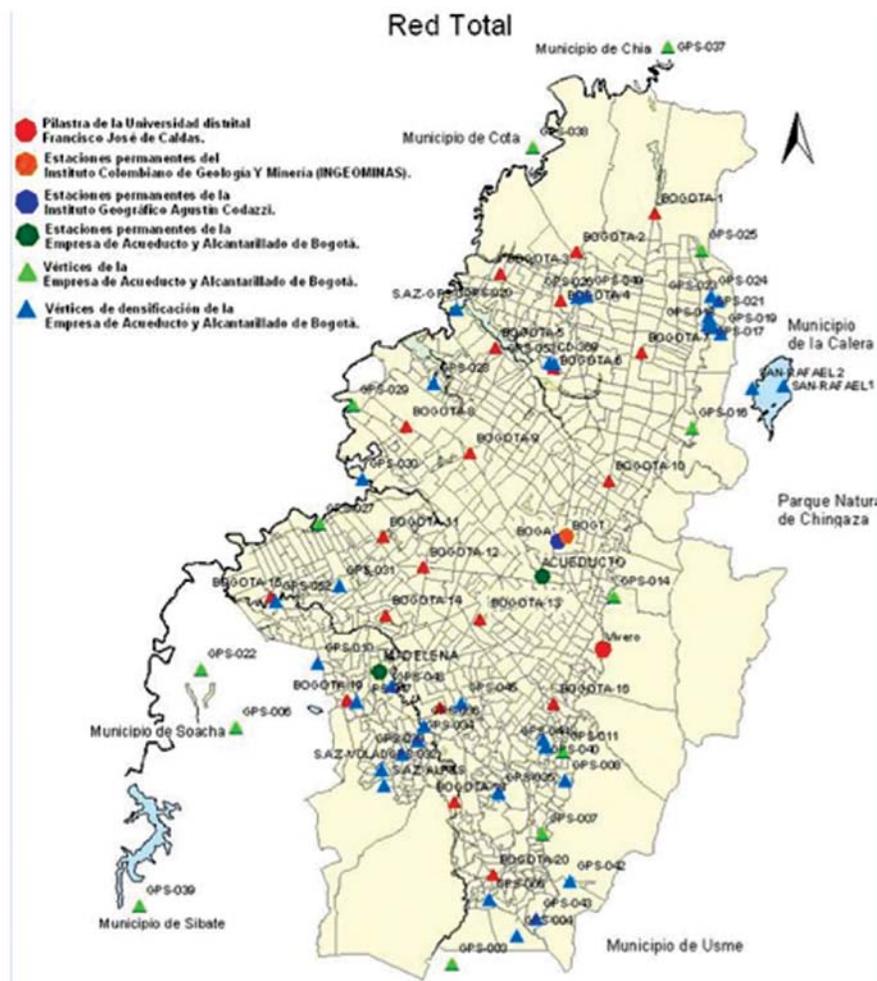


Figura 16. Plano general de la Red Geodésica de Bogotá

## Discusión

La materialización es, en esencia, la instalación de monumentos o hitos del sistema de referencia en el terreno, bien sea en el campo o la ciudad. En ciudades como Bogotá, donde los proyectos de infraestructura deben cubrir todos los sitios en un espacio que se hace insuficiente pues a cada hogar deben llegar los diferentes servicios públicos, se requiere de una red de coordenadas que permita construir y rehabilitar adecuadamente los elementos de dicha infraestructura.

Las redes geodésicas existentes en Bogotá han estado atacadas por el desarrollo de infraestructura vial y de servicios, ya que obras como Transmilenio, que abarcan las principales vías de la ciudad, ayudaron en buena medida a la desaparición de gran cantidad de puntos geodésicos de alta precisión,

cuyos costos de reposicionamiento son altos; los costos también se elevan por llevar coordenadas desde sitios lejanos a sectores en donde han desaparecido los puntos.

El problema se reduce, entonces, a dónde y cómo colocar puntos que le sirvan a la comunidad de ingenieros, topógrafos y agrimensores para localizar sus proyectos. Es evidente que para materializar esos puntos deben encontrarse sitios que se caractericen por su estabilidad, accesibilidad y visibilidad. En Bogotá esos sitios se pueden encontrar en puntos elevados ya que por la topografía plana de la Sabana, desde cualquier punto se observan los cerros.

El ingreso de la tecnología de GPS con estaciones permanentes hace posible obtener la información continua de la posición de puntos en los cuales se instalen estos dispositivos,

lo que permite además corregir o analizar en tiempo real los cambios que por efecto de la geodinámica sucedan.

La materialización de esta red permitió colocar puntos en sitios que cumplen con los requisitos mencionados y además con la seguridad, porque el vandalismo también ha sido una de las causas de pérdida de puntos geodésicos. La visual alcanzada desde esos puntos puede llegar a varios kilómetros a la redonda, y ubicando dos de estos puntos la georreferenciación se puede realizar por métodos geodésicos sencillos, como la bisección o trisección con precisiones excelentes. La adaptación de dispositivos para la colocación de antenas en las terminales de los pendones y señales de azimut permitió la recepción de señales disminuyendo altamente el efecto multipath.

Aunque no es la única forma de realizar materialización de puntos, esta ha mejorado la labor de ingenieros y topógrafos de la Empresa de Acueducto y se han disminuido costos por el hecho de que el tiempo en el traslado de coordenadas a los sitios necesarios es menor.

## Conclusiones T1

Una red geodésica o topográfica se materializa para hacer tangible el sistema de referencia en el cual se establece el territorio. La materialización de la red es tan o más importante que el establecimiento de la misma. Por esta razón, las soluciones que deben dar las diferentes entidades que trabajan con información geográfica deben también estar encaminadas a mantener y densificar la red que se tenga. El objetivo es tener apoyo en la georreferenciación en cualquier punto de la ciudad, lo que se ha obtenido con el establecimiento de estos puntos.

La localización de puntos de apoyo para realizar levantamientos topográficos convencionales o con ayuda del sistema GPS es indispensable en cualquier proyecto de desarrollo, de ahí la importancia de tener puntos que permitan realizar la georreferenciación sin tener que realizar desplazamientos largos, lo que redundaría en pérdida de tiempo y dinero, con riesgos por efectos de la seguridad.

## Referencias bibliográficas

- Boucher, C., Altamimi, Z., Sillard, P. (1997). *International Terrestrial Reference Frame (ITRF97) (Technical Note No. 27)*. Paris: Central Bureau of IERS - Observatoire de Paris.
- CNUGGI (Comité Nacional de la Unión Geodésica y Geofísica Internacional) (1999). *Sistemas Geodésicos [en línea]*. CNUGGI, Subcomité de Geodesia, Grupo de Trabajo Sistemas Geodésicos. Recuperado el 23 de octubre de 2011 de <http://www.agrimensoreschubut.org.ar/Documentos/G.T.S.G.pdf>
- DANE (2007). *Proyecciones nacionales y departamentales de población 2006-2020*. Bogotá: Autor.
- Fernández-Gómez, W., Sandoval, P., Almarales, R. y Sierra W. (2007). Establecimiento de una red geodésica principal y de densificación para la empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá. *Revista de Topografía Azimut*, 1, 10-22.
- Fundação Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística IBGE (1992). *Especificações e Normas Gerais para Levantamentos GPS*. Localización: Diretoria de Geociências. Brasil. Recuperado el 19 de diciembre de 2011 de [http://www.ibge.gov.br/home/geociencias/geodesia/default\\_normas.shtm?c=14](http://www.ibge.gov.br/home/geociencias/geodesia/default_normas.shtm?c=14)
- Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática (INEGI) (2010). *Normas Técnicas para Levantamientos Geodésicos*. México. Recuperado el 19 de diciembre de 2011 de [http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/geodesia/geodesia\\_marco.aspx](http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/geodesia/geodesia_marco.aspx)
- Moirano, J. F. (2000). *Materialización del Sistema de Referencia Terrestre Internacional en Argentina, mediante observaciones GPS (Tesis Doctoral)*. La Plata: Universidad Nacional de La Plata.
- National Geodetic Survey and the U.S. Naval Observatory (1988). *IERS International Earth Rotation Service Department of the Navy; U.S. Naval Observatory, 34th and Massachusetts Ave., N.W.; Washington, D.C. 20392*.
- Sánchez, L. (2005). *Adopción del marco geocéntrico nacional de referencia Magna-Sirgas como datum oficial de Colombia*. Bogotá: Instituto Geográfico Agustín Codazzi.
- Sirgas (1997). *Sistema de Referencia Geocéntrico para América do Sul*. Relatorio Final, Grupos de Trabajo I y II. Rio de Janeiro: Instituto Brasileiro de Geografia e Estadísticas.
- Souto, L. P., Lauría, E., Brunini, C., Hernández, A., Sánchez, L., Drewes, H. y Seemueller, W. (2005). *El proyecto internacional Sirgas. Estado actual y objetivos futuros*. Caracas: Instituto Panamericano de Geografía e Historia.