



MINISTERIO DE
DEFENSA
NACIONAL



INSTITUTO
GEOGRÁFICO
MILITAR

GEODESIA

Manual de
Especificaciones
Técnicas

Levantamientos Geodésicos



MINISTERIO DE
DEFENSA
NACIONAL



INSTITUTO
GEOGRÁFICO
MILITAR

INDICE

| | |
|---|-----------|
| CAPITULO 1: CONTROL HORIZONTAL..... | 5 |
| 1.1. ANTECEDENTES | 5 |
| 1.2. OBJETO | 5 |
| 1.3. CAMPO DE APLICACIÓN | 5 |
| 1.4. REFERENCIAS NORMATIVAS..... | 5 |
| 1.5. DEFINICIONES..... | 5 |
| 1.6. MARCO TEÓRICO..... | 7 |
| 1.6.1. Introducción | 7 |
| 1.6.2. Sistema de Posicionamiento Global –GNSS | 7 |
| 1.7. CLASIFICACIÓN DE CONTROL GEODÉSICO HORIZONTAL | 10 |
| 1.7.1. Clasificación según sus coordenadas | 10 |
| 1.7.2. Clasificación según su densificación..... | 10 |
| 1.7.3. Clasificación según Precisión..... | 10 |
| 1.8. APOYO FOTOGRAMÉTRICO | 12 |
| 1.8.1. Planificación en Gabinete..... | 12 |
| 1.8.2. Identificación en terreno de los puntos planificados..... | 13 |
| CAPITULO 2: CONTROL VERTICAL | 16 |
| 2.1. PRECEPTOS TEÓRICOS PARA EL CONTROL VERTICAL..... | 16 |
| 2.2. INTERNATIONAL HEIGHT REFERENCE SYSTEM (IHRS)..... | 16 |
| 2.3. COMPONENTE GEOMÉTRICA DEL IHRS..... | 18 |
| 2.4. COMPONENTE FÍSICA DEL IHRS..... | 19 |
| 2.5. CONVENCIONES PARA LA DEFINICIÓN Y REALIZACIÓN DEL IHRS | 19 |
| 2.6. INTERNATIONAL HEIGHT REFERENCE FRAME (IHRF) | 20 |
| 2.7. CONVENCIONES PARA LA REALIZACIÓN DEL IHRS | 20 |
| 2.8. DATUM Y SISTEMA GRAVIMÉTRICO DE REFERENCIA | 22 |
| 2.9. SUPERFICIES DE NIVEL..... | 25 |



MINISTERIO DE
DEFENSA
NACIONAL



INSTITUTO
GEOGRÁFICO
MILITAR

| | | |
|---------|----------------------------------|----|
| 2.10. | GRAVIMETRÍA..... | 26 |
| 2.10.1. | INTRODUCCIÓN..... | 27 |
| 2.11. | NIVELACIÓN GEODÉSICA..... | 29 |
| 2.11.1. | INTRODUCCIÓN..... | 29 |
| 2.11.2. | EJEMPLOS..... | 31 |
| 2.12. | ESPECIFICACIONES..... | 33 |
| 2.12.1. | NIVELACIÓN DE PRIMER ORDEN..... | 33 |
| 2.12.2. | NIVELACIÓN DE SEGUNDO ORDEN..... | 34 |
| 2.12.3. | NIVELACIÓN DE TERCER ORDEN..... | 35 |



MINISTERIO DE
DEFENSA
NACIONAL



INSTITUTO
GEOGRÁFICO
MILITAR

GEODESIA

Manual de
Especificaciones
Técnicas

Levantamientos Geodésicos
Control Horizontal



MINISTERIO DE
DEFENSA
NACIONAL



INSTITUTO
GEOGRÁFICO
MILITAR

CAPITULO 1: CONTROL HORIZONTAL

1.1. ANTECEDENTES

En cumplimiento a los Art. 1 y 2 de la ley de La Cartografía Nacional, el presente documento tiene por objeto homologar los criterios técnicos aplicados a levantamientos geodésicos, dentro de su componente horizontal, a fin de brindar apoyo técnico al profesional que realiza este tipo de trabajos, para garantizar los resultados en la determinación de nuevos puntos de referencia con fines geodésicos y topográficos.

El Art. 44 del Reglamento a la Ley de la Cartografía Nacional, establece que: *“los trabajos autorizados de conformidad con el Art. 42 del presente Reglamento, serán supervisados, fiscalizados y aprobados por el Instituto Geográfico Militar”*, por lo que es necesario establecer los criterios técnicos de generación de información.

Adicionalmente se debe establecer que todo punto perteneciente a un levantamiento geodésico horizontal en el país, deberá estar referido al Sistema de Referencia Geocéntrico para las Américas (SIRGAS), asociado con el Marco de Referencia Terrestre Internacional 2008 (ITRF08) del Servicio Internacional de Rotación de la Tierra (IERS) de la época 2016,43.

1.2. OBJETO

Disponer de un conjunto de especificaciones técnicas mínimas para ejecutar levantamientos geodésicos en su componente horizontal.

1.3. CAMPO DE APLICACIÓN

El manual es para todo el personal que presta sus servicios en el Proceso de Geodesia del Instituto Geográfico Militar (I.G.M), así como también para las personas o instituciones que realicen trabajos dentro del campo de levantamientos geodésicos, sean por ejecución de trabajos, contratación o fiscalización.

1.4. REFERENCIAS NORMATIVAS

- Ley de La Cartografía Nacional y Reglamento.
- Normas técnicas para levantamientos geodésicos, INEGI – México.
- Estándares cartográficos aplicados al catastro - Sistema Nacional Integrado de Información Catastral Predial-Perú.
- Glosario de términos cartográficos. Universidad de Alicante - España.

1.5. DEFINICIONES

- **Calidad:** Grado con el que un conjunto de características inherentes cumple los requisitos.



MINISTERIO DE
DEFENSA
NACIONAL



INSTITUTO
GEOGRÁFICO
MILITAR

- **Exactitud:** Grado de concordancia entre el resultado de una prueba y el valor de referencia aceptado.
- **Exactitud posicional:** Proximidad del valor de la coordenada respecto al valor verdadero o aceptado en un sistema de referencia especificado.
- **Datos de la estación:** Comprenden información meteorológica, temperatura, presión atmosférica y humedad relativa y de la posición de la antena GPS con respecto a la marca que materializa el punto (altura de la antena, excentricidad). Estos datos deben ser recolectados por el operador y conservados en una hoja de campo o eventualmente introducidos en el receptor.
- **Georreferenciación:** Geo-posicionamiento de un objeto utilizando un modelo de correspondencia derivado de un conjunto de puntos para los cuales las coordenadas tanto del terreno como de la imagen son conocidas.
- **GNSS (Global Navigation Satellite System):** Sistema Global de Posicionamiento que permite al usuario determinar en cualquier parte del mundo la posición tridimensional de un punto sobre la superficie terrestre respecto al geocentro.
- **Levantamientos geodésicos horizontales:** Conjunto de procedimientos y operaciones de campo y gabinete orientados a calcular la posición de un punto sobre la superficie terrestre en un sistema de referencia de coordenadas geodésicas, convenientemente elegido y demarcado con respecto al Marco de Referencia para el Ecuador.
- **Ortoimagen:** Imagen en la que, por medio de una proyección ortogonal a una superficie de referencia, se ha removido el desplazamiento de los puntos de la imagen debido a la orientación del sensor y el relieve del terreno. La cantidad de desplazamiento depende de la resolución y el nivel de detalle de la información de elevación y de la implementación del software.
- **Ortofototo u Ortofotomapa:** es una presentación fotográfica de una zona de la superficie terrestre, en la que todos los elementos presentan la misma escala, libre de errores y deformaciones, con la misma validez de un plano cartográfico, se obtiene a partir de las perspectivas de la imagen y se ha rectificado la imagen del terreno según una proyección ortogonal vertical¹.
- **Posicionamiento estático:** Método de medición caracterizado por la ocupación simultánea de dos o más puntos durante un tiempo suficientemente

¹ Obtenido de estándares cartográficos aplicados al catastro. Sistema Nacional Integrado de Información Catastral, Predial -Perú



MINISTERIO DE
DEFENSA
NACIONAL



INSTITUTO
GEOGRÁFICO
MILITAR

prolongado de tiempo mientras los receptores se mantienen estacionarios en tanto registran los datos².

- **Precisión:** Medida de la repetitividad de un conjunto de mediciones, se expresa generalmente como un valor estadístico basado en un conjunto de mediciones repetidas, tales como la desviación estándar de la media de la muestra.
- **Punto de control en el terreno:** Punto de la tierra que tiene una posición conocida con precisión geográfica.

1.6. MARCO TEÓRICO

1.6.1. Introducción

“Uno de los propósitos de la geodesia es determinar la forma, dimensiones y la ubicación de un sector de la superficie terrestre.” (Huerta, Mangiaterra, & Noguera, 2005). Por lo tanto, es necesario realizar mediciones en terreno tomando en cuenta que los datos escogidos puedan ser determinados espacialmente y referidos a un Sistema de Referencia espacial.

“Se puede definir a un Sistema de Referencia como un conjunto de parámetros y constantes que determinan las condiciones para la descripción y representación de la superficie de la Tierra. Los sistemas de referencia no se pueden determinar por mediciones, sino que se definen convencionalmente, mediante la adopción de una estructura física fundamental que considera tres aspectos fundamentales, a saber, el origen del sistema (ejemplo: centro de masas), la escala (unidad de longitud utilizada) y la orientación (habitualmente ecuatorial o eclíptica). Por lo tanto, se le asocia a la estructura física elegida, un cierto número de parámetros arbitrarios que permiten un modelado matemático de las propiedades físicas de la estructura.” (Cabrera & Morales, 2012)

Un Sistema de Referencia debe ser materializado mediante un Marco de Referencia, entendiéndose como Marco de Referencia “al conjunto de elementos que materializan y sustentan el Sistema de Referencia, sobre la superficie de la Tierra.” (Souto Llamas, 2009)

1.6.2. Sistema de Posicionamiento Global –GNSS

El sistema GNSS tiene una estructura claramente definida, por:

² Glosario de términos cartográficos. Universidad de Alicante



MINISTERIO DE
DEFENSA
NACIONAL



INSTITUTO
GEOGRÁFICO
MILITAR

- **Segmento de Espacial:** Compuesto por satélites que forman el sistema, tanto de navegación como de comunicación, así como diferentes señales que envían y reciben cada uno de los receptores.

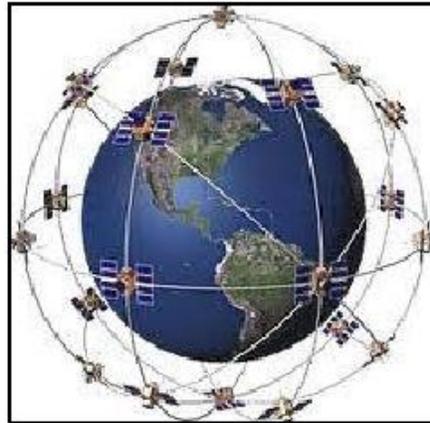


Figura N° 1: Segmento espacial

- **Segmento de Control:** Formado por el conjunto de estaciones en tierra que recogen los datos de los satélites y monitoriza el sistema GNSS, como las estaciones de monitoreo continuo de la REGME. Las funciones principales del segmento de control son:
 - Monitoreo y control permanente de los satélites, con el objeto de determinar y predecir las órbitas y los relojes de a bordo.
 - Sincronización de los relojes de los satélites con el tiempo GPS.
 - Transmisión, a cada satélite, de la información procesada
 - Las Estaciones de Monitoreo Continuo tienen coordenadas conocidas de gran precisión y están equipadas con receptores de GPS (de doble frecuencia L1 y L2) y un reloj de Cesio, siendo su misión la de estar en continua comunicación con los satélites, recibiendo señales emitidas por estos, para poder determinar sus orbitas y distancias con gran exactitud y transmitir las a la Estación de Control, junto con los datos meteorológicos de cada estación.



MINISTERIO DE
DEFENSA
NACIONAL



INSTITUTO
GEOGRÁFICO
MILITAR



Figura N° 2: Segmento de control

- **Segmento de Usuario:** Formado por todos los receptores GNSS que reciben señales del segmento espacial y sus programas de procesamiento de datos. El receptor recibe de cada satélite las efemérides que permiten conocer la posición de aquellos en el espacio. El receptor GPS mide su distancia a los satélites, y utiliza esa información para calcular su posición. Estas distancias obtenidas, llamadas pseudo-distancias, son el resultado de multiplicar la velocidad de la luz (c) por el desplazamiento necesario para correlacionar el código emitido por el satélite, con una réplica de código generado por el receptor.

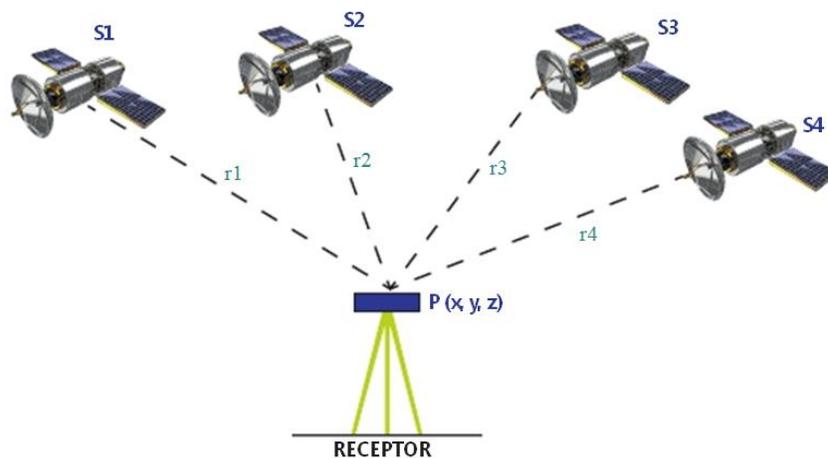


Figura N° 3: Segmento de usuario



MINISTERIO DE
DEFENSA
NACIONAL



INSTITUTO
GEOGRÁFICO
MILITAR

1.7. CLASIFICACIÓN DE CONTROL GEODÉSICO HORIZONTAL

El Servicio Geodésico Nacional de Estados Unidos (NGS), clasifica las redes geodésicas de acuerdo al siguiente detalle:

1.7.1. Clasificación según sus coordenadas

- **Redes planimétricas**, cuyo fin es establecer coordenadas latitud y longitud o (x, y) según sea necesario.
- **Redes altimétricas**, cuyo fin es establecer la coordenada altura sobre la superficie del geoide. Estas redes de nivelación de alta precisión son totalmente independientes de las anteriores, tanto en su ubicación como en sus métodos de observación.
- **Redes tridimensionales**, donde las coordenadas planimétricas y altimétricas se determinan de manera conjunta.

1.7.2. Clasificación según su densificación

- **Redes de Orden 0:** se utilizan para controlar la estructura principal de un país o una zona de gran extensión. Abarcan miles de kilómetros y los puntos se encuentran separados por más de 100 km.
- **Redes de Primer Orden:** constituyen la principal estructura geodésica de una zona de gran extensión. Abarcan centenares de kilómetros. Los puntos se encuentran separados entre 25 km y 100 km.
- **Redes de Segundo Orden:** constituyen una densificación de las redes primarias, con distancias medias entre lados de 15 a 20 km. Abarcan decenas y hasta centenas de kilómetros según sea necesario.
- **Redes de Tercer Orden:** están conformadas por una densificación de las redes secundarias. La distancia entre vértices varía entre 5 y 10 km.
- **Redes de Cuarto y Quinto Orden:** constituyen densificaciones sucesivas de las redes anteriores. Las distancias entre los vértices varían entre los 100 metros y 5 km.

1.7.3. Clasificación según Precisión

- **Categoría A:** precisión sub-centimétrica. El radio de tolerancia es inferior a ± 1 cm. El máximo error admitido en las mediciones es de ± 5 mm.
- **Categoría B:** precisión centimétrica. El radio de tolerancia establecido ronda valores entre ± 1 cm y ± 10 cm. El máximo error admitido en las mediciones varía entre ± 5 mm y ± 5 cm.



- **Categoría C:** precisión sub-métrica. El radio de tolerancia alcanza valores entre ± 10 cm y 1 metro. El máximo error admitido en las mediciones varía entre ± 5 cm y ± 50 cm.
- **Categoría D:** precisión métrica. El radio de tolerancia alcanza valores entre ± 1 m y ± 10 . El máximo error admitido en las mediciones varía entre ± 50 cm y ± 5 m.
- **Categoría E:** precisiones mayores a 10 metros. El radio de tolerancia alcanza valores entre ± 10 m hasta los 100 metros o más.

Adicionalmente se resume la clasificación del proceso de geodesia en su componente horizontal en el siguiente cuadro:

Tabla 1.- Cuadro resumen de la clasificación de acuerdo a la precisión

| Control Horizontal | | | | |
|--|--|--|----------------------------------|--|
| Clasificación | Criterios Post-Proceso y ajuste GNSS * | | Exactitud admitida en Horizontal | Escalas |
| Categoría A | Ph | $\leq 0,005 \text{ m} \pm 1 \text{ ppm}$ | Nv: un sigma | $\leq 1 \text{ cm}$ |
| | Pv | $\leq 0,010 \text{ m} \pm 2 \text{ ppm}$ | | |
| Categoría B | Ph | $\leq 0,005 \text{ m} \pm 1 \text{ ppm}$ | Nv: un sigma | $1 \text{ cm} \leq x \leq 10 \text{ cm}$ |
| | Pv | $\leq 0,010 \text{ m} \pm 2 \text{ ppm}$ | | |
| Categoría C | Ph | $\leq 0,050 \text{ m} \pm 1 \text{ ppm}$ | Nv: 95% | $10 \text{ cm} \leq x \leq 1 \text{ m}$ |
| | Pv | $\leq 0,100 \text{ m} \pm 1 \text{ ppm}$ | | |
| Categoría D | Ph | $\leq 0,050 \text{ m} \pm 1 \text{ ppm}$ | Nv: 95% | $1 \text{ m} \leq x \leq 10 \text{ m}$ |
| | Pv | $\leq 0,100 \text{ m} \pm 1 \text{ ppm}$ | | |
| Categoría E | Ph | $\leq 0,050 \text{ m} \pm 1 \text{ ppm}$ | Nv: 95% | $> 10 \text{ m}$ |
| | Pv | $\leq 0,100 \text{ m} \pm 1 \text{ ppm}$ | | |
| Fiscalización | | | | |
| Clasificación | Criterios Post-Proceso y ajuste GNSS * | | Exactitud admitida en Horizontal | Escalas |
| Bases de alta precisión | Ph | $\leq 0,005 \text{ m} \pm 1 \text{ ppm}$ | Nv: un sigma | $\leq 5 \text{ mm}$ |
| | Pv | $\leq 0,010 \text{ m} \pm 2 \text{ ppm}$ | | |
| Radiales | Ph | $\leq 0,050 \text{ m} \pm 1 \text{ ppm}$ | Nv: 95% | $\leq 1 \text{ cm}$ |
| | Pv | $\leq 0,100 \text{ m} \pm 1 \text{ ppm}$ | | |
| Cartografía | Ph | $\leq 0,050 \text{ m} \pm 1 \text{ ppm}$ | Nv: 95% | $\leq 30 \text{ cm} + 3 \text{ cm}$ |
| | Pv | $\leq 0,100 \text{ m} \pm 1 \text{ ppm}$ | | |
| Redes Geodésicas | Ph | $\leq 0,005 \text{ m} \pm 1 \text{ ppm}$ | Nv: un sigma | $\leq 5 \text{ cm} + 3 \text{ mm}$ |
| | Pv | $\leq 0,010 \text{ m} \pm 2 \text{ ppm}$ | | |
| <p>*Nota: Los parámetros establecidos son los estándares de calidad que maneja el proceso de Geodesia para el Post-Proceso de datos GNSS. La toma de puntos en campo se realiza por métodos de posicionamiento relativos enlazados a una línea base que contenga mínimo dos estaciones de monitoreo GNSS.</p> | | | | |



Finalmente, al definir la clasificación de una red geodésica, se puntualizará cuál equipo se utilizará en la medición y captura de datos, conjuntamente con el método de medición y bajo qué parámetros se definirá al procesamiento de los datos obtenidos en campo.

1.8. APOYO FOTOGRAMÉTRICO

Un punto de control o también llamado de apoyo fotogramétrico, es un punto en tierra del cual se conoce su posición respecto a un sistema de referencia que se puede utilizar como guía (Cruz, 2008). Para la elaboración de cartografía por medio de fotogrametría es necesario el apoyo terrestre, ya que con este se define las características geométricas del terreno con respecto a las dimensiones de las fotografías. Para esto es necesario un trabajo en gabinete y otro en campo con equipos de alta precisión con el fin de determinar la posición de puntos de terreno cuyo homologa se encuentra en las imágenes (Vite, 2005).

Pérez, J. en su libro “Apuntes de Fotogrametría III” del año 2001, menciona que para un mayor control en la corrección plani-altimétrica de las imágenes, es necesario establecer 5 puntos de apoyo distribuidos en las esquinas y uno en el centro (Ver Figura N°4), con la finalidad de obtener una mejor precisión.

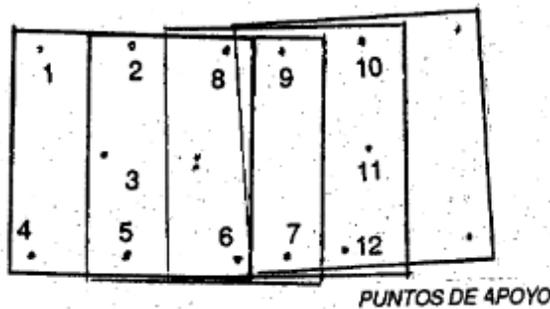


Figura N°4: Distribución de puntos de apoyo en un modelo estereoscópico
Fuente: Lerma, 2002

Según Vite, 2005 Las siguientes son las etapas a seguir para la planificación y ejecución de puntos de apoyo utilizando GPS:

1.8.1. Planificación en Gabinete

Para una correcta planificación se recomienda identificar a detalle las zonas de interés, por medio de técnicas de sensores remotos, para determinar la topografía del terreno y vías de acceso para la toma de los puntos. Para la selección de los mismos se debe procurar que estos sean claramente identificables en la fotografía o imagen, así



MINISTERIO DE
DEFENSA
NACIONAL



INSTITUTO
GEOGRÁFICO
MILITAR

como una correcta distribución de los mismo en esquinas de amarres del par estereoscópico (Lerma, 2002).

1.8.2. Identificación en terreno de los puntos planificados

Para esta etapa en campo es necesario recurrir a material y equipo como: fotografías del área de interés, GPS, estaciones totales, foto índice, etc. Para poder llegar a lo planificado en gabinete.

“El objetivo de esta fase es la visualización y reconocimiento del terreno para buscar los lugares marcados en las fotografías e ir identificando los lugares más apropiados para fijar los puntos o estaciones tanto en el terreno como en las fotografías.” (Vite, 2005)

Se procura que los puntos identificados tanto en el terreno como en la fotografía sean reconocidos fácilmente; para esto se puede considerar Cruces de veredas, Esquinas de cercas; rocas aisladas y otros objetos que sean perfectamente visibles (Ver Figura N°5) (Vite, 2005).

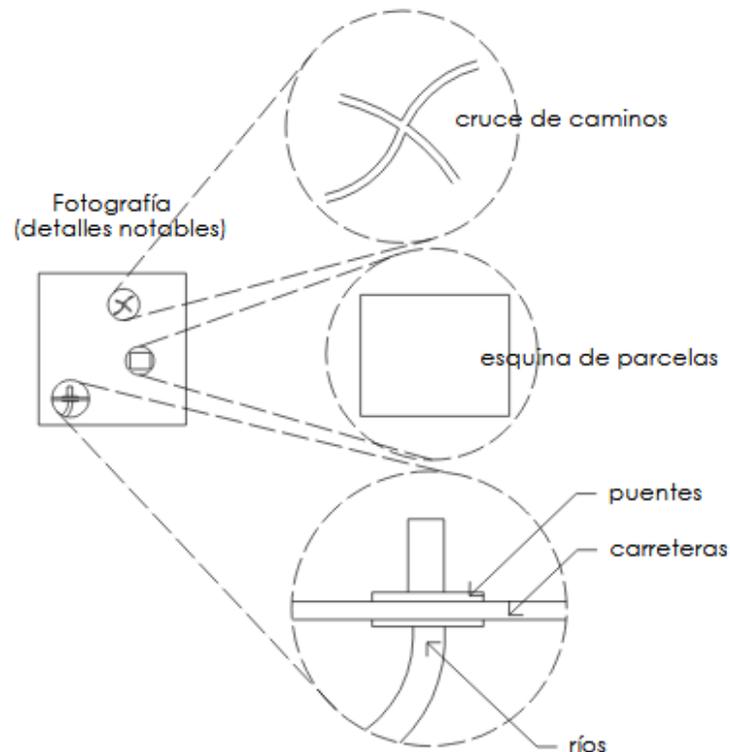


Figura N° 5: Objetos considerados en campo para apoyo fotogramétrico

Fuente: vite, 2005



MINISTERIO DE
DEFENSA
NACIONAL



INSTITUTO
GEOGRÁFICO
MILITAR

Finalmente, las precisiones que maneja el proceso de geodesia para los puntos de apoyo fotogramétrico están resumidos en la siguiente tabla:

Tabla 2.- Precisiones de los puntos de apoyo fotogramétrico

| Apoyo Fotogramétrico | | | | | |
|----------------------|--|--|--------------|----------------------------------|---------|
| Clasificación | Criterios Post-Proceso y ajuste GNSS * | | | Exactitud admitida en Horizontal | Escalas |
| Puntos de Apoyo | Ph | $\leq 0,005 \text{ m} \pm 1 \text{ ppm}$ | Nv: un sigma | $\leq 5 \text{ cm}$ | 1:500 |
| | Pv | $\leq 0,010 \text{ m} \pm 2 \text{ ppm}$ | | | |
| | Ph | $\leq 0,050 \text{ m} \pm 1 \text{ ppm}$ | Nv: 95% | $\leq 10 \text{ cm}$ | 1:1000 |
| | Pv | $\leq 0,100 \text{ m} \pm 1 \text{ ppm}$ | | $\leq 50 \text{ cm}$ | 1:5000 |
| $\leq 2,5 \text{ m}$ | | | | 1:25000 a menores | |

***Nota:** Los parámetros establecidos son los estándares de calidad que maneja el proceso de Geodesia para el Post-Proceso de datos GNSS. La toma de puntos en campo se realiza por métodos de posicionamiento relativos enlazados a una línea base que contenga mínimo dos estaciones de monitoreo GNSS.



MINISTERIO DE
DEFENSA
NACIONAL



INSTITUTO
GEOGRÁFICO
MILITAR

GEODESIA

Manual de
Especificaciones
Técnicas

Levantamientos Geodésicos
Control Vertical



MINISTERIO DE
DEFENSA
NACIONAL



INSTITUTO
GEOGRÁFICO
MILITAR

CAPITULO 2: CONTROL VERTICAL

2.1. PRECEPTOS TEÓRICOS PARA EL CONTROL VERTICAL

De forma análoga a la estructura geodésica necesaria para realizar el Control Horizontal, la componente vertical también requiere de la definición de un Sistema de Referencia y su correspondiente materialización para la determinación de alturas. Los Sistemas de Referencia Verticales Locales (SVRLs) o clásicos, en general referidos a una referencia local (i.e. Nivel Medio del Mar), presentan discrepancias entre si que pueden alcanzar el orden métrico. Estas discrepancias dificultan o impiden la realización de trabajos para los cuales se requiere el conocimiento de la componente vertical a nivel regional o global. Además, es importante señalar que mayoritariamente estos SVRLs no consideran los efectos del campo de gravedad terrestre y consecuentemente las alturas a ellos asociadas carecen de características físicas.

La Asociación Internacional de Geodesia (*International Association of Geodesy - IAG*), establece los lineamientos para la unificación de los SVRL y la definición de un Sistema Vertical de Referencia Global (SVRG) denominado *International Height Reference System (IHR)* y su correspondiente materialización *International Height Reference Frame (IHRF)*. En las siguientes secciones se detalla los principales fundamentos teóricos y normas establecidos por la IAG para la definición y materialización del IHR.

2.2. INTERNATIONAL HEIGHT REFERENCE SYSTEM (IHR)

En julio del año 2015, durante la Asamblea General de la IUGG, la IAG publicó la resolución para la definición del IHR. Según la resolución, la definición del IHR es dada en términos de parámetros de geopotencial, siendo las coordenadas verticales números geopotenciales referidos a una superficie equipotencial del campo de gravedad terrestre realizada por un valor convencional global W_0 , los métodos utilizados para el cálculo de W_0 son detallados en Sánchez et al., (2016). El establecimiento del IHR atiende los requerimientos del GGOS, que según sus términos de referencia debe:

- Apoyar una precisa (al nivel centimétrico) combinación de altitudes físicas y geométricas a escala global;
- Permitir la unificación de los DVLs existentes, y;
- Garantizar coordenadas verticales con consistencia global (la misma exactitud en todo lugar) y estabilidad de largo periodo (la misma orden de exactitud en todo instante) (Sánchez y Sideris, 2017).



MINISTERIO DE
DEFENSA
NACIONAL



INSTITUTO
GEOGRÁFICO
MILITAR

El IHRS permitirá la unificación de los SVRL y como consecuencia el monitoreo con consistencia global de fenómenos planetarios como el cambio climático, elevación del nivel del mar, variaciones (relacionadas con cambios globales) en la componente vertical de la superficie terrestre y del campo de gravedad, entre otros aspectos relevantes. Considerando que las altitudes elipsoidales no son plenamente adecuadas para el estudio de fenómenos relacionados con el campo de gravedad terrestre, las altitudes físicas del IHRS (referidas a una superficie de nivel global), pueden ser utilizadas en varias aplicaciones del ámbito científico y práctico, como, por ejemplo: control y prevención de inundaciones, análisis de circulación oceánica, investigaciones en regiones costeras, etc. (Ihde *et al.*, 2015). Se destaca que series temporales de altitudes elipsóidicas son ampliamente empleadas actualmente para el modelamiento de variaciones temporales y análisis de fenómenos cíclicos y seculares en posiciones verticales.

El establecimiento del IHRF presupone el conocimiento de las discrepancias presentes entre los DVLs en relación a una superficie de referencia global. Estas discrepancias, conforme ya se ha referido, pueden implicar en TNMM de hasta ± 2 m (Heck y Rummel, 1990). La TNMM es causada por variaciones en la presión atmosférica (efecto del barómetro inverso), y por la Topografía Dinámica del Océano (TDO) relacionada con la circulación oceánica (Tapley, B.; KIM, 2001) que implican en efectos permanentes configurados por el equilibrio geostrofico. Cada DVL está referido a una superficie equipotencial particular (W_{oi}) asociada al NMM en el mareógrafo en una determinada época. W_{oi} , en general, no coincide con una superficie equipotencial global W_o (Bosch, 2002).

El IHRS, al contrario de los SVRNs o locales, dispone de una referencia única (definida en función del campo de la gravedad terrestre) para la determinación de altitudes físicas. La materialización del IHRS y la consideración de los aspectos implícitos GGRF implican en la modernización de los SVRNs de forma que permiten la determinación y combinación precisa de altitudes elipsoidales y de carácter geométrico, relativos al elipsoide de referencia, y las físicas obtenidas a partir de los números geopotenciales y referidos al geoide o cuasi geoide (IAG, 2016).

La determinación de altitudes físicas en el contexto de un IHRS presupone la definición de una superficie de referencia y cálculo de desniveles en función del geopotencial. Esta determinación necesita de la combinación de la componente física asociada al geopotencial y de la componente geométrica asociada al modelo elipsoidal de la Geodesia. El GGOS de la IAG busca la integración global de estas dos



MINISTERIO DE
DEFENSA
NACIONAL



INSTITUTO
GEOGRÁFICO
MILITAR

componentes. El IAG propone la geometría, rotación y el campo de gravedad terrestre como los tres pilares fundamentales de la Geodesia; por lo tanto, el principal objetivo del GGOS es implementar un Sistema Global que sea capaz de determinar y monitorear las variables geométricas y físicas vinculadas a estos tres componentes fundamentales (Plag y Pearlman, 2009).

Las coordenadas de un polo localizado en la superficie de la Tierra son dadas por:

- valores de geopotencial $W(X)$ (y sus cambios en el tiempo $dW(X)/dt$) definidos dentro del campo de gravedad de la Tierra,
- coordenadas cartesianas X (y sus cambios en el tiempo dX/dt) referidas al ITRS. Para propósitos prácticos, los valores de geopotencial pueden ser transformados en números geopotenciales C_P y las coordenadas geocéntricas en altitudes elipsoidales h (Ihde *et al.*, 2017).

2.3. COMPONENTE GEOMÉTRICA DEL IHRS

La realización de la componente geométrica del IHRS tiene relación con el ITRS/ITRF, como se menciona en la sección anterior. Un elipsoide de nivel convencional es usado como superficie de referencia ($U_0 = \text{constante}$) y como coordenadas las altitudes elipsoidales (h) referidas al ITRS/ITRF.

Un SGR establece los parámetros que definen el modelo de la Tierra Normal, los parámetros elipsoidales (constante gravitacional geocéntrica GM , el semieje mayor a , el factor dinámico de forma J_2 y la velocidad angular media de rotación de la Tierra ω) son actualizados cuando nuevas y más exactas observaciones y modelos están disponibles.

En 1967, la IUGG, la IAG y la *International Astronomical Union* (IAU) resuelven adoptar como SGR el *Geodetic Reference System 1980* (GRS80) (Moritz, 1980) sustituyendo el *GRS67* (adoptado en 1967 en la Asamblea General de la IUGG en Luzern). Las convenciones 2010 del *International Earth Rotation and Reference Systems Service* (IERS) de la IAG, proporcionan una lista de estándares numéricos y parámetros asociados y recomienda el uso del GRS80 para transformación de coordenadas (coordenadas cartesianas ITRF a coordenadas elipsoidales ITRF) (Gérard e Luzum, 2010). El GRS80 también es utilizado ampliamente en las proyecciones cartográficas, cálculo de anomalías gravimétricas y cálculo de altitudes normales.

Los parámetros de las convenciones del IERS del año 2010 representan actualmente los mejor estimados, estos parámetros para el elipsoide de nivel no han cambiado



desde 2003. La Tabla N°2 contiene los parámetros para el GRS80 y los parámetros de las convenciones 2010 del IERS (Ihde *et al.*, 2017).

Tabla N° 2: PARÁMETROS ELIPSOIDALES

| Parámetros del elipsoide | GRS80 | Convenciones del IERS 2010 |
|---|------------------------------|---------------------------------|
| a (m) | 6378137 | 6378136,6 ** ± 0,1 |
| J ₂ | 108263 x 10 ⁻⁸ * | 108263,59 x 10 ⁻⁸ ** |
| GM (m ³ s ⁻²) | 3986005 | 3986004,418 ± 0,008 |
| U ₀ / W ₀ (m ² s ⁻²) | 62636860,850 | 62636856,0 ± 0,5 |
| γ _e (ms ⁻²) | 9,7803267715 | |
| ω _e rad/s | 7292115 x 10 ⁻¹¹ | |
| * Valor em <i>tide-free</i> | ** Valor em <i>zero-tide</i> | |

Fuente: Ihde et al. (2017)

2.4. COMPONENTE FÍSICA DEL IHRS

La componente física del IHRS tiene que considerar una superficie de referencia física para la definición de altitudes. Las diferencias de nivel son establecidas en forma de números geopotenciales que pueden ser convencionalmente transformados en altitudes ortométricas o altitudes normales, según la superficie de referencia utilizada: geoide o cuasi geoide, respectivamente (De Freitas, 2015).

Según Sánchez y Sideris (2017), la red de referencia del IHRS debe incluir estaciones GGOS, mareógrafos nacionales relacionados con valores de geopotencial y puntos del ITRF. Cada estación IHRF debe tener conexión con el ITRF, preferencialmente con estaciones de monitoreo continuo. Para que no sea necesario el uso de hipótesis en las realizaciones del IHRS, el potencial anómalo debe ser determinado con base en el PVCG según la teoría de Molodensky en cada estación IHRF.

2.5. CONVENCIONES PARA LA DEFINICIÓN Y REALIZACIÓN DEL IHRS

Las convenciones para la definición del IHRS son (IAG, 2015): El nivel vertical de referencia es definido como una superficie equipotencial del campo de gravedad terrestre con valor de geopotencial W_0 . Parámetros, observaciones y datos deben estar referidos al sistema *mean tide (mean crust)*. La unidad de medida es el metro y la unidad de tiempo es el segundo (SI). La coordenada vertical de un punto P conocida como número geopotencial es definido como la diferencia del geopotencial del punto (W_p) y el geopotencial de referencia (W_0). La referencia espacial de la posición P ara el



MINISTERIO DE
DEFENSA
NACIONAL



INSTITUTO
GEOGRÁFICO
MILITAR

potencial (W_p), está referida a las coordenadas ITRF. El valor de geopotencial del nivel de referencia vertical para el IHRF es: $W_0 = 62\,636\,853,4 \text{ m}^2\text{s}^{-2}$.

2.6. INTERNATIONAL HEIGHT REFERENCE FRAME (IHRF)

La realización de la componente física del IHRF debe ser efectuada en términos de valores de geopotencial y estar libre de hipótesis y ambigüedades. Las coordenadas del IHRF son los números geopotenciales, de tal manera que la transformación de los números geopotenciales en altitudes físicas y la vinculación geométrica de la superficie de referencia deber ser materia de la realización y no de la definición. Esto es importante para desvincular de geoides locales esta nueva realización. Para la realización de la componente física, es necesario la adopción de W_0 , determinación de valores locales de W_{0i} , y la determinación de sus diferencias que se traducen en la forma (Ihde, Sánchez y Sideris, 2010):

$$\delta W = W_0 - W_{0i} \quad (1)$$

Esta discrepancia es calculada mediante comparación del valor de W_0 definido por la IAG y el geopotencial en el punto *datum* (W_0^i), siendo que el W_0^i es calculado en función de los datos gravimétricos y valores normales vinculados al GRS80. Geométricamente W_0^i guarda una diferencia de potencial relativamente a W_0 . La distancia geométrica entre las respectivas superficies equipotenciales en el punto considerado es obtenida dividiendo la diferencia del potencial por el valor de la gravedad normal para la latitud del punto considerado.

2.7. CONVENCIONES PARA LA REALIZACIÓN DEL IHRF

Según describe Ihde et al., (2017), el IHRF será realizado mediante la combinación de una red global de estaciones, un MGG y un conjunto de parámetros. El establecimiento del IHRF obedece a las siguientes convenciones:

El geopotencial de referencia W_0 , es determinado mediante el cálculo de mejores estimativas. El procedimiento seguido para la determinación de W_0 debe ser documentado para que pueda ser replicado.

Un elemento fundamental del IHRF es un MGG. Según Rummel et al., (2014), la exactitud media esperada utilizando MGGs de alta resolución (e.g. EGM2008 (Pavlis *et al.*, 2012), o EIGEN-6C4 (Förste *et al.*, 2014) para la estimación de cantidades del geopotencial, es de aproximadamente ± 40 a $\pm 60 \text{ cm}^2\text{s}^{-2}$ (± 4 a $\pm 6 \text{ cm}$) en regiones con una densa y homogénea distribución de información gravimétrica *in situ*, y de aproximadamente ± 200 a $\pm 400 \text{ cm}^2\text{s}^{-2}$ (± 20 a $\pm 40 \text{ cm}$), con casos extremos de ± 10



MINISTERIO DE
DEFENSA
NACIONAL



INSTITUTO
GEOGRÁFICO
MILITAR

m^2s^{-2} ($\pm 1m$), en regiones con distribución dispersa de datos gravimétricos. La confiabilidad de los MGGs con grado de expansión en armónicos esféricos superior a 300 decrece drásticamente en regiones con escasa densidad de información gravimétrica. Adicionalmente, la aplicación de diferentes patrones, convenciones y procedimientos para la estimación de los coeficientes armónicos, hacen que existan grandes discrepancias en las cantidades del geopotencial derivadas de diferentes MGGs. En este contexto, y visando una aproximación homogénea del campo de gravedad terrestre para la realización del IHRS, es recomendable la elección de un MGG solamente satelital, complementando con información oriunda de la altimetría por satélite, gravimetría aerotransportada, gravimetría terrestre y gravimetría oceánica.

La discrepancia ($-\Delta W_P$) en relación al valor convencional W_0 debe ser conocida para una red de estaciones geodésicas.

La red de referencia de la realización del IHRS debe seguir la misma jerarquía de la red de referencia del ITRF, i.e., una red global con densificaciones regionales y nacionales.

La red IHRF debe ser colocada con: mareógrafos (DVLs), puntos nodales de las redes de nivelación, referencias de nivel de conexión entre redes de nivelación referidas a diferentes DVLs, estaciones de referencia geométricas (ITRF y densificaciones), observaciones geodésicas fundamentales (conexión entre W_0 , Tiempo Atómico Internacional (TAI) y gravimetría absoluta).

Las estaciones del IHRF, referidas en las convenciones para la materialización del IHRS, tienen que cumplir con las siguientes condiciones fundamentales:

- Estar continuamente monitoreadas para detectar deformaciones de la red de referencia.
- Estar referidas al ITRS/ITRF para conocer de forma exacta sus coordenadas geométricas.
- Estar conectadas por nivelación con el DVL para conocer con exactitud sus números geopotenciales.
- El geopotencial (W_P) debe ser estimado en las estaciones ITRF con una exactitud de $1 \times 10^{-2} m^2 s^{-2}$ mediante la combinación de un MGG con densificaciones gravimétricas *in situ*.



MINISTERIO DE
DEFENSA
NACIONAL



INSTITUTO
GEOGRÁFICO
MILITAR

Es necesario que la información utilizada sea estandarizada (sistema de marea, época de referencia, campo de gravedad de referencia para la solución del PVMG). La homogeneización de los referenciales será tratada en las próximas secciones.

2.8. DATUM Y SISTEMA GRAVIMÉTRICO DE REFERENCIA

Un *datum* gravimétrico es establecido mediante una red de estaciones fundamentales o de referencia establecida por instrumentos calificados dentro de la precisión requerida, calibrada e intercomparado en una misma base. Este concepto está vigente en la actualidad substituyendo el concepto clásico del punto *datum*. El *datum* gravimétrico internacional es fundamental para la determinación del campo de gravedad terrestre y sus variaciones, y por lo tanto, materializado mediante una red gravimétrica de precisión con sus estaciones distribuidas en el planeta (Lu, Qu y Qiao, 2014). *Data* gravimétricos internacionales clásicos son ejemplificados por el Sistema Gravimétrico de Viena (SGV) de 1900, el Sistema Gravimétrico Potsdam (SGP) de 1909, el *International Gravity Standardization Net* de 1971 (IGSN71), y el *International Absolute Gravity Base Network* 1987 (IAGBM), estos dos últimos aún están en uso y en fase de sustitución por el *Global Absolute Gravity Reference System* (GAGRS) establecido por la Resolución 2/2015 da IAG (*Establishment of a global absolute gravity reference system*) (Drewes *et al.*, 2016).

El SGV fue adoptado en la conferencia de la IAG en París en el año de 1900, considerando como *datum* el valor gravimétrico determinado en el Observatorio de Viena (Austria) en 1884 mediante observaciones de gravimetría absoluta realizadas con péndulo reversible y alcanzando una precisión de $\pm 10 \times 10^{-5} \text{ ms}^{-2}$ en la determinación gravimétrica (Lu, Qu y Qiao, 2014).

En 1909 el SGP fue introducido por la IAG para sustituir al SGV y estaba basado en observaciones pendulares realizadas en el Instituto Geodésico de Potsdam, con una precisión estimada $\pm 3 \times 10^{-5} \text{ ms}^{-2}$ en la determinación gravimétrica. Casi todos los países adoptaron el *datum* gravimétrico de Potsdam el cual fue utilizado por 60 años, mientras tanto, nuevas observaciones gravimétricas absolutas y relativas realizadas desde 1930 revelaron que el valor gravimétrico de Potsdam tiene un error sistemático de de $12 \times 10^{-5} \text{ ms}^{-2}$ a $16 \times 10^{-5} \text{ ms}^{-2}$, (Torge e Müller, 2012). Fue en este contexto, que en 1967 la IAG decidió aumentar al SGP una corrección de $-14 \times 10^{-5} \text{ ms}^{-2}$. Este valor utilizado para corregir el error sistemático del *datum* Potsdam fue confirmado mediante una nueva determinación de gravedad absoluta en el origen del Potsdam con una precisión de $\pm 0,3 \times 10^{-5} \text{ ms}^{-2}$. El resultado de esta observación poseía una



MINISTERIO DE
DEFENSA
NACIONAL



INSTITUTO
GEOGRÁFICO
MILITAR

discrepancia de $\pm 13,9 \times 10^{-5} \text{ ms}^{-2}$ con relación a la determinación gravimétrica original (Lu, Qu y Qiao, 2014).

En la 15ª Asamblea General de la IUGG en Moscú en el año 1971, fue tomada la resolución de sustituir el SGP por el IGSN71, que ya estaba basado en una red gravimétrica de referencia, recomendado por la IUGG (Morelli *et al.*, 1974), siendo este el nuevo *datum* gravimétrico internacional. El IGSN71 está compuesto por una red de 1854 estaciones gravimétricas (de las cuales aproximadamente 500 son estaciones primarias), determinadas por el ajuste de 10 observaciones de gravedad absoluta y 25000 observaciones de gravedad relativa, alcanzando una precisión en la determinación gravimétrica de $\pm 0,1 \times 10^{-5} \text{ ms}^{-2}$ (Torge e Müller, 2012).

Las observaciones gravimétricas referidas al IGSN71 incluyen una corrección conocida como el término de Honkasalo, este término remueve la media de las fuerzas de marea y está considerado inapropiado porque cuando se utilizan registros gravimétricos afectados por esta corrección (en procesos como el cálculo del geoide), se obtiene resultados erróneos (Heikkinen, 1979). La IAG recomienda remover el término de Honkasalo (Δg_H) de los registros gravimétricos referidos al IGSN71 (Uotila, 1980) de acuerdo con la ecuación (2).

$$\Delta g_H = 0,0371(1 - 3\text{sen}^2 \varphi) \text{mGal} \quad (2)$$

Donde φ es la latitud de la estación gravimétrica.

Aunque la IGSN71 sea reconocida como el *datum* gravimétrico internacional, muchos países han implementado sus redes gravimétricas fundamentales sin referirse a las observaciones del *datum* global IGSN71.

Considerando que la exactitud de las observaciones gravimétricas ha mejorado considerablemente desde el establecimiento del IGSN71, que actualmente la precisión requerida para el estudio de cambios en el campo de gravedad terrestre está en el orden de algunos μGal ($1 \mu\text{Gal} = 10^{-8} \text{ ms}^{-2}$, y considerando que las observaciones de los gravímetros absolutos contienen errores sistemáticos, es fundamental que los diferentes *data* gravimétricos absolutos existentes sean unificados (Lu, Qu y Qiao, 2014).

El establecimiento del IAGBM como nuevo *datum* gravimétrico (en sustitución del IGSN71) fue discutido en la 18ª Asamblea General de la IUGG en 1983. La necesidad



MINISTERIO DE
DEFENSA
NACIONAL



INSTITUTO
GEOGRÁFICO
MILITAR

de implementar un nuevo sistema gravimétrico de referencia surgió en vista de las mejoras conseguidas en la precisión de las observaciones gravimétricas y teniendo como principal objetivo el monitoreo de las variaciones temporales de la gravedad con una precisión esperada de $\pm 0,01 \times 10^{-5} \text{ ms}^{-2}$. Durante la 19ª Asamblea General de la IUGG (Vancouver, 1987), fue propuesto el inicio del establecimiento del IAGBM, aunque casi todas las estaciones han sido observadas una o más veces, algunos inconvenientes impidieron la implementación total del programa (Lu, Qu y Qiao, 2014).

La exactitud del IGNS71 es dos o tres órdenes inferior a la exactitud actual de las mediciones gravimétricas absolutas y sus subproductos (JIANG et al., 2012), sin embargo, el IGSN71 es utilizado aún como Sistema Gravimétrico de Referencia Internacional (SGRI). La resolución para apoyar la implementación de una nueva red gravimétrica de referencia, de acuerdo con los actuales niveles de exactitud de las mediciones gravimétricas, fue formulada por la IAG durante la Asamblea General de la IUGG en 2015 (DREWES et al., 2016). Esta resolución propone la implementación de un sistema de referencia gravimétrico global, para lo cual establece como actividades futuras la determinación de estándares, convenciones y procedimientos para definir y realizar un nuevo sistema gravimétrico de referencia (Ihde *et al.*, 2017).

Según Drewes, et al. (2016), la resolución para la implementación del *Global Absolute Gravity Reference System* (GAGRS) fue establecida considerando que el estudio de las variaciones temporales del campo de gravedad es uno de los elementos clave para el entendimiento de los cambios globales; que la exactitud de los gravímetros absolutos han mejorado significativamente; que las observaciones de gravimetría absoluta son una herramienta fundamental para el monitoreo de deformaciones de la corteza y transporte de masas; que nuevos principios de observación e instrumentos como interferómetros de átomo frío y relojes ultra precisos están en etapa de preparación y prueba; que observaciones gravimétricas modernas deben estar basadas en las convenciones métricas internacionales; que comparaciones internacionales de gravímetros absolutos con el auspicio del *International Committee for Weights and Measures* (CIPM), definen la mejor realización metrológica; y que las observaciones gravimétricas absolutas son archivadas y distribuidas en escala global conforme las normas internacionales por el BGI junto con la *Federal Agency for Cartography and Geodesy* (BKG) y con el auspicio de la IAG.

La resolución de la IAG también señala:



MINISTERIO DE
DEFENSA
NACIONAL



INSTITUTO
GEOGRÁFICO
MILITAR

- Que la IGSN71 no cumple con los requerimientos y exactitud de una referencia gravimétrica moderna y debe ser sustituida por un moderno sistema gravimétrico absoluto global.
- Que la exactitud en las observaciones gravimétricas ha mejorado hasta el nivel de pocos μGal .
- Que solamente con un sistema gravimétrico de referencia mejorado, las variaciones de la gravedad dependientes del tiempo pueden ser determinadas con alta confiabilidad.
- Que el uso de normas (estándares) consistentes y convenciones es necesario para la comparación de observaciones geométricas y gravimétricas en la estructura del GGOS.

Y establece:

- Adoptar como la base metrológica para gravimetría absoluta el Documento Estratégico: *Strategy for Metrology in Absolute Gravimetry, Role of CCM and IAG*; elaborado por la IAG y el *Consultative Committee for Mass and related quantities (CCM)* (Marti *et al.*, 2015).
- Iniciar un grupo de trabajo para compilar normas para la definición de un sistema de referencia gravimétrico geodésico basado en comparaciones internacionales de gravímetros absolutos.
- Establecer una red de referencia gravimétrica con estaciones de referencia distribuidas globalmente y vinculadas a la comparación internacional de gravímetros absolutos.
- Vincular las estaciones de referencia gravimétricos al ITRS mediante colocación con técnicas geodésicas espaciales.
- Iniciar la sustitución del IGSN71 y de las últimas estaciones por el nuevo GAGRS.

2.9. SUPERFICIES DE NIVEL

Las superficies de nivel o equipotenciales, definidas por todos aquellos puntos con igual geopotencial $W(x, y, z) = \text{constante}$, junto con las líneas de campo (o de plomada), representan geoméricamente el campo de la gravedad (Torge e Müller, 2012). Se define como vertical de un punto en una superficie de nivel a la línea perpendicular a dicha superficie y determinada por la dirección del vector de gravedad en el punto. La dirección vertical puede ser expresada vectorialmente por $\vec{\eta} = -\vec{g}/|\vec{g}|$.

Una superficie equipotencial es aquella que atiende la condición dada por la ecuación (3):



$$dW = \text{grad}W \cdot d\vec{x} = \vec{g} \cdot d\vec{x} = 0 \quad (3)$$

La ecuación (22) presenta en notación vectorial el producto escalar del vector gravedad y el vector $d\vec{x}$ a lo largo de la superficie equipotencial, para que la condición de la Ecuación 14 sea atendida, los vectores \vec{g} e $d\vec{x}$, tienen que ser ortogonales (Hofmann-Wellenhof e Moritz, 2006).

Las superficies equipotenciales del campo de gravedad terrestre constituyen una referencia natural para la determinación de altitudes físicas. Según Gemael (2012), las superficies equipotenciales del campo de gravedad son denominadas de geopes, y el geope fundamental es el geoide ($W=W_0=\text{constante}$). El geoide, como superficie equipotencial fundamental fue propuesta por C.F. Gauss y Listing como “la figura matemática de la Tierra” con potencial W_0 que mejor se ajusta en el sentido de los mínimos cuadrados al Nivel Medio del Mar (NMM) según la ecuación (4) (Heck, 2004):

$$\int_S (W - W_0)^2 ds = \min \quad (4)$$

En la cual S representa la superficie del NMM, y ds cada elemento de la superficie con potencial W . El geoide es considerado como la superficie fundamental de la Geodesia Física (Hofmann-Wellenhof e Moritz, 2006).

El NMM no es una superficie equipotencial. Varios factores como variaciones de temperatura, variaciones de presión, salinidad, vientos, corrientes, rotación terrestre, etc., influyen los océanos. Por lo tanto, el NMM determinado en diferentes mareógrafos, varía dependiendo de sus condiciones particulares. La separación entre el NMM y una superficie equipotencial escogida como el Nivel del Mar Patrón (NMP) y que puede ser asociado al definido por Gauss-Listing, es conocido como TNMM y presenta valores de 1-2 m en escala global (Lu, Qu e Qiao, 2014b).

Conforme lo explicado por Sansó y Sideris (2013), el geoide puede ser definido en función de un valor convencional para W_0 y posteriormente se debería encontrar un punto sobre la superficie equipotencial arbitrada, o también definido en primer lugar el punto y después determinado el valor de W para este punto.

2.10. GRAVIMETRÍA

La gravimetría está constituida por un conjunto de técnicas que tiene la finalidad de determinar el campo de gravedad terrestre, debido a una desigual repartición de



MINISTERIO DE
DEFENSA
NACIONAL



INSTITUTO
GEOGRÁFICO
MILITAR

masas en la corteza terrestre. Para conocer este campo de gravedad se deben realizar mediciones de la gravedad con diferentes tipos de gravímetros y metodologías que conduzcan a un establecimiento y materialización de redes gravimétricas de referencia. Dentro de las diferentes metodologías de medición encontramos mediciones absolutas y relativas las mismas que fueron realizadas en todo el mundo para alcanzar los propósitos anteriormente descritos. El Ecuador no es la excepción, algunas décadas atrás se realizaron múltiples trabajos gravimétricos llegando a establecer estaciones de referencia enlazadas a un dátum gravimétrico mundial (IGSN71), posteriormente, en base al sistema de referencia establecido, se realizaron campañas de campo para implementar la Red Gravimétrica Fundamental del Ecuador y posteriormente la Red Gravimétrica Absoluta del Ecuador (REGA-EC). (FLORES & POZO, 2016)

2.10.1. INTRODUCCIÓN

Uno de los objetivos fundamentales para el establecimiento de una red de gravimétrica es el de crear un marco de referencia de control para estudios gravimétricos aplicados en la geodesia, geofísica, geodinámica, etc. Hablamos de sistema de referencia gravimétrico como una definición convencional del valor de la gravedad y un marco de referencia gravimétrico a la materialización física de dicho sistema. Las redes de gravedad pueden ser globales, regionales o locales y su establecimiento está basado en etapas de diseño, medición (observaciones de gravedad absolutas y/o relativas), cálculo y compensación o ajuste.

El Instituto Geográfico Militar (IGM), encargado de la determinación y mantenimiento del sistema de referencia geodésico del país, estableció en los años 2002 y 2003 la Red Gravimétrica Fundamental del Ecuador, la misma que contó con apoyo del Instituto Brasileño de Geografía y Estadística (IBGE), de la Escuela Politécnica de la Universidad de Sao Paulo (UPSP) y del Instituto Oceanográfico de la Armada (INOCAR). Esta red está conformada por 41 puntos distribuidos homogéneamente en el país, fue medida con gravímetros relativos Lacoste & Romberg y densificada mediante valores relativos a través de un punto de orden superior como es el perteneciente a la Red Mundial IGSN71 ubicada en el subsuelo de Observatorio Astronómico de la ciudad de Quito. A partir de esta red se han realizado un sinnúmero de observaciones gravimétricas a lo largo del país, sobre todo la densificación sobre líneas de nivelación, ríos navegables de la Amazonía o mallas con equidistancia de 5 Km, así como y la generación de un banco de datos gravimétricos de aproximadamente 5000 puntos en el país. (FLORES & POZO, 2016)



MINISTERIO DE
DEFENSA
NACIONAL



INSTITUTO
GEOGRÁFICO
MILITAR

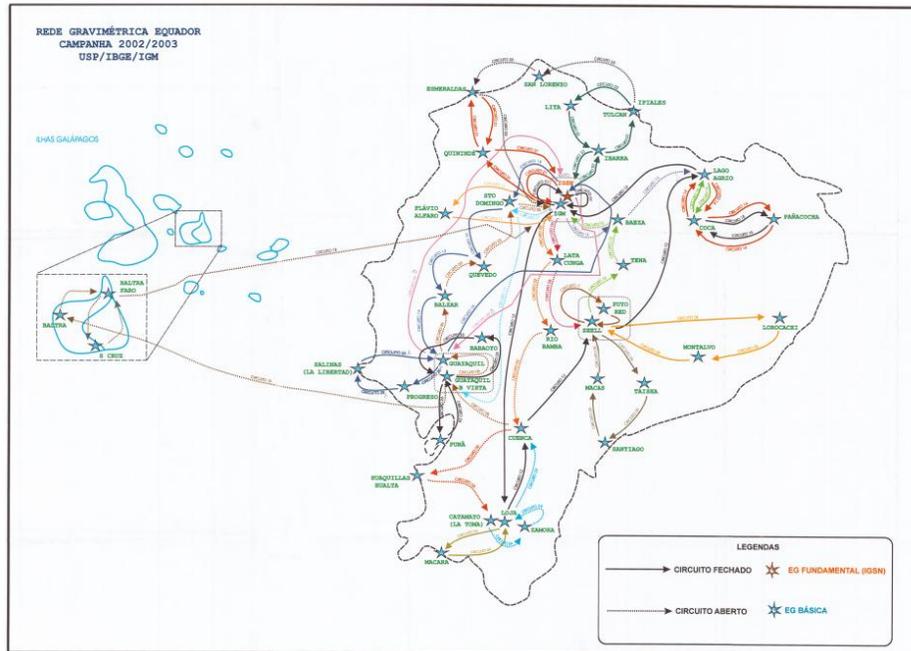


Figura N° 13: Circuitos de la Red Gravimétrica Fundamental del Ecuador

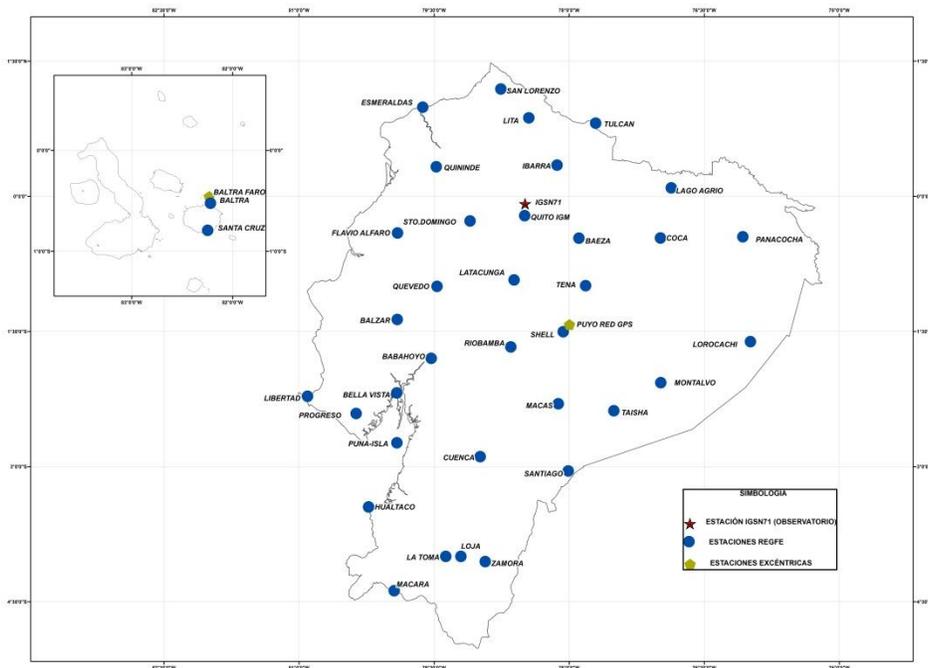


Figura N°14: Red Gravimétrica Fundamental del Ecuador



MINISTERIO DE
DEFENSA
NACIONAL



INSTITUTO
GEOGRÁFICO
MILITAR

En el año 2017 se estableció la Red Gravimétrica Absoluta del Ecuador, la misma que contó con el apoyo del Centro de Estudios Geodésicos (CENEGEO), Universidad Politécnica de Sao Paulo (EPUSP), Instituto Geográfico y Cartográfico de Brasil (IGC). La Red está conformada por 26 puntos distribuidos a lo largo del país, fue medida con un gravímetro absoluto A-10. A partir de esta Red se espera realizar el ajuste de los distintos trabajos que se realizaron en el pasado. (FLORES & POZO, 2016)

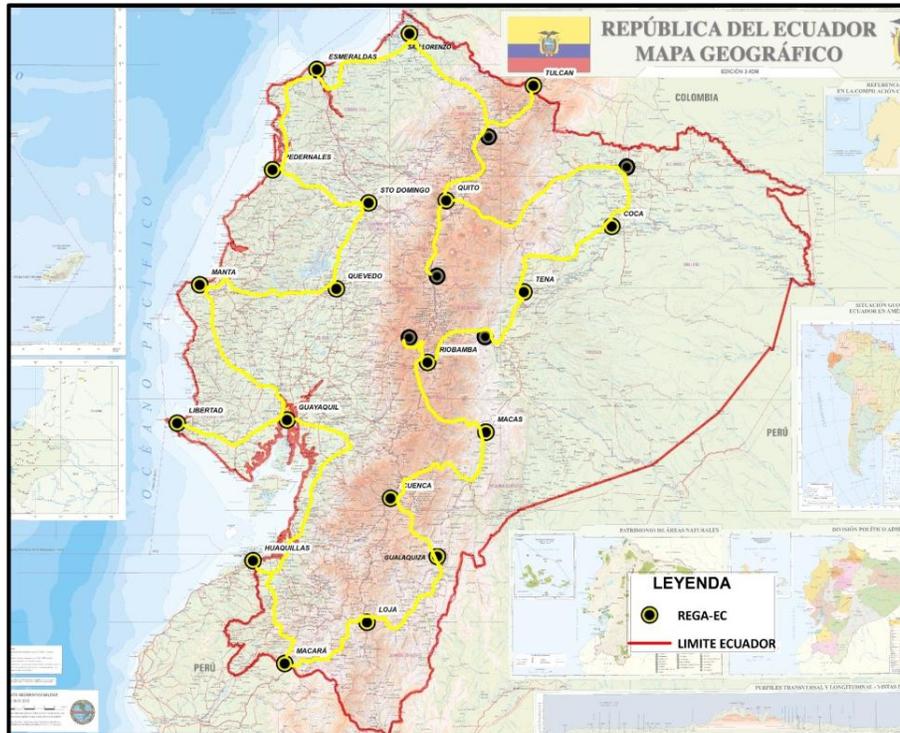


Figura N° 15: Red Gravimétrica Absoluta del Ecuador (REGA-EC)

2.11. NIVELACIÓN GEODÉSICA

A continuación, se presenta un extracto del Manual de Nivelación Geodésica (1970), Raúl Tapia (Ex funcionario del proceso de Geodesia del IGM) en conjunto con el Servicio Geodésico Interamericano.

2.11.1. INTRODUCCIÓN

El objetivo principal de la nivelación geodésica es establecer un sistema de control vertical de precisión que se pueda usar convenientemente para proporcionar elevaciones precisas en grandes extensiones de terreno, para uso en los varios estudios geográficos y científicos, y para suministrar marcas de cota fija como base para nivelación de precisión inferior usada en la confección de mapas topográficos.



MINISTERIO DE
DEFENSA
NACIONAL



INSTITUTO
GEOGRÁFICO
MILITAR

En el establecimiento de las redes de control vertical, el plano de referencia básica es el nivel medio del mar. El nivel medio del mar se establece por observaciones continuas durante varios años en estaciones mareográficas.

Para tener éxito al establecer control vertical de alta precisión en grandes extensiones de terreno, es esencial llevar a cabo el trabajo de campo con instrumentos de la más alta precisión, siguiendo métodos y sistemas de trabajo ya establecidos con el fin de disminuir la posibilidad de errores accidentales y de eliminar, en cuanto sea posible, los efectos acumulativos de los errores sistemáticos.

En el establecimiento de control vertical geodésico se utiliza una forma refinada de sistema de nivelación designada como nivelación referencial.

El proceso básico de la nivelación diferencial de equialtímetro se lleva a cabo en la forma siguiente:

Una mira, graduada en metros de abajo hacia arriba, se coloca en posición vertical sobre una marca de cota fija, o punto de elevación conocida o supuesta. La situación vertical de la mira se obtiene por medio de una burbuja circular que se encuentra detrás de esta. El instrumento está colocado a una distancia conveniente de la mira en la dirección de progreso. Después de nivelar el instrumento cuidadosamente, y apuntar y enfocar el telescopio sobre la mira, la línea visual horizontal del aparato, determinada por el hilo central del telescopio, atraviesa la mira colocada sobre la marca a una distancia arriba del punto cero de la mira. Esta distancia se puede determinar por una lectura sobre la mira en el punto donde se proyecta el hilo central. Por supuesto, esta lectura se hace con la línea visual del aparato perfectamente horizontal, dando por resultado una medida de la cantidad en metros por la cual la línea visual del aparato excede la elevación de la marca de cota fija; dicha medida se suma a la elevación de la marca para obtener la elevación del eje del instrumento.

Luego, si la misma mira u otra mira, se coloca en posición vertical a una distancia adelante del instrumento aproximadamente igual a la distancia entre el instrumento y la mira en la marca de cota fija, y se toma otra lectura horizontal sobre esta mira adelante, esta lectura será una medida de la cantidad en metros por la cual el punto donde se colocó la mira es más bajo que la línea visual horizontal del instrumento y si se resta esta lectura de visual adelante de la elevación del instrumento, se obtiene la elevación del punto donde se colocó la mira para la segunda lectura.



2.11.2. EJEMPLOS

Si se conoce la elevación de un punto "A", digamos que sea 235.152, (Véase figura 16), y se desea conocer la elevación de "B", se coloca un nivel entre los dos puntos y las miras en los puntos "A" y "B" de tal manera que estén perfectamente verticales y el instrumento perfectamente nivelado; las miras deben estar de tal manera que el cero de su graduación coincida con los puntos "A" y "B". Si al hacer la lectura sobre la mira "A" se lee 1.155, quiere decir que el centro óptico del instrumento se encuentra a esa altura con respecto al punto "A" o sea $235.152 + 1.155 = 236.307$. Conociendo la altura del instrumento se lee la mira "B" y se obtiene 1.832, lo que significa el punto "B" se encuentra a esa distancia más bajo que el centro óptico del instrumento, o sea: $236.307 - 1832 = 234.475$. Conociendo la altura del punto "B" se procede en forma similar para obtener la altura del punto "C" y así sucesivamente hasta el punto cuya elevación nos interesa. (Ver figura 17).

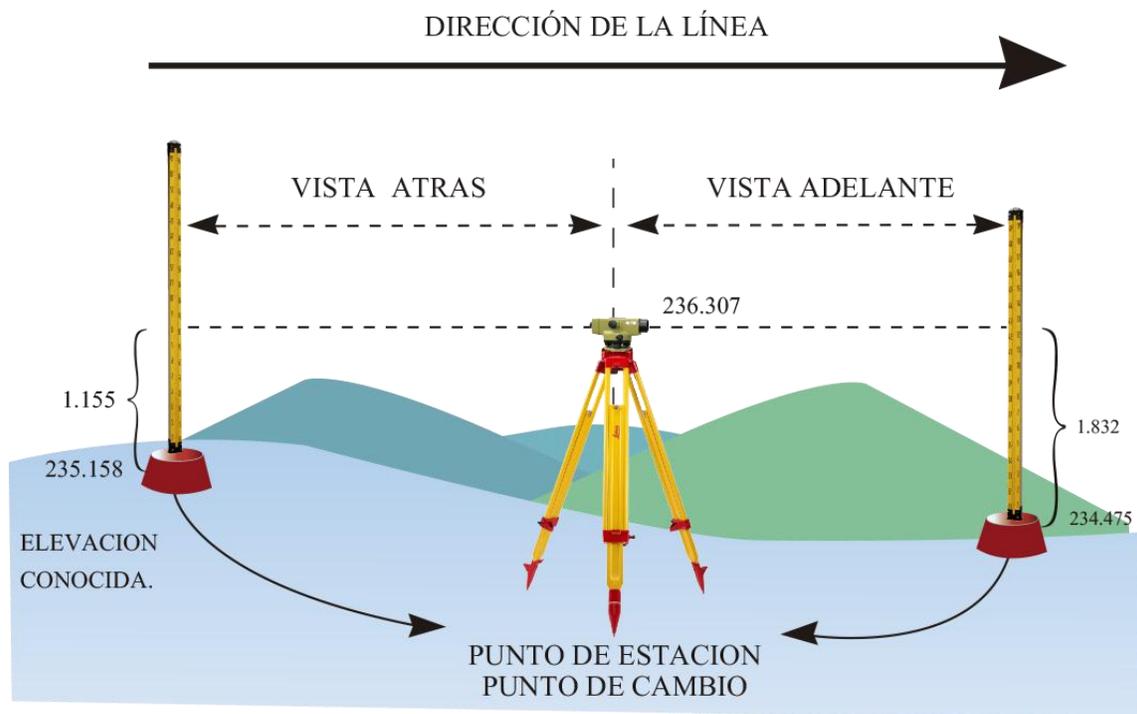


Figura N° 16: Esquema de nivelación básico.



MINISTERIO DE
DEFENSA
NACIONAL



INSTITUTO
GEOGRÁFICO
MILITAR

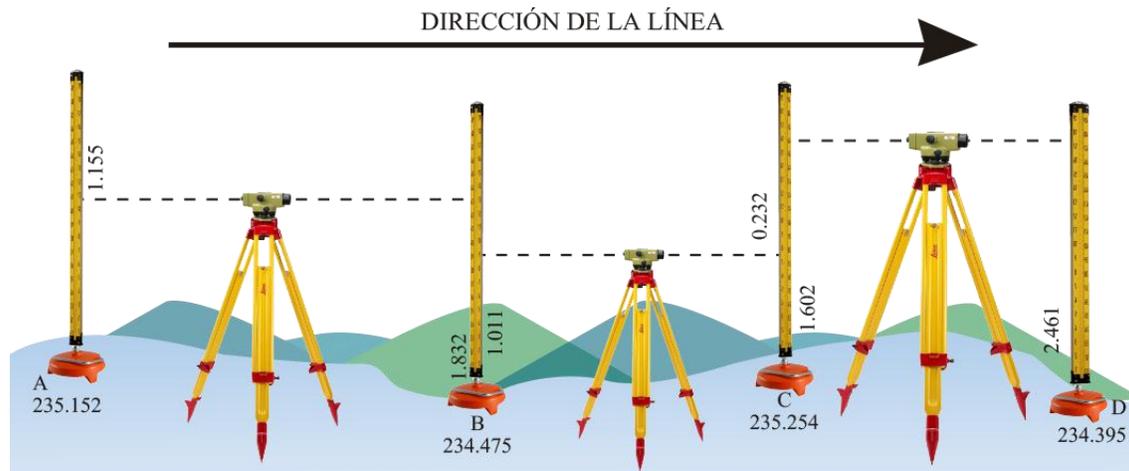


Figura N°17: Esquema de nivelación Normal.

A lo largo de estas líneas de nivelación se dejan unos discos de bronce u otro metal que se llaman MARCAS DE COTA FIJA, cuya elevación ha sido obtenida por el procedimiento explicado, y que sirven de elevaciones de partida para trabajos adicionales que requieren una elevación precisa.

Si el punto donde se coloca la mira no es una marca de cota fija, se le llama punto de cambio. Este punto de cambio se convierte en un punto de elevación conocida. Si el instrumento se coloca de nuevo más adelante del punto de cambio, y se repite la operación de lectura de miras, el segundo punto de cambio se convertirá en otro punto de elevación conocida, y servirá como base para la tercera colocación de instrumento.

Se repite esta operación hasta llegar a otra marca de cota fija, y se completa una nivelación entre las dos marcas de cota fija.

Normalmente, en la nivelación geodésica se requiere una renivelación entre las dos marcas en sentido opuesto, y esta renivelación debe comprobarse dentro de los límites establecidos.

Puesto que los puntos de cambio y elevaciones del instrumento son temporáneos, no existe interés alguno en conocer las elevaciones, pero si hacemos un total de todas las visuales atrás y un total de todas las visuales adelante, y restamos la suma de las visuales adelante de la suma de las visuales atrás, obtendremos la diferencia de elevación observada por la brigada de campo entre las dos marcas de cota fija localizadas en los extremos de la sección.



MINISTERIO DE
DEFENSA
NACIONAL



INSTITUTO
GEOGRÁFICO
MILITAR

En la nivelación geodésica, no se lee solamente un hilo del instrumento, sino tres. En virtud de que los tres hilos del aparato fueron construidos de tal modo que las dos separaciones entre los hilos son iguales, un promedio de las tres lecturas dará un valor más preciso para la lectura del hilo central que una sola lectura del hilo central. También las dos separaciones sumadas, proporcionan al observador una medida de la distancia horizontal entre el instrumento y la mira observada.

La nivelación geodésica utiliza otros varios refinamientos sobre la nivelación corriente. Todas las modificaciones empleadas en la nivelación geodésica sirven para disminuir la posibilidad de errores accidentales y eliminar los errores sistemáticos acumulativos.

Los circuitos de la nivelación geodésica sirven de referencia para el establecimiento de control fotogramétrico por medio de puntos estereoscópicos, con el fin de suministrar elevaciones para el ajuste de las nivelaciones trigonométricas efectuadas en la triangulación, y para elevaciones necesarias en los cálculos de las anomalías gravimétricas, estudios de movimientos de la corteza terrestre y varios otros usos científicos. Además, sirven como referencia básica para el control vertical necesario en el desarrollo industrial de un país.

2.12. ESPECIFICACIONES

2.12.1. NIVELACIÓN DE PRIMER ORDEN

La nivelación de primer orden debe usarse en el desarrollo de todas las redes principales de nivelación dentro del país y en el enlace con marcas de cota fija en todas las estaciones mareográficas.

Se hará todo lo posible para que las líneas se establezcan de modo que ningún sitio dentro del país quede a más de 80 kilómetros de una marca de cota fija establecida por métodos de nivelación de primer orden.

Todas las líneas de nivelación se deben dividir en secciones de un kilómetro y medio (1.5 km) de longitud, aproximadamente. Cada sección se nivelará en dirección delantera y trasera. Ambas nivelaciones deben hacerse independientemente, y ambas deberán concordar dentro de un límite de $\pm 4 \text{ mm } \sqrt{k}$, siendo "K" la longitud de la sección en kilómetros. Si esta concordancia no se obtiene, la nivelación debe repetirse hasta que haya dos nivelaciones en direcciones opuestas que estén dentro de estos límites.



MINISTERIO DE
DEFENSA
NACIONAL



INSTITUTO
GEOGRÁFICO
MILITAR

Cuando una sección de la línea de nivelación se nivele más de una vez en dirección delantera y trasera, los resultados de cualquier medida se rechazarán si la diferencia en elevación difiere por más de $\pm 6.0 \text{ mm } \sqrt{K}$ de los promedios aritméticos de todas las diferencias observadas. No habrá rechazos de resultados comprobados de diferencias de elevación que difieran por menos de $\pm 6.0 \text{ mm } \sqrt{k}$, a menos de que haya una buena razón para sospechar la existencia de un error en alguna observación. En este caso, las causas de rechazo deben anotarse con claridad en la libreta de campo y en los resúmenes. REPETIMOS: siempre deben hacerse dos observaciones en direcciones opuestas y bajo diferentes condiciones atmosféricas que concuerden o estén dentro de los límites de $\pm 4.0 \text{ mm } \sqrt{K}$, aunque se haya hecho varias nivelaciones en la sección.

En todas las secciones de nivelación de primer orden cuyas longitudes sean de 0.50 km o menores y consistan de más de una armada de instrumento, una divergencia de $\pm 2.8 \text{ mm}$ o menor será considerada como una comprobación adecuada, no obstante, los límites dados anteriormente para la nivelación de primer orden.

En secciones muy cortas de solo una estación de instrumento, las discrepancias entre las nivelaciones delanteras y traseras no deben exceder de $\pm 1.0 \text{ mm}$, y deben tener un promedio de $\pm 0.6 \text{ mm}$ o menos.

2.12.2. NIVELACIÓN DE SEGUNDO ORDEN

La nivelación de segundo orden debe usarse para la subdivisión de circuitos de la nivelación de primer orden. El espacio ideal entre las líneas de la nivelación de segundo orden es aquel en que no haya un sitio dentro de la región que este a más de 20 kilómetros de distancia de una marca de cota fija de primer o segundo orden. En todos los casos es imprescindible que se usen métodos y equipo de primer orden en nivelación de segundo orden. La única diferencia es la discrepancia permisible, y se permite nivelar líneas de segundo orden en una sola dirección cuando comiencen y terminen en marcas de cota fija previamente establecidas mediante nivelación de orden mayor.

Los recorridos dobles de nivelación de segundo orden deberán concordar dentro de un límite de $\pm 8.4 \text{ mm } \sqrt{K}$, siendo "K" la longitud de la sección en kilómetros. Si esta concordancia no se obtiene, la nivelación debe repetirse hasta obtener dos nivelaciones en direcciones opuestas que estén dentro de los límites mencionados.



Los circuitos cerrados de segundo orden, cuando se hayan nivelado únicamente en una dirección, deben cerrarse dentro del límite de $\pm 8.4 \text{ mm } \sqrt{K}$ (siendo K la circunferencia del circuito en kilómetros).

En nivelación de segundo orden, si se hace más de una recorrida delantera y trasera en una sección, se rechaza cualquier medida que de un resultado que difiera más de $\pm 9.0 \text{ mm } \sqrt{K}$ del promedio aritmético de todas las diferencias de elevación observadas. No se hará rechazo alguno por un resultado que difiera por menos de $\pm 9.0 \text{ mm } \sqrt{K}$, a menos que haya una buena razón para sospechar la existencia de un error en esa medida particular. En tal caso, las razones del rechazo deben anotarse claramente en la libreta de campo y en los abstractos.

2.12.3. NIVELACIÓN DE TERCER ORDEN.

La nivelación de tercer orden se usará en subdivisiones de los circuitos de primer y segundo orden en regiones donde se necesite control vertical y se considere suficiente la nivelación de tercer orden.

Por lo general las líneas de nivelación de tercer orden no se deben extender a más de 50 kilómetros de las líneas de orden más alto. Estas líneas pueden nivelarse en una sola dirección cuando sean circuitos que cierren en líneas de igual o mayor orden. Las comprobaciones de cierre no deben exceder de $\pm 12.0 \text{ mm } \sqrt{K}$ (siendo K la longitud del circuito en kilómetros).

Finalmente, las precisiones que maneja el proceso de geodesia para la componente vertical están resumidas en la siguiente tabla:

Tabla 3.- Cuadro resumen de la clasificación de acuerdo a la precisión

| Nivelación | | | |
|---------------|--|--------------------------------|---------|
| Clasificación | Criterios Post-Proceso y ajuste GNSS * | Error de Cierre | Escalas |
| Primer Orden | No Aplica | $\pm 4 \text{ mm } \sqrt{k}$ | N/A |
| Segundo Orden | No Aplica | $\pm 8,5 \text{ mm } \sqrt{k}$ | N/A |
| Tercer Orden | No Aplica | $\pm 12 \text{ mm } \sqrt{k}$ | N/A |



MINISTERIO DE
DEFENSA
NACIONAL



INSTITUTO
GEOGRÁFICO
MILITAR

Bibliografía

Calderón, I. J. (2014). wordpress. Recuperado el 2018, de https://jfvf.files.wordpress.com/2014/02/capitulo-3_mediciones-gravimetricas.pdf

Cruz, M. (2008). Caracterización de puntos de control en reledetección: Aplicación de la corrección geométrica automática de imágenes NOAA-AVHRR GAC-5km. Universidad de Almería, Departamento de Lenguaje y Computación.

Farjas, M. (2004). INGENIERIA CARTOGRÁFICA GEODESICA. Recuperado el 25 de marzo de 2016, de http://ocw.upm.es/ingenieria-cartografica-geodesica-y-fotogrametria/topografia-ii/contenidos/Mis_documentos/Tema-9-Triangulacion-y-Trilateracion/Teoria_Triang_Te.

FLORES, F., & POZO, M. (2016). GRAVIMETRIA EN EL ECUADOR. Revista Técnica IGM.

Lerma, J. L. (2002). Fotogrametría Moderna: Analítica y Digital. Valencia: Universidad Politécnica de Valencia.

Mariano, C., & Hernán, M. (2012). Verificación y densificación de la Red de catastro de la provincia de Córdoba. Tesis. Córdoba Argentina.

Pérez, J. (2001). Apuntes de Fotogrametría III. . Mérida, España: Universidad de Extremadura.

Rosado, E. Q. (2014). Introducción a la Fotogrametría y Cartografía aplicada a la Ingeniería Civil (Primera ed.). Cáceres, España: Universidad de Extremadura.

SCINTREX. (2006). CG-5 Manual de operación. Ontario.

Torge, W. (1989). Gravimetry.

Vite, C. I. (2005). Principios Básicos de la Fotogrametría Actual. Mexico: Escuela Superior de Ingeniería y Arquitectura Unidad Zacatenco.

Blitzkow, D., 2003. "Sistemas Altimétricos y Determinación del Geoide", INOCAR, Guayaquil, Ecuador.

Boedecker, G. (2002). World gravity standards-present status and future challenges.

Castro, C. (2005). Contribución al establecimiento de un Sistema Gravimétrico para América del Sur.



MINISTERIO DE
DEFENSA
NACIONAL



INSTITUTO
GEOGRÁFICO
MILITAR

Drewes, H. (2016). Taller SIRGAS en Sistemas Verticales de Referencia. Quito, Ecuador, noviembre 21 – 25, 2016.

McConell, R., Winter, P., Geller, R (1977). Red Latinoamericana de Normalización de Gravedad (RELANG77).

Mora, J. (1973). Mediciones Gravimétricas en el Ecuador. Quito

Morelli, C. et al (1971). The International Gravity Standardization Net.

Miranda, S., Herrada, A. y Sisterna, J. 2004. Redes de Gravedad/Nivelación. Diseño, Medición, Cálculo y Compensación de una Red Experimental Local.

Torres, M. (2005). Metodología para el ajuste de la red gravimétrica fundamental del Ecuador Continental.

Tapia R.J, (1970). Manuel de Nivelación Geodésica, Servicio Geodésico Interamericano.

Flores, F; Pozo, M. (2016). Gravimetría en el Ecuador.

Calderón, J. 2014. Geodesia Física y Geofísica

Scintrex, CG-5 (2006). Manual de operación.

Bosch, W. (2002) “The Sea Surface Topography and its Impact to Global Height System Definition”, in Drewes, H. et al. (orgs.) *Vertical Reference Systems: IAG Symposium Cartagena, Colombia, February 20--23, 2001*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, p. 225–230. doi: 10.1007/978-3-662-04683-8_43.

Drewes, H. et al. (2016) “The geodesist’s Handbook 2016”, *Journal of Geodesy*. Springer Berlin Heidelberg, 90(10), p. 907–1205. doi: 10.1007/s00190-016-0948-z.

Förste, C. et al. (2014) “EIGEN-6C4 - The latest combined global gravity field model including GOCE data up to degree and order 1949 of GFZ Potsdam and GRGS Toulouse”, *EGU General Assembly*, 16, p. 3707. doi: <http://dx.doi.org/10.5880/icgem.2015.1>.

Gemael, C. (2012) *Introdução à geodésia física, Curitiba: Editora da UFPR*. Curitiba.

Gérard, P. e Luzum, B. (2010) “IERS Conventions (2010)”, *Bureau International Des Poids Et Mesures Sevres (France)*, p. 1–179. Available at: <http://www.iers.org/TN36/>.

Heck, B. (2004) “Problems in the Definition of Vertical Reference Frames”, in Sansò, F. (org.) *V Hotine-Marussi Symposium on Mathematical Geodesy: Matera, Italy June 17--21*,



MINISTERIO DE
DEFENSA
NACIONAL



INSTITUTO
GEOGRÁFICO
MILITAR

2003. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, p. 164–173. doi: 10.1007/978-3-662-10735-5_22.

Heck, B. e Rummel, R. (1990) “Strategies for solving the vertical datum problem using terrestrial and satellite geodetic data”, in *Sea Surface Topography and the Geoid*. Springer, p. 116–128.

Heikkinen, M. (1979) “On the Honkasalo term in tidal corrections to gravimetric observations”, *Bulletin Geodésique*, 53(3), p. 239–245. doi: 10.1007/BF02523955.

HIDRONAV-5158. (2013). Normas Técnicas Hidrográficas No. 29. 1ra Edición.

Hofmann-Wellenhof, B. e Moritz, H. (2006) *Physical geodesy*. Springer Science & Business Media.

IAG (2015) *IAG Resolution (No. 1) for the definition and realization of an International Height Reference System (IHR)*.

IAG (2016) *IAG Newsletter*. Budapest. Available at: <http://www.iag-aig.org>.

Ihde, J. *et al.* (2015) *Report of the ad-hoc group on an international height reference system (IHR)*, *Travaux de l’AIG*.

Ihde, J. *et al.* (2017) “Definition and Proposed Realization of the International Height Reference System (IHR)”, *Surveys in Geophysics*. doi: 10.1007/s10712-017-9409-3.

Ihde, J., Sánchez, L. e Sideris, M. (2010) *Theme 1: Global Unified Height System Introductory presentation*. Miami: IAG.

Lu, Z., Qu, Y. e Qiao, S. (2014a) *Geodesy: Introduction to geodetic datum and geodetic systems*, *Geodesy: Introduction to Geodetic Datum and Geodetic Systems*. doi: 10.1007/978-3-642-41245-5.

Lu, Z., Qu, Y. e Qiao, S. (2014b) “The Geoid and Different Height Systems”, in *Geodesy: Introduction to Geodetic Datum and Geodetic Systems*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, p. 131–163. doi: 10.1007/978-3-642-41245-5_4.

Marti, U. *et al.* (2015) “CCM – IAG Strategy for Metrology in Absolute Gravimetry, Role of CCM and IAG”, in IUGG General Assembly (org.) *TRAVAUX, Volume 39. Reports 2011-2015*. Prague, p. 230–238.

Morelli, C. *et al.* (1974) “The International Gravity Standardisation Net 1971 (IGSN71)”, *Special Publication No. 4*, 1974.



MINISTERIO DE
DEFENSA
NACIONAL



INSTITUTO
GEOGRÁFICO
MILITAR

Moritz, H. (1980) "Geodetic reference system 1980", *Bulletin geodesique*. Springer, 54(3), p. 395–405.

Pavlis, N. K. *et al.* (2012) "The development and evaluation of the Earth Gravitational Model 2008 (EGM2008)", *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 117(B4), p. n/a-n/a. doi: 10.1029/2011JB008916.

Plag, H. e Pearlman, M. (2009) *Global Geodetic Observing System. Meeting the Requirements of a Global Society on a Changing Planet in 2020*. Organizado por H. Plag e M. Pearlman. London: Springer.

Sánchez, L. *et al.* (2016) "A conventional value for the geoid reference potential W_0 ", *Journal of Geodesy*, 90(9), p. 815–835. doi: 10.1007/s00190-016-0913-x.

Sánchez, L. e Sideris, M. G. (2017) "Vertical datum unification for the International Height Reference System (IHRIS)", *Geophysical Journal International*, p. ggx025. doi: 10.1093/gji/ggx025.

Sansò, F. e Sideris, M. G. (2013) "The Forward Modelling of the Gravity Field", in Sansò, F. e Sideris, M. G. (orgs.) *Geoid Determination: Theory and Methods*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, p. 3–71. doi: 10.1007/978-3-540-74700-0_1.

Tapley, B.; KIM, M. (2001) "Aplicaciones t", in Fu, L. e Cazenave, A. (orgs.) *Satellite Altimetry and Earth Sciences*. Academic Press, p. 371–406.

Torge, W. e Müller, J. (2012) *Geodesy, De Gruyter Textbook*. Berlín: De Gruyter.

Uotila, U. A. (1980) "Note to the users of International Gravity Standardization net 1971", *Bulletin geodésique*. Springer, 54(3), p. 407–408.