

**CENTRO DE INVESTIGACIONES OCEANOGRÁFICAS
E HIDROGRÁFICAS -CIOH-**

ÁREA DE HIDROGRAFÍA

SECCIÓN DE LEVANTAMIENTOS



**FUNDAMENTOS DE GEODESIA Y TOPOGRAFIA
PARA HIDROGRAFIA**

Cartagena de Indias D. T. y C., Colombia

**CENTRO DE INVESTIGACIONES OCEANOGRÁFICAS
E HIDROGRÁFICAS -CIOH-**

ÁREA DE HIDROGRAFÍA

SECCIÓN DE LEVANTAMIENTOS



FUNDAMENTOS DE GEODESIA Y TOPOGRAFIA PARA HIDROGRAFIA

Autores

Andrés Cárdenas Contreras

Ingeniero Catastral y Geodesta
Magister en Ciencias – Geofísica

Nubia Alexandra Bohórquez Castillo

Ingeniera Catastral y Geodesta
Especialista en Sistemas de Información Geográfica

Ángela Nieto Gómez

Ingeniera Catastral y Geodesta

Diana Carolina Fonseca Espejo

Ingeniera Catastral y Geodesta

José Arturo Arias Cardozo

Suboficial Jefe Armada Nacional
Hidrógrafo Categoría B FIG – OHI

**Cartagena de Indias D. T. y C., Colombia
Marzo 2009**

Agradecimientos

A las Áreas de Hidrografía y Manejo Integrado de Zonas Costeras del CIOH por suministrarnos su asesoría y equipos para realizar los ejercicios prácticos.

Al Capitán de Fragata Juan Carlos Acosta Chady Jefe del Área de Hidrografía por su orientación y apoyo en el proceso de elaboración del manual.

A Nelson Cárdenas Contreras y Juan David Santana por la colaboración en la elaboración de algunas ilustraciones.

Contenido

Introducción.....	11
Capítulo 1. Sistemas de Coordenadas en Geodesia Geométrica	12
1.1 Algunos referentes históricos en la Geodesia Nacional	13
1.2 Geodesia Geométrica	15
1.2.1 Geoide	15
1.3 Elipsoide.....	16
1.4 Coordenadas Geodésicas.....	17
1.5 Elipse Meridiana.....	18
1.6 Coordenadas en la Elipse Meridiana	19
1.7 Coordenadas del elipsoide.....	21
1.8 Problema inverso de coordenadas geodésicas	22
1.8.1 Problema inverso sin iterar (solución exacta):	23
1.8.2 Problema inverso con iteraciones altura cero.....	23
1.8.3 Problema inverso con iteraciones normal igual al semieje mayor	24
1.9 Radios de Curvatura.....	24
Capítulo 2. Dátum y transformación de dátum.....	28
2.1. Dátum Geodésico.....	29
2.1.1. Dátum Bogotá y Red Arenas.....	29
2.1.2. Dátum WGS84 y la RED MAGNA.....	30
2.1.3. Comparación entre los Dátum WGS84 y Bogotá.....	32
2.2. Deflexión de la vertical	32
2.3. Transformación de Dátum.....	34
2.4. Transformación de los Siete Parámetros.....	34
2.5. Transformación de Molodensky – Badekas	36
2.6. Método de Molodensky	37
2.7. Ejercicios.....	39
Capítulo 3. Proyecciones Cartográficas	40
3.1. Proyecciones Cartográficas	41
3.2. Proyección Transversa de Mercator. Gauss- Krüger	48
3.2.1. Problema directo.....	50
3.2.2. Problema Inverso	52
3.3. Proyección UTM	53
3.3.1. Problema directo.....	55
3.3.2. Problema Inverso	56
3.4. Proyección Mercator.....	58
3.5. Clasificación de la cartografía colombiana	61
3.5.1. Carta náutica.....	61
3.5.2. Clasificación Internacional de las Cartas Náuticas.....	62
3.5.3. Clasificación Nacional de las Cartas Náuticas	63

3.5.4.	Carta Náutica Electrónica (ENC - Electronic Nautical Chart).....	65
3.5.5.	Corrección y Actualización de las Cartas Náuticas	66
3.6.	Ejercicios.....	68
Capítulo 4.	Nivelación	69
4.1.	Campo Gravitatorio terrestre.....	70
4.1.1.	Ley de gravitación Universal de Newton.....	70
4.1.2.	Campo de Gravedad.....	70
4.2.	Figura de la tierra.....	71
4.2.1.	Geoide	71
4.2.2.	Modelo EGM96.....	74
4.2.3.	Marea y Datums del Nivel del Agua	74
4.3.	WGS84 y GRS80.....	76
4.4.	Formula internacional de gravedad.....	76
4.5.	Tipos de alturas.....	77
4.6.	Métodos de Nivelación	79
4.7.	Nivelación Geométrica	86
4.7.1.	Instrumentos de Nivelación. Nivel Automático Análogo	86
4.7.2.	Carteras de cálculo	87
4.7.3.	Precisión en la toma de datos	88
4.7.4.	Nivelación Recíproca.....	88
4.7.5.	Nivelación No recíproca	89
4.7.6.	Error de cierre.....	89
4.7.7.	Topográfica o líneas cortas	89
4.7.8.	Geodésica o líneas largas	90
4.8.	Nivelación Trigonométrica Topográfica.....	90
4.8.1.	Instrumentos de Nivelación. Estación total.....	92
4.9.	Nivelación Barométrica	94
4.9.1.	Descripción del Método de Nivelación Barométrica Utilizando un Altimetro	95
4.10.	Hidrografía.....	96
4.11.	Trabajo de campo con el nivel análogo. Método Nivelación Geométrica	97
4.11.1.	Procedimiento	97
4.11.2.	Precisión en la toma de datos.....	100
4.12.	Trabajo de campo con Estación Total	102
4.12.1.	Diseño del ejercicio de aplicación.....	102
4.12.2.	Cálculos de los datos	103
4.13.	Ejercicios	105
Capitulo 5.	Geodesia Satelital	107
5.1.	Estructura y organización de la Geodesia en el Mundo.....	108
5.2.	Sistemas de Referencia y Marcos de Referencia.....	109
5.2.1.	Servicio Internacional de Rotación Terrestre (IERS).....	112

5.2.2.	Técnicas de Medición y Posicionamiento de ICRF y ITRF	115
5.3.	Sistema de Tiempo.....	118
5.3.1.	Tiempo Atómico.....	118
5.3.2.	Tiempo dinámico	119
5.3.3.	Tiempo Universal Coordinado	119
5.4.	Sistemas GNSS.....	120
5.4.1.	Condiciones de los actuales sistemas GNSS.....	120
5.4.2.	Funcionamiento de un sistema GNSS1.....	121
5.4.3.	Aplicaciones de los sistemas GNSS	121
5.4.4.	GNSS-1	122
5.4.5.	GNSS-2	123
5.5.	GPS	124
5.5.1.	Conceptos básicos del GPS	124
5.5.2.	Segmentos	124
5.6.	Estructura de la Señal (CÓDIGOS C/A, P).....	127
5.7.	Calculo de la posición de un satélite.....	129
5.8.	Correcciones y reducciones.....	131
5.8.1.	Efecto rotación de la Tierra.....	131
5.8.2.	Efecto Relativista.....	132
5.8.3.	Refracción Troposférica (Refracción atmosférica, refracción troposférica, ionosférica)	132
5.8.4.	Refracción Ionosférica	132
5.8.5.	Dilución de la precisión (Geometría de los Satélites).....	133
5.8.6.	Efecto Multipath.....	134
5.8.7.	Disponibilidad Selectiva	134
5.9.	Métodos de Posicionamiento.....	135
5.9.1.	Absoluto	135
5.9.2.	Diferencial.....	136
5.9.3.	Estático.....	136
5.9.4.	Reocupación o pseudoestático.....	137
5.9.5.	Cinemático	137
5.9.6.	Stop & Go	137
5.9.7.	Continuo.....	137
5.9.8.	DGPS	138
5.10.	Adquisición de datos GPS	138
5.10.1.	Conceptos Generales.....	138
5.10.2.	Receptores Geodésicos de 1 y 2 frecuencias	139
5.10.3.	Adquisición y procesamiento de datos.....	140
5.11.	Trabajo de campo de Nivelación con GPS	140
5.11.1.	Diseño del Ejercicio de aplicación.....	140
	BIBLIOGRAFÍA	145

GLOSARIO.....	148
ACRONIMOS	151

Lista de figuras

Capítulo 1.

- Figura 1.1. Geoide.
- Figura 1.2a. Elipsoide. 1.2b. Elipse Meridiana, 1.2c. Vista superior, Circunferencia.
- Figura 1.3. Coordenadas Elipsoidales.
- Figura 1.4. Elipse Meridiana.
- Figura 1.5. Latitud Geodésica.
- Figura 1.6. Latitud Geocéntrica.
- Figura 1.7. Latitud Geocéntrica.
- Figura 1.8. Latitudes Geodésica, Geocéntrica y Paramétrica en el Elipsoide.
- Figura 1.9a. Elipsoide. 1.9b. Vista superior. Circunferencia. 1.9c. Elipse Meridiana.
- Figura 1.10. Secciones Normales Principales.
- Figura 1.11. Radios de curvatura en un azimut cualquiera y radio de curvatura promedio.

Capítulo 2.

- Figura 2.1. ARENA, Arco de triangulación Bogotá-Bucaramanga-Cúcuta.
- Figura 2.2. Sistema MAGNA-SIRGAS. Red Básica GPS y estaciones de funcionamiento continuo a 2004.
- Figura 2.3. Deflexión de la vertical.
- Figura 2.4. Transformación de Dátum.
- Figura 2.5. Pasos para la Transformación de Dátum.

Capítulo 3.

- Figura 3.1. Proyección Gauss Krüger.
- Figura 3.2. Superficies Curvilínea y plana en la Proyección Gauss – Krüger.
- Figura 3.3. Proyección UTM. Carta del Caribe Colombiano.
- Figura 3.4. Elipsoide y Esfera de Revolución.
- Figura 3.5. Proyección Mercator, representación del meridiano central y la zona.
- Figura 3.6. Proyección Mercator, Paralelos y Meridianos.
- Figura 3.7. Proyección Mercator. Carta del Caribe Colombiano.
- Figura 3.8. Cartas Costeras del Caribe.
- Figura 3.9. Cartas Costeras del Pacífico.

Capítulo 4.

- Figura 4.1. Distancia entre dos masas Ley de Gravitación Universal.
- Figura 4.2. Geoide.
- Figura 4.3. Ondulación Geoidal.
- Figura 4.4. Mareas.
- Figura 4.5. Superficies de referencia.
- Figura 4.6. Diferencias de nivel entre un punto A y un punto B.
- Figura 4.7. Ejemplo de nivelación desde un punto P hasta un punto Q.
- Figura 4.8. Esquema de un Nivel.
- Figura 4.9. Método de estaciones recíprocas.
- Figura 4.10. Nivelación Trigonométrica.
- Figura 4.11. Nivelación Trigonométrica. Corrección por altura de los instrumentos.
- Figura 4.12. Principio de Funcionamiento de un Distanciómetro.
- Figura 4.13. Estación Total South.
- Figura 4.14. Barómetro: Weather Bureau 720 – 920 mb.
- Figura 4.15. Medición de la profundidad mediante ecosonda.
- Figura 4.16. Trabajo de campo en Nivelación geométrica.
- Figura 4.17. Detalle de las visuales a tener en cuenta para la aplicación de la compensación en la cota.
- Figura 4.18. Trabajo de campo con la Estación Total.

Capítulo 5

- Figura 5.1. Consejo Internacional para la Ciencia.
- Figura 5.2. Estructura de los Sistemas y Marcos de Referencia a nivel Internacional y local
- Figura 5.3. Esquema del funcionamiento de VLBI.
- Figura 5.4. Estaciones VLBI.
- Figura 5.5. Ejemplo de una antena VLBI.
- Figura 5.6. Estaciones DORIS. .
- Figura 5.7. Cronograma organizativo de GNSS.
- Figura 5.8. Sistemas de Aumento Basados en Satélites.
- Figura 5.9. Constelación NAVSTAR
- Figura 5.10. Representación Simplificada de la Constelación GPS.
- Figura 5.11. Distribución de estaciones de seguimiento, segmento de control.
- Figura 5.12. Señales del sistema.
- Figura 5.13. Señales del sistema.
- Figura 5.14. Intersección de las señales GPS.
- Figura 5.15. Dilución de la Precisión.
- Figura 5.16. DOP bajo.
- Figura 5.17. DOP alto.
- Figura 5.18. Posicionamiento Absoluto.
- Figura 5.19. Posicionamiento Diferencial.
- Figura 5.20. Nivelación de un circuito.
- Figura 5.21. Especificaciones técnicas del GPS Leica.
- Figura 5.22. Trabajo de campo con GPS.
- Figura 5.23. Plano del CIOH.

Lista de Tablas

Capítulo 1

- Tabla 1.1. Parámetros de los elipsoides usados en Colombia.
- Tabla 1.2. Relaciones matemáticas de las coordenadas de la elipse meridiana en función de las latitudes.
- Tabla 1.3. Relaciones matemáticas de las coordenadas del elipsoide en función de las latitudes.
- Tabla 1.4. Relaciones matemáticas de los radios de curvatura sobre el elipsoide.

Capítulo 2

- Tabla 2.1. Comparación ARENA-MAGNA.

Capítulo 3

- Tabla 3.1. Clasificación de los sistemas de proyección por deformaciones.
- Tabla 3.2. Características de algunas proyecciones cartográficas.
- Tabla 3.3. Clasificación Cartas Costeras del Caribe.
- Tabla 3.4. Clasificación Cartas Costeras del Pacífico.

Capítulo 4

- Tabla 4.1. Parámetros del dátum GRS80 y WGS84.
- Tabla 4.2. Tipos de Instrumentos de Nivelación.
- Tabla 4.3. Modelo de Cartera: Nivelación Geométrica Compuesta.
- Tabla 4.4. Error permitido dada la precisión de una nivelación.
- Tabla 4.5. Especificaciones Técnicas de la Estación Total South NTS 35.5
- Tabla 4.6. Cartera de nivelación geométrica por HI y Subes y Bajas.
- Tabla 4.7. Cartera de nivel indicando la compensación del error en los puntos de cambio.
- Tabla 4.8. Error de cierre en coordenadas planas para cada estación.
- Tabla 4.9. Cartera del levantamiento con estación total.

Capítulo 5

- Tabla 5.1. Asociación Internacional de Geodesia y Geofísica.
- Tabla 5.2. Sistemas de Referencia y Marcos de referencia.
- Tabla 5.3. Condiciones de un sistema GNSS.
- Tabla 5.4. Aplicaciones de los sistemas GNSS.
- Tabla 5.5. Rangos equivalentes de errores para el usuario (UERE).

Tabla 5.6. Valores DOP.

Tabla 5.7. Descripción de valores DOP.

Tabla 5.8. Clasificación métodos de posicionamiento.

Tabla 5.9. Categorías según la precisión.

Tabla 5.10. Categorías según la longitud del circuito.

Tabla 5.11. Clasificación de receptores.

Tabla 5.12. Alturas elipsoidales, resultado de la nivelación con los tres métodos utilizados:

Nivelación Geométrica, Trigonométrica y GPS.

Introducción

El estudio formal en Ciencias de la tierra: geología, oceanografía e hidrografía, geofísica, geodinámica, geoquímica y geodesia; corresponden a la interacción entre varias áreas del conocimiento de las ciencias exactas clásicas: matemáticas y física, con las ciencias de la computación. El objeto de estudio primordial de estas ciencias es *el sistema tierra, como un todo*. No se puede decir que hay alguna ciencia más importante que otra, por el contrario ese nivel de especialidad que se tiene, hoy demanda de las comunidades académicas y científicas a nivel internacional y nacional, un enfoque integral.

Este manual tiene como propósito mostrar que Geodesia, es una ciencia de la tierra que hace parte del campo de la matemática aplicada, cuyo objeto es determinar las dimensiones y forma de la tierra, esto no implica solo estudiar la plataforma continental del país, sino también la plataforma oceánica. Por esta razón, se presenta a los estudiantes y profesionales del área de Oceanografía e Hidrografía de la Armada Nacional de Colombia, el *Manual de Geodesia para Hidrografía*, cuyo único propósito es mostrar un enfoque conceptual y pedagógico, de ágil lectura, que no es exhaustivo desde ningún punto de vista en lo que se refiere a las demostraciones matemáticas, pero busca aunar esfuerzos en el conocimiento nacional de Geodesia para Hidrografía.

El Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas de la Armada Nacional (CIOH), en su misión de desarrollar proyectos de investigación marina básica y aplicada, competente en oceanografía, hidrografía, protección del medio marino y manejo de zonas costeras; requiere utilizar datos espaciales, los cuales pueden ser obtenidos de diversas fuentes una de ellas son los datos geodésicos, lo que implica tener un conocimiento teórico y aplicado de Geodesia.

Capítulo 1. Sistemas de Coordenadas en Geodesia Geométrica

1.1 Algunos referentes históricos en la Geodesia Nacional

Son destacados los avances de algunas culturas precolombinas, por ejemplo los Muiscas en el Altiplano Cundiboyacense, tenían una cosmovisión a través de sus deidades Chiminigagua (Origen del Universo), Xue (Sol), Chía (Luna), Bachue (Madre del Género Humano) y Bochica (Principio del Bien), ellos llegaron a definir una base jeroglífica para medir el tiempo, una tabla de años y símbolos para los siglos y definieron un año de 354 días de base lunar divididos en 12 meses, algo sorprendente considerando sus fundamentos teóricos e instrumentos que poseían.

Muchos años después de la llegada de los Españoles y las implicaciones que esto trajo para nuestra cultura, se debe destacar la labor desarrollada por el Padre Louis Feuillée en 1704, hidrógrafo de origen Francés, quien realizó un levantamiento topográfico de la bahía de Santa Marta y definió la latitud del lugar mediante observaciones astronómicas sobre una pilastra. Esto nos permite inferir que el desarrollo de Geodesia en el país después de los avances logrados por las culturas ancestrales se da desde la Costa Caribe hacia el interior y esto se muestra en la labor de Don Juan Herrera y Sotomayor, gobernador del Castillo de San Felipe, quien determinó las coordenadas de las ciudades de Cartagena y Panamá, en 1725. Dado el momento histórico de desarrollo de la Armada Real de España por la conquista de las nuevas tierras, es enorme la actividad hidrográfica y costera en América, la cual incluye determinar varias posiciones astronómicas del Pacífico Colombo – Ecuatoriano, como las realizadas por el Italiano Malaspina de origen napolitano, en 1790 y las posteriores expediciones de Hidalgo, en las Antillas y zonas costeras entre Colombia y Panamá.

Como el propósito de los Españoles en América fue netamente económico, sus intereses estaban centrados en los recursos naturales de América Latina y por esta razón deciden realizar tres expediciones botánicas: Perú (1777), Nueva España (1785) y Nueva Granada (1783), la última encomendada al Sabio Español José Celestino Mutis, quien en el año de 1803 entre sus múltiples actividades fomenta la construcción del primer observatorio astronómico de América, hoy conocido como el Observatorio Astronómico Nacional (OAN). El científico alemán Alexander Von Humboldt, quien para la época realizaba sus expediciones en América, le recomendó a Mutis designar como director del observatorio a Francisco José de Caldas, por su genialidad y desempeño como astrónomo empírico. El científico Caldas demostró su inquietud innata por las Ciencias Naturales como resultado de sus continuos viajes entre Bogotá y Popayán, aún siendo Comerciante y Abogado de profesión. Desde 1805 hasta 1812 ejerció como director del OAN, durante este tiempo logró determinar la latitud de Bogotá, en $4^{\circ} 36' 06''$ de latitud norte, dato muy preciso con respecto al determinado por las técnicas actuales y obtuvo la altura sobre el nivel del mar por el método de punto de ebullición del agua que él mismo diseñó. Además son destacados sus avances no sólo en astronomía de posición, sino también en observaciones meteorológicas y determinación de eclipses, lo que lo lleva a realizar los almanaques astronómicos de 1811 y 1812.

En 1827 gracias al trabajo previo de Caldas, Humboldt, Arrowsmith, Talledo, Anguiano y Maldonado, se entrega por parte de la corona Española, el proyecto “Atlas de la Gran Colombia” en 12 planchas para los 12 departamentos: Istmo, Magdalena, Zulia, Guayaquil, Aznay, Venezuela, Apure, Orinoco y Maturín, Cundinamarca, Boyacá, Cauca y Ecuador; además, un mapa general, que podría decirse es el primero que cumple con las normas cartográficas, por su alto nivel de precisión en las coordenadas de los puntos y un gran legado histórico para el país. En 1849 se decide realizar la Comisión Corográfica de Colombia, cuyo propósito fue levantar la carta geográfica general del país y elaborar los mapas de cada una de sus provincias, para lo cual fue designado en su dirección el geógrafo e ingeniero militar italiano Agustín Codazzi, quien durante más de dos décadas se destacó por su arduo y disciplinado trabajo, dejando un legado inigualable en cartografía del país.

Mientras el Italiano Agustín Codazzi, realizaba sus trabajos, fueron varios los directores del OAN, en especial se debe destacar la perseverancia y calidad científica de José María González Benito, quien desde 1868 y durante cinco períodos no consecutivos hasta 1891, fue su director. En este tiempo logró producir una carta geográfica de la sabana y la altiplanicie de Bogotá, fue nombrado miembro de la "Royal Astronomical Society" en 1875. Colocó en 1881 una cúpula giratoria en el observatorio, un refractor de 16 cm y una estación meteorológica completa. También logró un reconocimiento internacional, permitiéndose la participación del OAN en la unificación del manejo de la hora y adoptándose en 1884 como "Meridiano Cero" el Meridiano de Greenwich.

Fue significativo el aporte del ingeniero González Benito, sin embargo brilla con luz propia la sin igual labor desempeñada por el científico Bogotano Julio Garavito Armero, profesor de la Universidad Nacional de Colombia en Ingeniería y Geodesia, ingeniero civil y matemático de reconocido prestigio internacional. Es evidente que la tenacidad y el genio de Garavito le permitieron emprender observaciones astronómicas con las cuales logró obtener resultados de amplio contenido científico aún a pesar de contar con muy escasos y anticuados equipos. Las guerras civiles de finales del siglo XIX y comienzos del XX paralizaron las actividades de algunas facultades de la Universidad Nacional. En 1902, Garavito y otros intelectuales reorganizan la Facultad de Ingeniería.

Durante la dirección del OAN desde 1891 hasta 1920, es incidente la genialidad de Garavito, quien realiza numerosos estudios teóricos y observaciones meteorológicas y astronómicas. Son destacados sus trabajos sobre el cálculo de probabilidades, óptica matemática y el movimiento de la Luna. Su admiración por la mecánica newtoniana lo convierte en un apasionado crítico de la teoría de la relatividad y de las matemáticas de Lobachevsky. Bajo la dirección de Garavito, el Observatorio gozó de una gran actividad científica e investigativa.

En 1892 publica su obra "Determinación Astronómica de Coordenadas Geográficas", modifica el método de Talcott para el cálculo de latitudes bajas. Aplica el método de Olbers para determinar las órbitas de los cometas de 1901 y 1910, observa un eclipse de sol en 1916 con altísima precisión, trabaja en astronomía dinámica, aunque no pudo terminar su trabajo más insigne titulado: "Fórmulas Definitivas para el Movimiento de la Luna". Fue el mejor astrónomo Colombiano de la época, también trabajó en el "problema de los tres cuerpos", con las "Fórmulas Definitivas para el Movimiento de la Luna". Fue tal su nivel profesional, que la Unión Astronómica Internacional, designó a cinco cráteres de la cara oculta de la Luna ubicados cerca de 47°36' Sur de latitud y 156°42' Este de longitud, con los nombres Garavito: S, C, D, Q, e Y.

Esto significa que fueron destacadas las labores en Geodesia y Astronomía en el siglo XIX y las primeras décadas del siglo XX, a pesar de las deficiencias tecnológicas presentes para la época en el país. Además, se debe mencionar que en el ámbito internacional el desarrollo de la geodesia aplicada también se logró a partir de las técnicas de posicionamiento astronómico con base en las efemérides de estrellas. Esto significa que Colombia fue uno de los países latinoamericanos que estuvieron a la vanguardia en el tema Geodésico, algo que hasta nuestros días se ha mantenido, como es el caso de la actual Red Geodésica Nacional (MAGNA), que es la densificación del Sistema de Referencia Geocéntrico para las Américas (SIRGAS) y una de las primeras en América del Sur.

Entre los logros obtenidos en los primeros años de la geodesia nacional, se deben destacar: la definición de una Estación Laplace en el observatorio Astronómico de Bogotá, obtenida a partir del cálculo de posiciones astronómicas a partir de las efemérides de las estrellas; la concepción, diseño y desarrollo de la antigua Red Geodésica Horizontal (ARENA), también conocida como Dátum Bogotá y la determinación de valores absolutos de gravedad para las estaciones de la red ARENA.

En este proceso participaron activamente instituciones como el Instituto Geográfico Militar creado en 1935 por el Presidente Alfonso López Pumarejo, hoy Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC), la entidad rectora de los temas geodésicos nacionales, adscrita al Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE). También participaron entidades internacionales, como El Instituto Geodésico Panamericano de Geodesia, varias misiones Europeas y Norteamericanas que brindaron asesorías ingenieriles en geodesia, y por supuesto se debe mencionar la labor destacada de ingenieros colombianos de varias especialidades y un grupo idóneo de profesionales que determinó las pautas para llegar al destacado nivel nacional en el tema.

El IGAC, ha estado acompañado en su ingente labor desde la mitad del siglo XX hasta nuestros días, por otras instituciones de carácter público cuyo aporte ha sido significativo en los temas topográfico y geodésico, como es el caso la Universidad Distrital Francisco José de Caldas con sus pregrados de técnico en topografía (1952), hoy Tecnología en Topografía, Ingeniería Catastral y Geodesia (1967) e Ingeniería Topográfica (1997). Y en el posicionamiento Oceanográfico e Hidrográfico, es evidente el significativo aporte de la Armada Nacional, a través del Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas (CIOH) que desde 1975 ha adelantado una labor continua en el tema Geodésico tanto hidrográfico, como oceanográfico para el país.

1.2 Geodesia Geométrica

El objeto de estudio de la geodesia es determinar las dimensiones y forma de la tierra, que corresponden a dimensiones en el espacio no sólo del sistema tierra. Para lograr este propósito se requiere definir las ecuaciones matemáticas de la forma geométrica (geodesia geométrica), las relaciones físico – matemáticas (geodesia física) correspondientes a un modelo geopotencial, las actuales técnicas de posicionamiento GNSS (Global Navigation Satellite System) y el estudio de la precisión de los datos obtenidos (ajustes geodésicos).

Esta ciencia se encarga de determinar las posiciones de los puntos de la superficie de la tierra, esto significa los valores numéricos y las coordenadas que tienen asignados estos puntos, pero estas coordenadas deben estar asociadas a un sistema de referencia. Lo que implica involucrar un problema que busca encontrar el modelo de la forma de la tierra, según sea su interés de representación: Plana, Esférica, Elipsoidal o Geoidal,

La geodesia geométrica involucra las relaciones geométricas del elipsoide de rotación. Su objeto de estudio tiene dos aspectos principales:

- La consideración que la forma de la tierra es un elipsoide de revolución biaxial.
- Es posible representar la superficie de la tierra, en mapas cartográficos, a través de cartografía matemática fundamentada en el elipsoide.

1.2.1 Geoide

Corresponde a una superficie equipotencial del campo gravitatorio de la tierra. Dicha superficie física real, puede considerarse coincidente con la superficie del agua en reposo de los océanos idealmente extendida bajo los continentes y sobre la cual la gravedad en todos sus puntos es normal a ella¹. En la figura 1.1, se observa su posición. Nótese que hay tres superficies claramente definidas, terreno, geoide y elipsoide; estas superficies se estudian en Geodesia y en este capítulo se hará referencia al modelo matemático correspondiente a esa representación.

¹ Para una definición matemática del geoide remítase al capítulo 4.

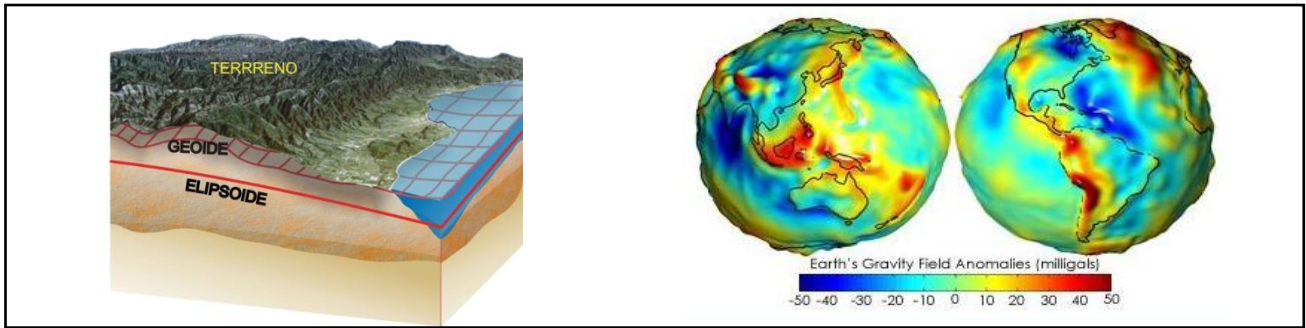


Figura 1.1. Geoide. Tomado de Wikipedia. http://en.wikipedia.org/wiki/Image:Geoids_sm.jpg

1.3 Elipsoide

EL elipsoide es un modelo matemático de la forma de la tierra, se asumió así, considerando el achatamiento de los polos y corresponde a la rotación de una elipse alrededor del eje z . Si el modelo se observa desde un punto de fuga normal al plano xy , es decir en la dirección de z se tiene una circunferencia de radio a . Ver figura 1.2.

En los términos de la geometría euclidiana, la ecuación canónica del elipsoide, se define a partir de las coordenadas ortogonales y dos de sus parámetros, el semieje mayor y menor:

$$\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{a^2} + \frac{z^2}{b^2} = 1 \quad [1.1]$$

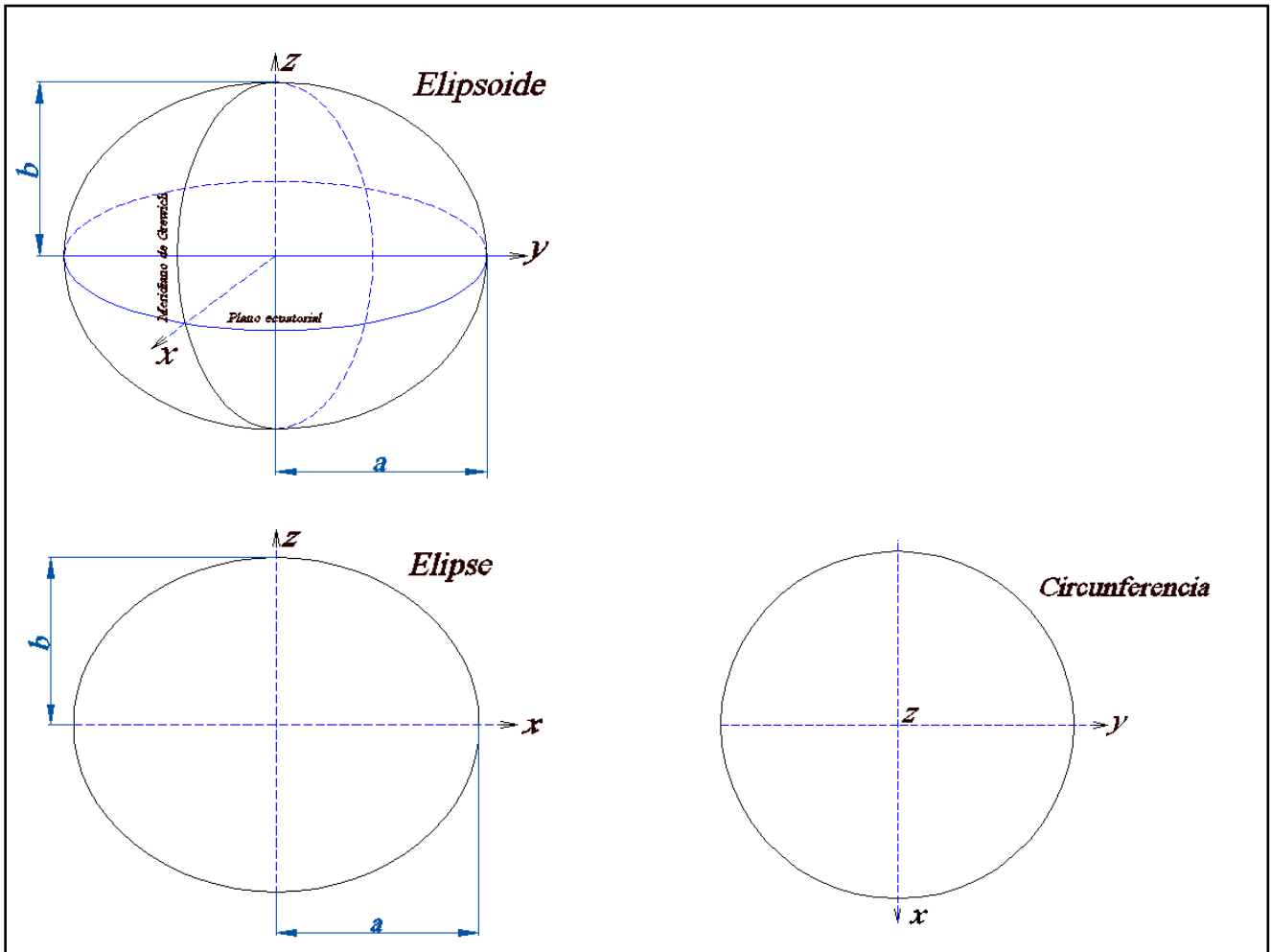


Figura 1.2a. Elipsoide. 1.2b. Elipse Meridiana, 1.2c. Vista superior, Circunferencia.

En donde

$a = \text{semieje mayor}$

$b = \text{semieje menor}$

x, y, z son las coordenadas ortogonales.

Las coordenadas ortogonales, también son conocidas como rectangulares o geocéntricas (para el caso en donde el origen del sistema coincide con el centro de masas de la tierra), nótese que sólo hay dos parámetros en el elipsoide, los semiejes a y b , esto implica que se está considerando un elipsoide biaxial de revolución²; en el cual todos los paralelos circunferencias, con un valor máximo igual de a .

1.4 Coordenadas Geodésicas

Como se observa en la figura 1.2, el sistema de coordenadas ortogonales, corresponden a un sistema cartesiano definido en una geometría euclidiana o plana, pero esta representación se debe asociar a un sistema de coordenadas sobre la superficie del elipsoide, conocidas como coordenadas geodésicas, cuya geometría es no euclidiana. En esta geometría no se cumplen los teoremas clásicos de la geometría euclidiana, por ejemplo dos meridianos que son paralelos en el ecuador, en los polos norte y sur, convergen y se cortan. Es decir, la presencia de la doble curvatura en esta superficie cerrada, implica un estudio específico desde el punto de vista matemático y conceptual que se mencionará en este documento.

Es así como se hace indispensable definir un sistema origen de la superficie elipsoidal a partir de los meridianos, que son líneas que unen los puntos del polo norte al polo sur y son elipses como las mostradas en la figura 1.2a. Por convención internacional, el *meridiano de Greenwich* es el meridiano origen, cuya longitud es cero. Mientras que los paralelos son circunferencias paralelas al plano xy y su radio varía según la latitud, se define el *plano ecuatorial* como plano origen, porque su latitud es cero.

Sobre el elipsoide, como se muestra en la figura 1.3, hay tres coordenadas geodésicas: latitud (φ), longitud (λ) y altura elipsoidal (h).

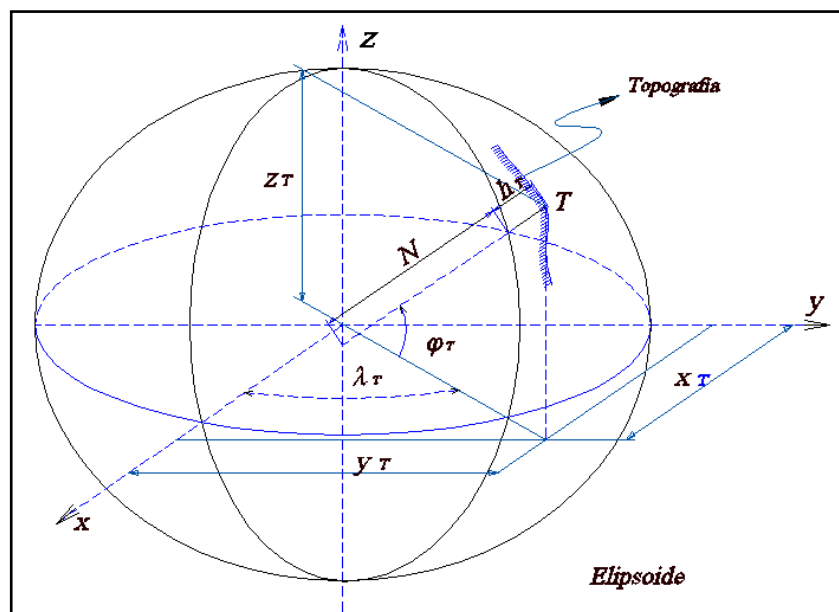


Figura 1.3. Coordenadas Elipsoidales.

² No se consideran tres parámetros elipsoide triaxial, porque no varían significativamente los resultados frente a un elipsoide biaxial, pero en cambio sí serían más difíciles de modelar, además por convención internacional de la AIGG (Asociación Internacional de Geodesia y Geofísica), se definió así.

Latitud Geodésica (φ): Es un ángulo medido entre el plano ecuatorial y el vector normal al plano tangente de un punto T . Nótese la construcción realizada en la figura 1.3, que esta línea normal no coincide con el origen de coordenadas ortogonales. Esto ocurre porque la tierra no es esférica, sino elipsoidal, es decir no tiene un radio único, sobre el cual todos los puntos de la superficie bidimensional sean equidistantes al origen. $-90 \leq \varphi \leq 90$ La latitud tiene un valor extremo de 90° , si es positiva se llama Norte (N), si es negativa se llama Sur (S).

Longitud Geodésica (λ): Es un ángulo medido entre el meridiano de referencia (conocido como Greenwich) y el meridiano que pasa por el punto T . $-180 \leq \lambda \leq 180$ La longitud tiene un valor extremo de 180° , si es positiva se llama Este (E), si es negativa se llama Oeste (W).

Altura elipsoidal (h): Corresponde a la distancia geométrica entre la superficie del elipsoide y la posición de un punto T (Ver figura 1.3) en la superficie topográfica, sobre el vector normal al elipsoide. Generalmente h es positiva, sin embargo para aquellos puntos por debajo del nivel de referencia es negativa, esto ocurre para los puntos por debajo del nivel del mar.

1.5 Elipse Meridiana

Considérese que una elipse es una figura cerrada, continua y derivable, en la cual se cumple que todos los puntos, están distanciados de sus dos focos un valor constante $k = 2a$. La elipse, mostrada en la figura 1.4, se define en términos de los parámetros y las siguientes relaciones matemáticas.

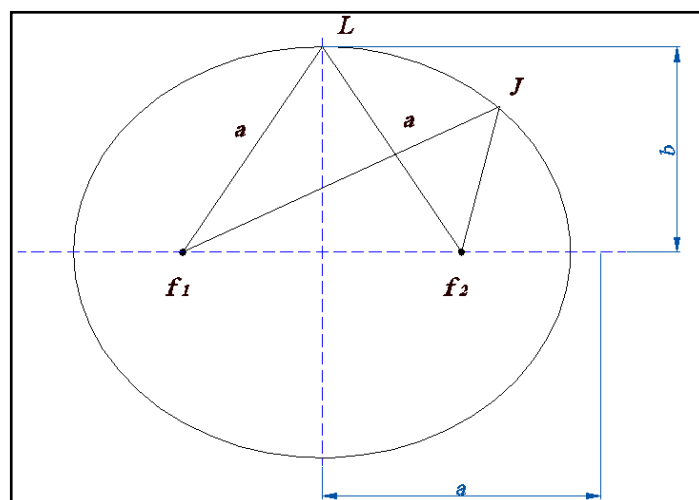


Figura 1.4. Elipse Meridiana.

a = semieje mayor

b = semieje menor

f = aplanamiento

$$f = \frac{a-b}{a} \quad [1.2]$$

e = primera excentricidad

$$e^2 = \frac{a^2 - b^2}{a^2} \quad [1.3]$$

e' =segunda excentricidad

$$e'^2 = \frac{a^2 - b^2}{b^2} \quad [1.4]$$

k =Constante de la elipse

$$k=2a \quad [1.5]$$

E = excentricidad lineal

$$E=ea \quad [1.6]$$

Es posible demostrar que:

$$e^2 = 2f - f^2 \quad [1.7]$$

Con dos de los parámetros mencionados, generalmente a y f , se define un elipsoide; antes del desarrollo de los actuales sistemas de posicionamiento satelital GNSS, se estableció en cada región o país, según las características propias, diferentes parámetros para sus elipsoides, conocidos como dátum locales. En Colombia, se utilizan los parámetros del Dátum Bogotá, que corresponden al elipsoide internacional y de los dos dátum geocéntricos más importantes GRS80 y WGS84. En la tabla 1.1, se muestran los valores.

Nombre del elipsoide	a = Semieje mayor (metros)	b = Semieje menor	$1/f$, f = aplanamiento
Internacional	6'378 388	6' 356 911.9462	297
GRS80 (Geodetic Reference System of 1980)	6' 378 137	6' 356 752.3141	298. 257222101
WGS84 (World Geodetic System of 1984)	6' 378 137	6' 356 752.3141	298. 2572223563

Tabla 1.1. Parámetros de los elipsoides usados en Colombia

1.6 Coordenadas en la Elipse Meridiana

Se define un sistema de coordenadas v_e, z_e , con v_e que corresponde a un meridiano con una longitud cualquiera. En la elipse meridiana, es posible entender las tres latitudes utilizadas en geodesia, téngase en cuenta que $v_e \neq x \neq y$, mientras que $z_e = z$. A partir de la construcción de la elipse meridiana, es posible definir las latitudes geocéntrica, geodésica y paramétrica. En la figura 1.5, aparece la latitud geodésica y en la tabla 1.2, se muestran las ecuaciones asociadas de las latitudes a una elipse meridiana v_e , así como las relaciones matemáticas resultantes.

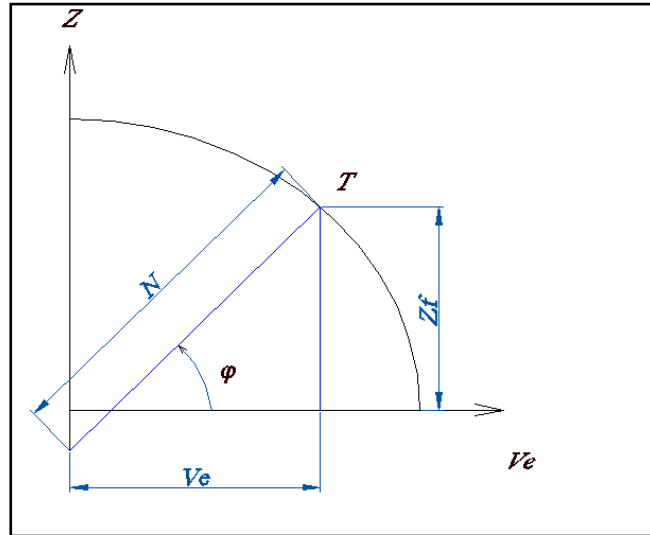


Figura 1.5. Latitud Geodésica

Latitud Geocéntrica (ω): Como se muestra en la figura 1.6, es el ángulo formado entre la línea que une el punto T , con el origen de coordenadas con el plano ecuatorial. Se utiliza principalmente en geodesia satelital, por la facilidad para realizar los cálculos y desarrollos matemáticos.

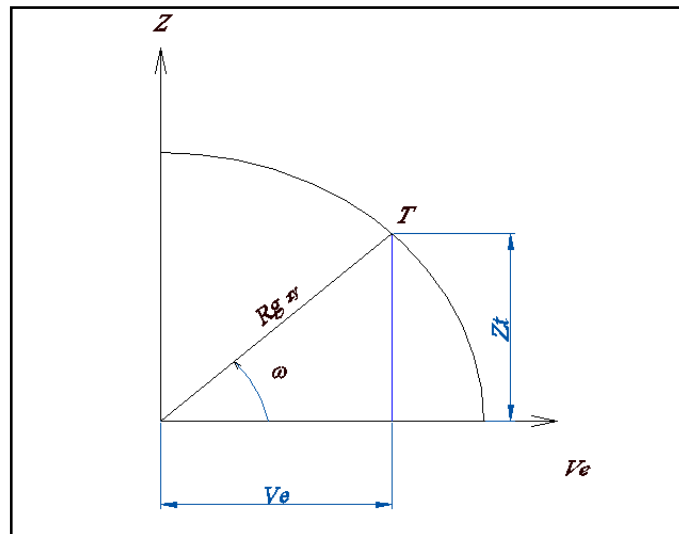


Figura 1.6. Latitud Geocéntrica

Latitud Paramétrica (θ): Como se muestra en la figura 1.7, es el ángulo formado entre un punto de fuga del punto T de la elipse meridiana en una circunferencia de radio a , al punto T' . Del corte de esta línea de fuga con la circunferencia resulta un vector cuyo radio de curvatura es a y que junto con el plano ecuatorial forman la latitud paramétrica. Esta latitud también, se utiliza en geodesia satelital.

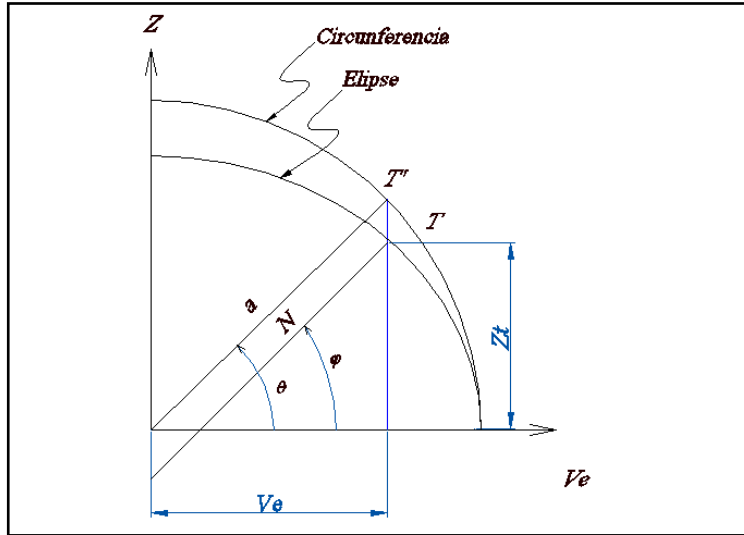


Figura.1.7. Latitud Paramétrica

Latitud	Coordenada Ze	Coordenada Ve	Relación $\frac{z_e}{v_e}$
Geodésica	$z_e = \frac{a(1-e^2)\text{sen}\varphi}{(1-e^2\text{sen}^2\varphi)^{1/2}}$ $z_e = N(1-e^2)\text{sen}\varphi$	$v_e = \frac{a \cos \varphi}{(1-e^2\text{sen}^2\varphi)^{1/2}}$ $v_e = N \cos \varphi$	$\frac{z_e}{v_e} = (1-e^2) \tan \varphi$
Geocéntrica	$z_e = R_{xy} \text{sen} \omega$ $R_{xy} = \sqrt{x^2 + y^2}$	$v_e = R_{xy} \cos \omega$	$\frac{z_e}{v_e} = \tan \omega$
Paramétrica	$z_e = b \text{sen} \theta$	$v_e = a \cos \theta$	$\frac{z_e}{v_e} = (1-f) \tan \theta$

Tabla 1. 2. Relaciones matemáticas de las coordenadas de la elipse meridiana en función de las latitudes.

1.7 Coordenadas del elipsoide

La distancia entre el punto T y el corte con el semieje menor se denomina la Gran Normal N . Esta distancia corresponde a un radio de curvatura principal del elipsoide, cuya ecuación es:

$$N = \frac{a}{\sqrt{1-e^2\text{sen}^2\varphi}} \quad [1.8]$$

$$N = \frac{a}{w} \quad [1.9]$$

Se define w , como:

$$w = (1-e^2\text{sen}^2\varphi)^{1/2} \quad [1.10]$$

Si se hace rotar la elipse meridiana alrededor del eje z , se puede obtener un elipsoide biaxial de revolución, como el mostrado en la figura 1.3. De esta manera es posible obtener las relaciones matemáticas de las coordenadas ortogonales en función de las coordenadas geodésicas, es decir: $(x, y, z) = f(\varphi, \lambda, h)$

$$\begin{aligned} x &= (N+h) \cos \lambda \cos \varphi \\ y &= (N+h) \text{sen} \lambda \cos \varphi \\ z &= [N(1-e^2) + h] \text{sen} \varphi \end{aligned} \quad [1.11]$$

Al considerar sobre el mismo modelo elipsoidal (ver figura 1.9), las relaciones $(x, y, z) = f(\varphi, \lambda)$, $(x, y, z) = f(\omega, \lambda)$ y $(x, y, z) = f(\theta, \lambda)$. Se obtienen las ecuaciones de la tabla 1.3.

<i>Latitudes</i>	<i>Geodésica</i> $(x, y, z) = f(\varphi, \lambda)$	<i>Geocéntrica</i> $(x, y, z) = f(\omega, \lambda)$	<i>Paramétrica</i> $(x, y, z) = f(\theta, \lambda)$
<i>Coordenadas</i>			
x	$x = N \cos \lambda \cos \varphi$	$x = R_{xyz} \cos \lambda \cos \omega$	$x = a \cos \lambda \cos \theta$
y	$y = N \sin \lambda \cos \varphi$	$y = R_{xyz} \sin \lambda \cos \omega$	$y = a \sin \lambda \cos \theta$
z	$z = N(1 - e^2) \sin \varphi$	$z = R_{xyz} \sin \omega$	$z = b \sin \theta$

Tabla 1.3. Relaciones matemáticas de las coordenadas del elipsoide en función de las latitudes.

Como se muestra en la figura el radio de curvatura geocéntrico corresponde a:

$$R_{xyz} = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2} \quad [1.12]$$

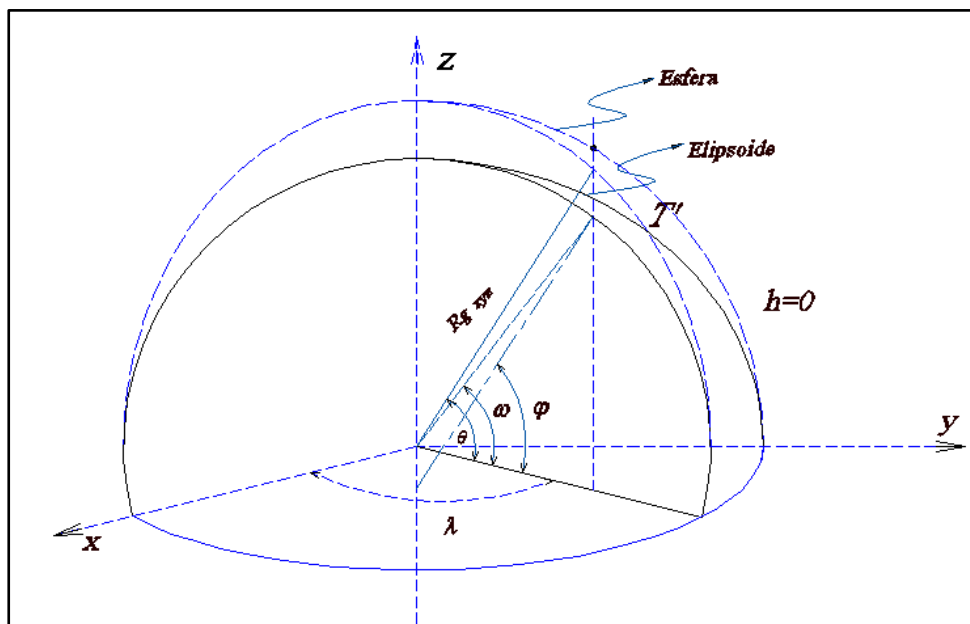


Figura 1.8. Latitudes Geodésica, Geocéntrica y Paramétrica en el Elipsoide.

1.8 Problema inverso de coordenadas geodésicas

Para determinar las coordenadas geodésicas conocidas las coordenadas ortogonales, es necesario realizar un problema inverso, es decir $(\varphi, \lambda, h) = f^{-1}(x, y, z)$. El problema inverso, es realmente el que se presenta en matemáticas; por ejemplo en posicionamiento satelital, conocidas las posiciones de los satélites, se define la posición geográfica del punto de interés.

Figura 1.9a. Elipsoide. 1.9b. Vista superior. Circunferencia. 1.9c. Elipse Meridiana.

En matemáticas existen problemas inversos lineales y no lineales, en este caso se tiene un problema inverso no lineal, el cual puede tener una única solución, no tener solución o tener infinitas soluciones. Generalmente estas soluciones pueden ser iteradas o no iteradas.

A continuación se muestran tres soluciones para el problema inverso. Considérese la figura 1.9, en la cual aparecen el punto de interés T y su proyección en el plano xy , así como la elipse meridiana v_e . Nótese que obtener la longitud es sencillo, tal como se menciona en la ecuación 1.13, ya que es directa, no es el caso de la latitud y la longitud, las cuales requieren unas consideraciones adicionales, sea o no iterada la solución obtenida.

1.8.1 Problema inverso sin iterar (solución exacta):

$$\lambda = \arctan\left(\frac{y}{x}\right) \quad [1.13]$$

$$\varphi = \arctan\left\{\frac{Z + e^2 b \operatorname{sen}^3 \gamma}{\sqrt{x^2 + y^2} - e^2 a \cos^3 \gamma}\right\} \quad [1.14]$$

$$\gamma = \arctan\left\{\frac{Za}{b\sqrt{x^2 + y^2}}\right\} \quad [1.15]$$

$$h = \frac{\sqrt{x^2 + y^2}}{\cos \varphi} - N \quad [1.16]$$

1.8.2 Problema inverso con iteraciones altura cero

$$\lambda = \arctan\left(\frac{y}{x}\right) \quad [1.17]$$

Primero se definen las condiciones iniciales, asumiendo $h_o=0$, obteniendo el valor inicial para la latitud llamado φ_o , de la misma manera se obtiene un valor para la primera normal N_1 .

$$\varphi_o = \arctan\left\{\left[\frac{Z}{\sqrt{x^2 + y^2}}\right] \left[1 + \frac{e^2}{1 - e^2}\right]\right\} \quad [1.18]$$

$$N_1 = \frac{a}{(1 - e^2 \operatorname{sen}^2 \varphi_o)^{1/2}} \quad [1.19]$$

Después se obtienen los datos para la N_2 y así se obtiene φ_1 , así sucesivamente se itera hasta N_n , obteniéndose φ_n , de la misma manera se obtienen cada una de las siguientes ecuaciones:

$$N_n = \frac{a}{\sqrt{1 - e^2 \operatorname{sen}^2 \varphi_{n-1}}} \quad [1.20]$$

$$\varphi_n = \arctan\left\{\frac{Z + e^2 N_n \operatorname{sen} \varphi_{n-1}}{\sqrt{x^2 + y^2}}\right\} \quad [1.21]$$

El ejercicio termina cuando $|\varphi_n - \varphi_{n-1}| \leq 10^{-12}$ radianes, después se calcula la longitud y la altura.

$$h_n = \frac{\sqrt{x^2 + y^2}}{\cos \varphi} - N_n \quad [1.22]$$

1.8.3 Problema inverso con iteraciones normal igual al semieje mayor

$$\lambda = 2 \arctan \left\{ \frac{y}{x + \sqrt{x^2 + y^2}} \right\} \quad [1.23]$$

Primero se definen las condiciones iniciales, asumiendo $h_o = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2} - \sqrt{ab}$ y $N_o = a$

$$\varphi_o = \arctan \left\{ \left[\frac{Z}{\sqrt{x^2 + y^2}} \right] \left[1 + \frac{e^2 N_o}{N_o + h_o} \right]^{-1} \right\} \quad [1.24]$$

Después se calculan los datos para la N_2 y se obtiene φ_1 , así sucesivamente se itera hasta N_n , obteniéndose φ_n de la misma manera se obtienen cada una de las siguientes ecuaciones:

$$N_n = \frac{a}{\sqrt{1 - e^2 \sin^2 \varphi_{n-1}}} \quad [1.25]$$

$$h_n = \frac{\sqrt{x^2 + y^2}}{\cos \varphi} - N_n \quad [1.26]$$

$$\varphi_n = \arctan \left\{ \left[\frac{Z}{\sqrt{x^2 + y^2}} \right] \left[1 + \frac{e^2 N_n}{N_n + h_n} \right]^{-1} \right\} \quad [1.27]$$

El ejercicio termina cuando $|\varphi_n - \varphi_{n-1}| \leq 10^{-12}$ radianes, después se calcula la longitud (ecuación 1.22) y la altura (ecuación 1.26).

1.9 Radios de Curvatura

Considerando que el elipsoide es una figura que tiene aplanamiento, todos los puntos que lo conforman no son equidistantes al origen, por tal razón es necesario definir las secciones normales, las cuales resultan de la intersección entre el elipsoide y un plano que contiene la normal N . De las infinitas secciones normales que se obtienen al realizar las intersecciones, existen dos secciones normales principales, llamadas la sección meridiana y primer vertical; son principales porque tienen el mayor (N) y menor radio de curvatura (M), Ver Tabla 1.4 y Figura 1.10.

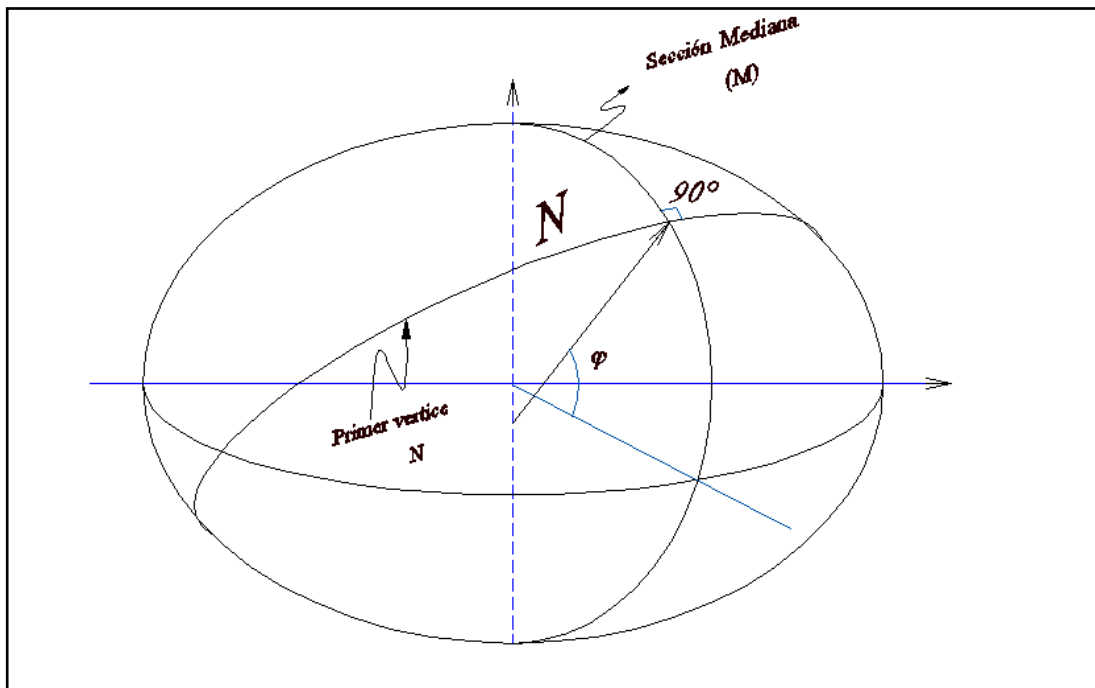


Figura 1.10. Secciones Normales Principales

La sección meridiana contiene los polos, el punto T y el radio N ; mientras que el primer vertical es perpendicular a la sección anterior y contiene el punto T y el radio N . Una sección normal en un azimut cualquiera corresponde a una sección que tiene una dirección entre dos puntos T y H , ver figura 1.11. Sin embargo, para un punto sobre el elipsoide, también es posible definir un radio promedio de curvatura, el cual se obtiene, a partir de las n -ésimas direcciones que pueden presentarse como azimutes entre los puntos, la integral resultante corresponde a la solución mostrada en la tabla 1.4.

Sección Normal	Símbolo	Fórmula
Sección Meridiana	M	$M = \frac{a(1-e^2)}{(1-e^2 \text{sen}^2 \varphi)^{3/2}}$
Primer Vertical	N	$N = \frac{a}{(1-e^2 \text{sen}^2 \varphi)^{1/2}}$
Azimut cualquiera	ρ_α	$\rho_\alpha = \frac{MN}{M \text{sen}^2 \alpha + N \cos^2 \alpha}$
Sección Promedio	$\bar{\rho}$	$\bar{\rho} = \sqrt{NM}$

Tabla 1.4. Relaciones matemáticas de los radios de curvatura sobre el elipsoide.

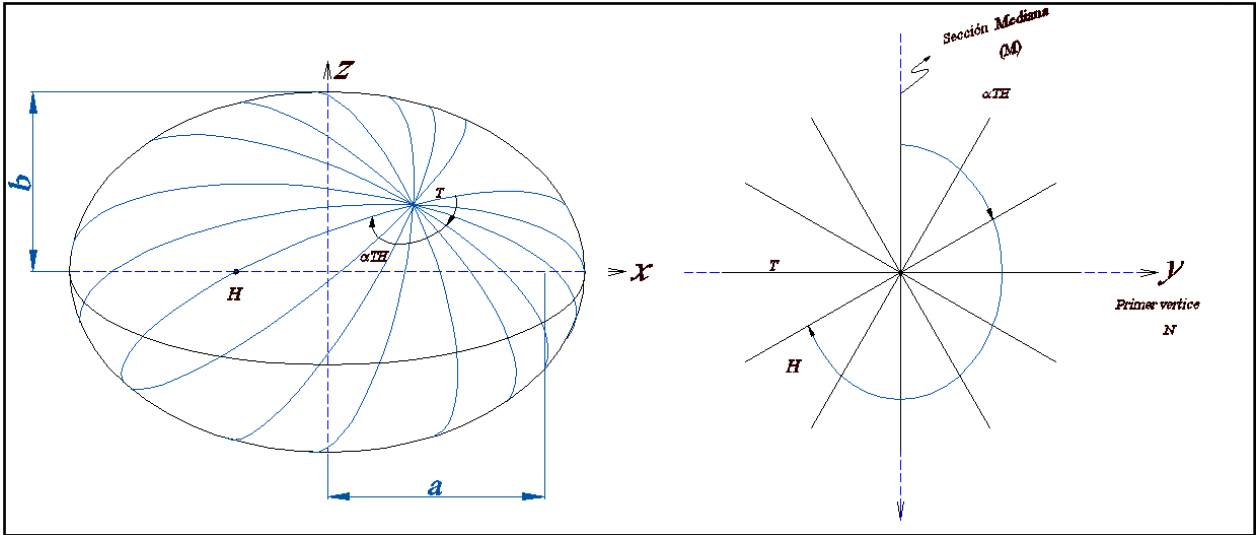


Figura 1.11. Radios de curvatura en un azimut cualquiera y radio de curvatura promedio.

1.10 Ejercicios

- Considera que la estación geodésica CIOH1, tiene los siguientes datos $\varphi = 10^{\circ} 23' 27.999668'' N$ y $\lambda = 75^{\circ} 32' 2.65888'' W$, calcular las coordenadas v_e y z_e de la elipse meridiana. Utilice los parámetros WGS84.
- Calcular las latitudes paramétrica (θ) y reducida (ω) para el punto CIOH1, el radio geocéntrico $R_{xy} = \sqrt{x^2 + y^2}$ y la gran Normal N . utilice las relaciones para la elipse meridiana.
- Calcular las coordenadas geodésica, geocéntrica y paramétrica para un elipsoide en el punto CIOH1.

d. Obtener las coordenadas ortogonales, $(x, y, z) = f(\varphi, \lambda, h)$, para los dátum internacional, GRS80 y WGS84. Sí se conoce que:

<i>Punto</i>	<i>Latitud (φ) Norte</i>	<i>Longitud (λ) Oeste</i>	<i>Altura Elipsoidal (h) metros</i>
<i>CIOHI</i>	<i>10° 23' 27.999668"</i>	<i>75°32' 2.65888"</i>	<i>-4.6355</i>
<i>LEVT</i>	<i>10° 23' 29.05171"</i>	<i>75°32' 0.84387"</i>	<i>-4.6854</i>
<i>LAMP</i>	<i>10° 23' 25.7719"</i>	<i>75°32' 1.190022"</i>	<i>-4.6631</i>

e. Con los datos obtenidos del problema anterior calcular $(\varphi, \lambda, h) = f^{-1}(x, y, z)$ por los tres métodos enseñados, para los datos del elipsoide GRS80.

f. Calcular los radios de curvatura: $M, N, \bar{\rho}, \rho_\alpha$ para el punto LAMP si se conoce que el azimut en dirección del punto AUX, es $\alpha_{LAMP-AUX} = 15^\circ 42' 2.65''$. Utilice los parámetros del dátum Bogotá.

Capítulo 2. Dátum y transformación de dátum

2.1. Dátum Geodésico

Un Dátum Geodésico es un modelo matemático, que corresponde al conjunto de parámetros que relacionan un sistema de referencia geodésico³ con un elipsoide, es la base fundamental para la ubicación geográfica de un punto de interés. Independiente del tipo de coordenadas de representación del punto (geodésicas o cartográficas), sus valores están en función del tamaño, orientación y ubicación del elipsoide de referencia asociado a un sistema coordenado (x, y, z) .

En los *dátum geodésicos, geocéntricos o globales*, su centro de masas coincide con el origen del sistema coordenado, mientras que en los *geodésicos locales*, también conocidos como *dátum geodésicos horizontales*, no ocurre lo mismo, estos fueron obtenidos a partir de coordenadas geodésicas (φ, λ) y alturas ortométricas (H) determinadas por separado; mientras las primeras están referidas a un elipsoide, las otras están asociadas al nivel medio del mar.

Hay cientos de dátum locales alrededor del mundo que usualmente fueron determinados según la conveniencia geográfica de cada lugar, cada uno de ellos tiene sus respectivos parámetros, esto significa que un punto específico de la tierra puede tener diferentes coordenadas dependiendo del dátum utilizado. Sin embargo, actualmente los Dátum geocéntricos, son los más utilizados a nivel internacional, por la versatilidad en la determinación de sus parámetros y la estandarización de los datos espaciales.

2.1.1. Dátum Bogotá y Red Arenas

En las primeras décadas del siglo XX, se realizó el posicionamiento geodésico a partir de la observación astronómica en estaciones de control, las cuales llegaron a ser 33 en el territorio nacional, una vez definido el origen del dátum en el Observatorio astronómico de Bogotá, desde 1936 se realizó la red de control geodésica horizontal, conocida como Red ARENA. La cual por facilidad, así como ocurrió en casi todos los países latinoamericanos, utilizó los parámetros del elipsoide Internacional (Hayford 1924). Durante más de 60 años de funcionamiento activo de la red ARENA se realizaron redes de primer, segundo y tercer orden. Las cuales comenzaron con dos redes principales e independientes, una en el centro del país entre las ciudades de Chiquinquirá-Cartago-Bogotá y otra en la costa Atlántica entre las ciudades de Cartagena y Santa Marta. Con las observaciones astronómicas y las técnicas de mínimos cuadrados se ajustaron estas redes. La técnica utilizada fue la medición de ángulos de las cadenas de triángulos y cuadriláteros generalmente de doble diagonal, cuyas estaciones siempre se ubicaban en los puntos más altos de las cordilleras. En la figura 2.1, se muestra una de estas redes principales.

³ Corresponde a una definición conceptual de un modelo matemático, que definen en el tiempo: la orientación, escala y ubicación de un sistema coordenado X, Y, Z .

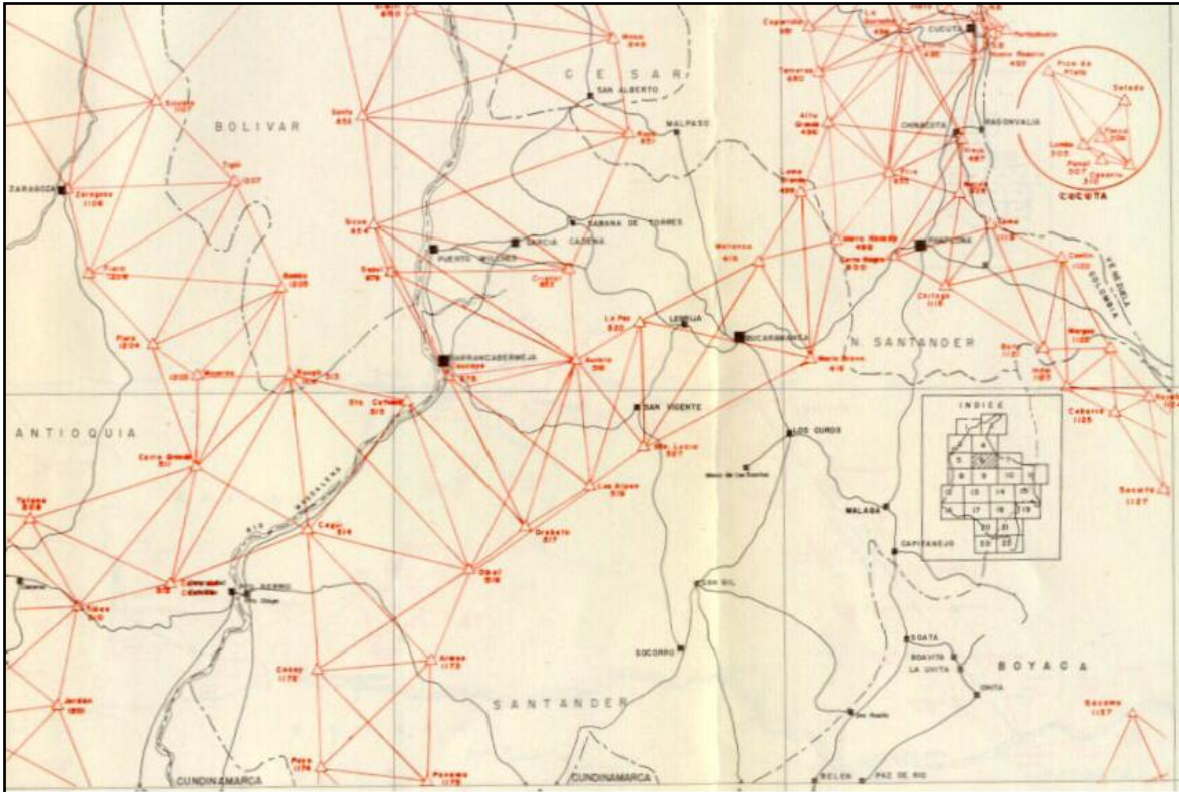


Figura 2.1.ARENA, Arco de triangulación Bogotá-Bucaramanga-Cúcuta. Tomado de MAGNA-SIRGAS. IGAC.

Para el cálculo de las alturas, estas fueron referidas al nivel medio del mar, también conocidas como alturas ortométricas. Las técnicas utilizadas para la nivelación fueron: nivelación geodésica diferencial para los puntos de control y nivelación trigonométrica con teodolito de precisión geodésico, para la mayoría de las estaciones.

El dátum Bogotá es horizontal, es decir, se calculó por separado de las coordenadas curvilíneas y la altura ortométrica, no es geocéntrico y al comparar sus resultados con observaciones GPS (Global Positioning System), se encontró que está desplazado en su origen alrededor de 530 metros con respecto al centro de masas del Dátum GRS80, que utiliza MAGNA. Tiene errores de consistencia interna de la red y de precisión asociados al tipo de expansión utilizado, es decir, del centro del país a los extremos, lo que redundaría en bajos errores en sitios de la Sabana de Bogotá y grandes errores en las estaciones más lejanas al origen. Sin embargo, esto no le resta importancia a la monumental tarea realizada por el IGAC. Considerando los equipos utilizados, las técnicas de adquisición y ajuste de la información. Esta magistral institución de más de medio siglo de desarrollo fue el resultado de la mística de un grupo de profesionales, sin los cuales no se hubiese obtenido la cartografía nacional vigente.

2.1.2. Dátum WGS84 y la RED MAGNA

Con el desarrollo tecnológico de los sistemas de posicionamiento satelital GNSS (Global Navigation Satellite System), la definición de los Sistemas de Referencia y los Marcos de Referencia, fue indispensable que el país desarrollara una red que se conoce como Marco Geocéntrico Nacional (MAGNA), y es la densificación nacional del Sistema de Referencia Geocéntrico para las Américas (SIRGAS).

La red MAGNA, cumple con todos los estándares internacionales y está conformada por 60 estaciones ocupadas con GPS (Global Positioning System) entre 1994 y 1997. De estas estaciones, 8 son vértices SIRGAS y 16 corresponden a la red geodinámica CASA (Central and South American Geodynamics Network). Sus coordenadas están definidas sobre el ITRF94 (International Terrestrial Reference Frame, 1994), época 1995.4. Su precisión

interna está en el orden de (± 2 m ± 7 mm), su exactitud horizontal en ± 2 cm y la vertical en ± 6 cm.⁴

El instituto Geográfico Agustín Codazzi, a través de la definición de MAGNA como el sistema de referencia para Colombia, emprendió una labor que busca en el mediano plazo garantizar una red geodésica con suficientes puntos de control para el desarrollo de las actividades de ingeniería, cartografía, de entidades oficiales y particulares que requieren de alta precisión para el control de sus levantamientos GPS. Este compromiso ha llevado al IGAC a implementar una red de estaciones Activas y Pasivas. En la figura 2.2, se observa una distribución homogénea de las estaciones que conforman la Red MAGNA.

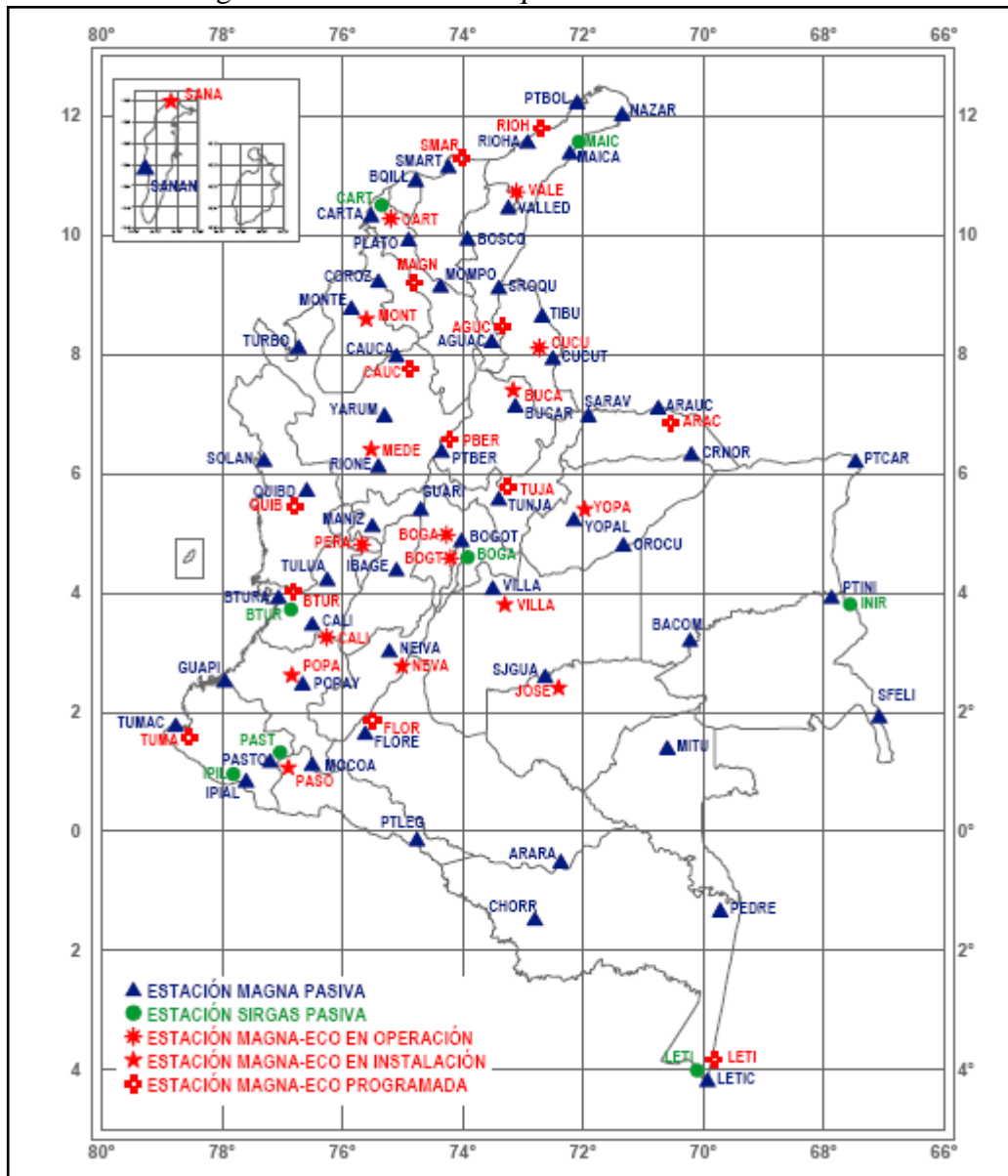


Figura 2.2 .Sistema MAGNA-SIRGAS. Red Básica GPS y estaciones de funcionamiento continuo a 2004. Tomado de MAGNA-SIRGAS. IGAC

⁴ De Instituto Geográfico Agustín Codazzi.
http://www.igac.gov.co:8080/igac_web/UserFiles/File/MAGNAWEB_final/MAGNAPasiva.htm

ITEM	Red ARENA	Red MAGNA SIRGAS
Año de Adopción	1941	2004
Dátum	Bogotá	WGS84
Vigencia	Más de 60 años	Actual
Método de determinación de la red geodésica	Convencional Triangulación Bisección, Poligonación (polígonos), Trilateración (determinación de longitudes)	Posiciones Geodésicas Obtenidas mediante la ocupación GPS nacionales, Red CASA, estaciones SIRGAS, Estaciones Permanentes, MAGNA-ECO
Parámetros y elipsoide	Internacional $a = 6'378\,388$ $f-1=297$	GRS80 $6'378\,137$ $f-1=298.2572223563$
Número de puntos	11 000 de primer, segundo y tercer orden	Más de 2 000 vértices de primer, segundo y tercer orden establecidos en varios proyectos.
Estaciones de Control y primer orden	33 estaciones astronómicas de control	60 estaciones de cobertura GPS Nacional de las cuales 8 son del Proyecto SIRGAS y 16 a la red Geodinámica CASA.
Tipo de Dátum	Horizontal – Bidimensional. Se definió con las coordenadas Geodésicas del punto origen y para el caso de la altura H se obtuvo a partir de mediciones del nivel medio del mar	Tridimensional. Las coordenadas Geodésicas se refieren al elipsoide
Precisión	Consistencia Interna de la Red De 0.01" a 0,1"	Consistencia Interna de la Red 2mm a 7 mm.
Exactitud	Latitud y Longitud aproximadamente 500 m.	Con respecto a las coordenadas Latitud y Longitud = 2 cm. Altura elipsoidal= 6 m
Coordenadas del punto (Observatorio Astronómico de Bogotá)	$\varphi = 4^{\circ} 35' 56.57'' N$ $\lambda = 74^{\circ} 04' 51.30'' W$ indeterminable	$\varphi = 4^{\circ} 35' 46.3215'' N$ $\lambda = 74^{\circ} 04' 39.0285'' W$ $h=2641.469m$ Hay una discrepancia mínima entre los sistemas ARENA y MAGNA de mínimo 500 m, representados así: $\Delta\varphi = -10.25'' \cong -307.5 m$ $\Delta\lambda = -12.27'' \cong -368.2 m$

Tabla 2.1. Comparación ARENA-MAGNA. Tomado y Modificado de MAGNA-SIRGAS. IGAC 2004.

2.1.3. Comparación entre los Dátum WGS84 y Bogotá

En la tabla 2.1, aparecen algunos elementos conceptuales, que permiten relacionar las Redes ARENA y MAGNA, vigentes en el territorio nacional, a partir de algunas características que las diferencian, es necesario definir un método matemático que las permita relacionarse, conocido como transformación de las coordenadas.

2.2. Deflexión de la vertical

Las superficies de referencia elipsoide y geoide, son diferentes representaciones de la tierra; el elipsoide corresponde a una abstracción matemática de un sistema de referencia, que se define a partir de los parámetros geométricos, mientras que en el geoide se deben considerar parámetros físicos matemáticos⁵. Considerando la existencia de esas dos superficies de referencia, para un punto T , como se muestra en la figura 2.3, la deflexión de la vertical es un ángulo (θ) formado, por los vectores normales al elipsoide y el geoide, cuyas alturas asociadas⁶ son respectivamente h altura elipsoidal y H altura ortométrica. La

⁵ Remítase al capítulo 4: superficies de representación de la tierra y sus parámetros

⁶ Remítase al capítulo 4: tipos de alturas

deflexión de la vertical es una magnitud física que se encuentra en función de la latitud y longitud geodésica y astronómica, la cual se define como:

$$\theta = \sqrt{\varepsilon^2 + \eta^2} \quad [2.1]$$

Donde

ε = Componente vertical de la deflexión de la vertical y

η = componente horizontal de la deflexión de la vertical

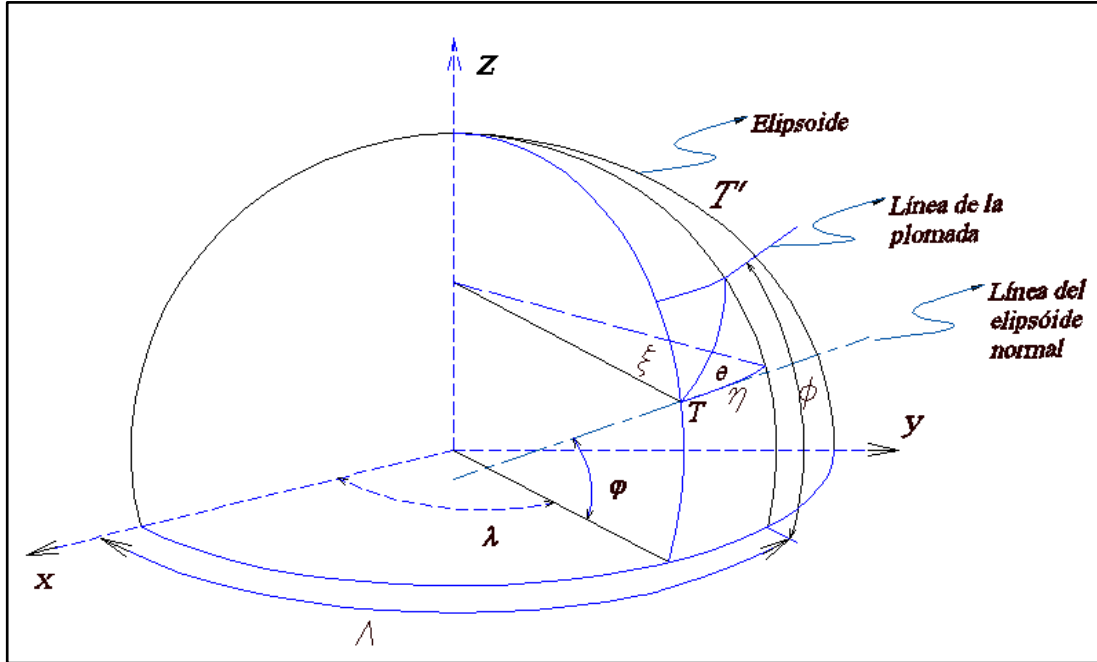


Figura 2 3. Deflexión de la vertical.

Cuyas componentes presentan las siguientes relaciones matemáticas

$$\varepsilon = \phi - \varphi \quad [2.2]$$

$$\eta = (\Lambda - \lambda) \cos \varphi \quad [2.3]$$

Donde

ϕ = Latitud Astronómica

φ = Latitud Geodésica

Λ = Longitud Astronómica

λ = Longitud Geodésica

La orientación del punto origen o marca fiducial de un dátum clásico como Bogotá, fue obtenida a partir de azimutes astronómicos convertidos a geodésicos; de esta manera se obtuvo la Estación de Laplace, cuya representación matemática es:

$$A - \alpha = \eta \tan \varphi + (\varepsilon * \text{sen } \alpha - \eta * \text{cos } \alpha) \cot Z \quad [2.4]$$

Donde

A = Azimut astronómico

α = Azimut elipsoidal

Z = Distancia Cenital

Generalmente $\cot Z \cong 0$ con lo que la ecuación se simplifica como

$$A - \alpha = \eta \tan \varphi \quad [2.5]$$

En la definición de un Dátum local, las ecuaciones 2.2, 2.3 y 2.5 se resuelven de una manera práctica, considerando el punto origen del dátum definido por la letra T , de la siguiente manera:

$$\phi_T = \varphi_T, \Lambda_T = \lambda_T \text{ y } A_T = \alpha_T \quad [2.6]$$

En otras palabras, las diferencias entre los parámetros geodésicos y astronómicos para el punto origen se consideran iguales a cero, pero además, en ese punto es fundamental considerar que la ondulación geoidal también es cero, $N_T = 0$. En el análisis realizado a partir de los datos obtenidos en el *IGAC* para la red *MAGNA*, se encuentra que esta consideración clásica que fue válida al asumir la equivalencia de las coordenadas astronómicas observadas y la altura nivelada a partir del nivel medio del mar, con las correspondientes coordenadas elipsoidales en dátum WGS84, permite una aproximación del elipsoide al geode en el punto origen; sin embargo, esta consideración conduce a errores significativos en las áreas más alejadas de este punto⁷.

2.3. Transformación de Dátum

De acuerdo a los elementos antes mencionados con respecto a las redes geodésicas clásicas y sus consideraciones teóricas en la determinación de las coordenadas geodésicas del punto origen, además de la dificultad que significa calcular el centro de masas de la tierra, se hace indispensable la transformación de dátum. Mientras en una red de triangulación geodésica clásica el propósito es calcular los parámetros de la misma, es decir $a, f, \varepsilon_T, \eta_T$ y N_T , para el caso de un dátum geocéntrico el problema consiste en determinar los arámetros a, f, x_o, y_o y z_o , que con los actuales sistemas de posicionamiento GNSS, consisten en resolver un problema inverso para la definición del origen del dátum. Sin embargo, el problema de transformación de dátum no se reduce a calcular estos cinco parámetros, se requiere una mejor solución, por ejemplo una que incluye 7 parámetros de transformación de coordenadas rectangulares.

2.4. Transformación de los Siete Parámetros

Cuando es necesario determinar las coordenadas de un punto T en un dátum diferente con respecto al que se obtuvieron, es indispensable realizar una transformación. Generalmente se utiliza una transformación de siete parámetros mencionados a continuación y que se muestran en la figura 2.4.

- Tres parámetros de traslación. $\Delta x, \Delta y$ y Δz
- Tres parámetros de rotación con respecto a los ejes R_x, R_y y R_z .
- Un factor de escala λ

⁷ Ibid

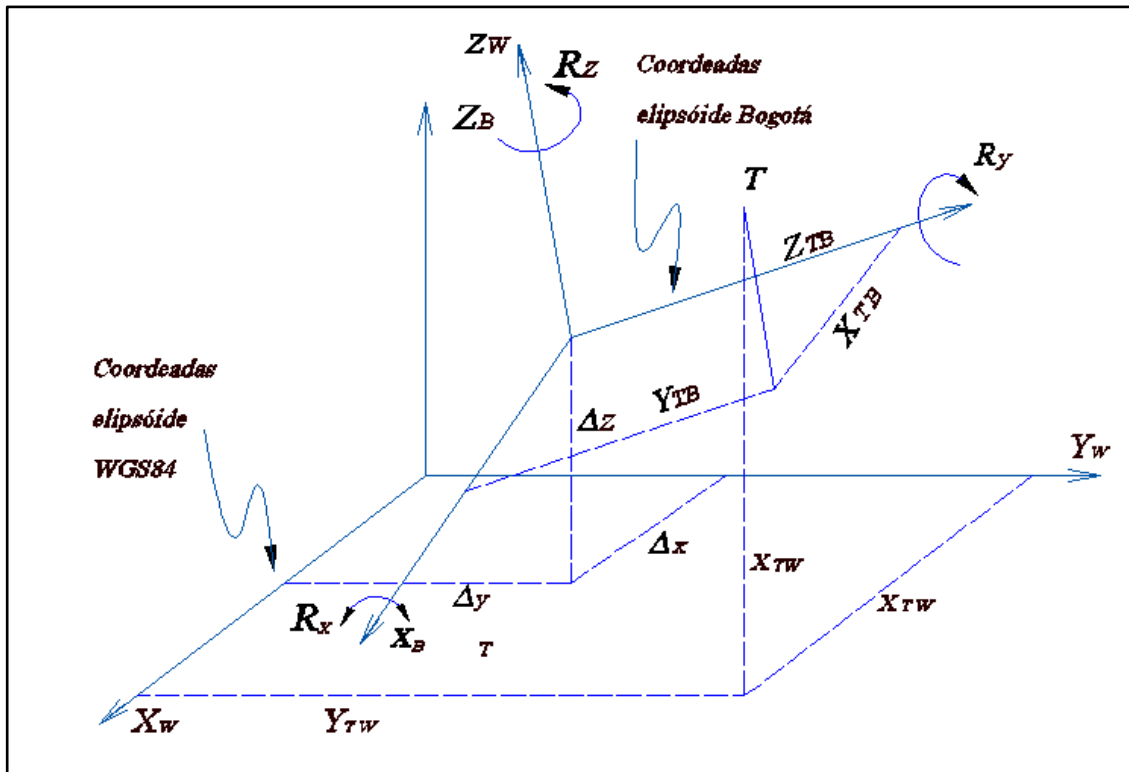


Figura 2.4. Transformación de Dátum

Conocidas las coordenadas en dátum Bogotá del punto T, se define la transformación de dátum a WGS84, a través de la siguiente relación matricial:

$$\chi^W = \Delta\chi + \tilde{\lambda}\mathcal{R}\chi^B \quad [2.7]$$

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}_W = \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \\ \Delta z \end{bmatrix} + (1 + \tilde{\lambda}) \begin{bmatrix} 1 & R_z & -R_y \\ -R_z & 1 & R_x \\ R_y & -R_x & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}_B \quad [2.8]$$

En el documento del IGAC llamado *Aspectos Prácticos de la Adopción del Marco de Referencia MAGNA – SIRGAS como Dátum Oficial de Colombia* (pág. 34) aparece con el nombre de la transformación de similitud de Helmert, su característica es que el factor de escala es el mismo en todas las direcciones, los ángulos (formas) se mantienen constantes, mientras que las extensiones y posiciones de la línea si cambian. Como se menciona en ese documento, el país fue dividido en 8 regiones de transformación de parámetros⁸ (Traslación, factor de escala y rotación) según el índice de planchas del IGAC.

⁸ Los parámetros de transformación de cada una de las zonas, para las dos transformaciones deben ser consultados en el documento del IGAC mencionado, disponible en internet o en la página institucional.

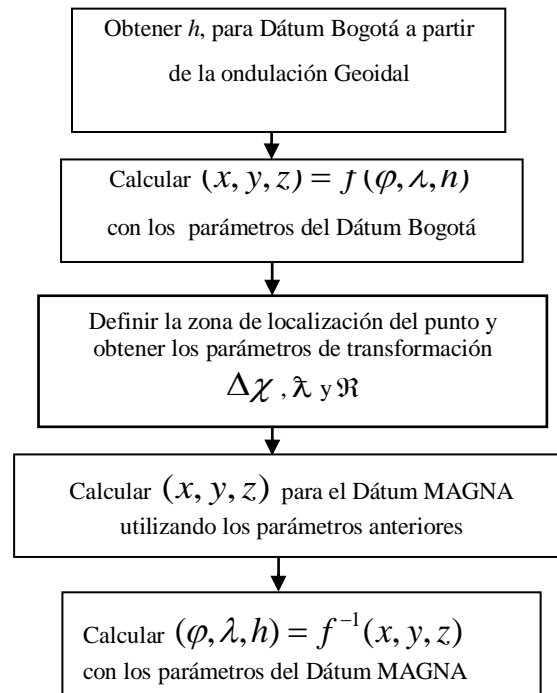


Figura 2.5. Pasos para la Transformación del Dátum.

Estas regiones son el resultado del análisis físico matemático (modelo geoidal) de la superficie de cada una de las zonas de estudio. Una vez realizadas varias campañas de adquisición de datos GPS y valores absolutos de gravedad, se encontró que esta era la manera más exacta y precisa para obtener transformaciones adecuadas entre los dos dátum, dadas las características de la red ARENA, en cuanto su: geometría, precisión, época de toma de datos y valores absolutos de gravedad. En la figura 2.5, se muestran los pasos para realizar la transformación de las coordenadas.

2.5. Transformación de Molodensky – Badekas

El método de transformación de Helmert, presenta unas restricciones en sus parámetros de traslación y rotación, para redes geodésicas pequeñas su correlación es alta, por lo tanto se obtiene una mejor precisión en los parámetros de transformación en función del punto central del área, esto implica considerar las coordenadas geocéntricas del punto central (χ_o) a la ecuación 2.9, obteniéndose la conocida transformación Molodesnky – Badekas.

$$\chi^W = \Delta\chi + \chi_o + \tilde{\lambda}\mathfrak{R}(\chi^B - \chi_o) \quad [2.9]$$

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}_M = \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \\ \Delta z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} x_o \\ y_o \\ z_o \end{bmatrix} + (1 + \tilde{\lambda}) \begin{bmatrix} 1 & R_z & -R_y \\ -R_z & 1 & R_x \\ R_y & -R_x & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x - x_o \\ y - y_o \\ z - z_o \end{bmatrix} \quad [2.10]$$

Los pasos para realizar esta transformación, son los mismos que los mostrados en la figura 2.5, para realizar esta transformación simplemente se deben adicionar las coordenadas del punto central, tal como se muestra en la ecuación 2.11.

2.6. Método de Molodensky

Este método permite realizar una conversión directa entre dos sistemas de coordenadas geográficas y su relación matemática se puede expresar en términos de la función $(\varphi, \lambda, h)_w = f(\varphi, \lambda, \Delta a, \Delta f, b, e, \Delta x, \Delta y, \Delta z)$, que se representa a través de la siguiente relación matricial, conocida como la fórmula clásica de Molodensky.

$$\begin{bmatrix} (M+h)\Delta\varphi \\ [(N+h)\cos\varphi]\Delta\lambda \\ \Delta h \end{bmatrix}_w = \begin{bmatrix} -\text{sen}\varphi\cos\lambda & -\text{sen}\lambda & \cos\varphi\cos\lambda \\ -\text{sen}\varphi\text{sen}\lambda & \cos\lambda & \cos\varphi\cos\lambda \\ \cos\lambda & 0 & \text{sen}\varphi \end{bmatrix}_B \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \\ \Delta z \end{bmatrix} \quad [2.11]$$

$$+ \begin{bmatrix} (Ne^2\text{sen}\varphi\cos\varphi)/a & [M(a/b) + N(b/a)]\text{sen}\varphi\cos\varphi\cos\lambda \\ 0 & 0 \\ -a/N & (b/a)N\text{sen}^2\varphi \end{bmatrix}_B \begin{bmatrix} \Delta a \\ \Delta f \end{bmatrix}$$

Reescribiendo las ecuaciones y considerando un factor de conversión a segundos para mayor precisión se tiene:

$$\Delta\varphi'' = \left[-\Delta x \text{sen}\varphi\cos\lambda - \Delta y \text{sen}\varphi\text{sen}\lambda + \Delta z \cos\varphi + \frac{\Delta a}{a} (Ne^2\text{sen}\varphi\cos\varphi) + \Delta f \left(M\frac{a}{b} + N\frac{a}{b} \right) \text{sen}\varphi\cos\varphi \right] / [(M+h)\text{sen}1'']$$

$$\Delta\lambda'' = \left[-\Delta x \text{sen}\lambda + \Delta y \cos\lambda \right] / [(N+h)\cos\varphi\text{sen}1'']$$

$$\Delta h = \left[\Delta x \cos\varphi\cos\lambda + \Delta y \cos\varphi\text{sen}\lambda + \Delta z \text{sen}\varphi - \Delta a \left(\frac{a}{N} \right) + \Delta f \left(\frac{b}{a} \right) N\text{sen}^2\varphi \right] \quad [2.12]$$

La versión abreviada del método Molodensky, es la representada por la siguiente relación matricial.

$$\begin{bmatrix} (M)\Delta\varphi \\ [N\cos\varphi]\Delta\lambda \\ \Delta h \end{bmatrix}_w = \begin{bmatrix} -\text{sen}\varphi\cos\lambda & -\text{sen}\lambda & \cos\varphi\cos\lambda \\ -\text{sen}\varphi\text{sen}\lambda & \cos\lambda & \cos\varphi\cos\lambda \\ \cos\lambda & 0 & \text{sen}\varphi \end{bmatrix}_B \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \\ \Delta z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} f\text{sen}2\varphi & a\text{sen}2\varphi \\ 0 & 0 \\ f\text{sen}^2\varphi & a\text{sen}^2\varphi \end{bmatrix}_B \begin{bmatrix} \Delta a \\ \Delta f \end{bmatrix} \quad [2.13]$$

Reescribiendo las ecuaciones y considerando un factor de conversión a segundos para mayor precisión se tiene:

$$\Delta\varphi'' = \left[-\Delta x \text{sen}\varphi\cos\lambda - \Delta y \text{sen}\varphi\text{sen}\lambda + \Delta z \cos\varphi + (a\Delta f + f\Delta a)\text{sen}2\varphi \right] / (M\text{sen}1'')$$

$$\Delta\lambda'' = \left[-\Delta x \text{sen}\lambda - \Delta y \cos\lambda \right] / (N\cos\varphi\text{sen}1'')$$

$$\Delta h = \left[\Delta x \cos\varphi\cos\lambda + \Delta y \cos\varphi\text{sen}\lambda + \Delta z \text{sen}\varphi + (a\Delta f + f\Delta a)\text{sen}^2\varphi - \Delta a \right] \quad [2.14]$$

Donde se tiene:

- Parámetros de traslación: Δx , Δy y Δz .
- Las diferencias entre los elipsoides $\Delta a = a^W - a^B$ y $\Delta f = f^W - f^B$
- Coordenadas geodésicas del punto en dátum Bogotá (φ , λ , h)
- Los parámetros del elipsoide: semiejes, aplanamiento y primera excentricidad a , b , f y e
- Los radios de curvatura de la sección meridiana y el primer vertical; M y N respectivamente. Definidos en la tabla 1.4.

2.7. Ejercicios

- a. Considere que la estación geodésica CIOH1, tuvo un posicionamiento GPS, cuyas coordenadas son $\varphi = 10^{\circ} 23' 26.85'' N$ y $\lambda = 75^{\circ} 32' 0.33'' W$ y $h=5.5$. Identifique la zona según la clasificación de MAGNA-SIRGAS de acuerdo a las coordenadas geográficas, obtenga los parámetros y determine las coordenadas en Dátum Bogotá por el método de Helmert.
- b. Considere la misma estación anterior CIOH1, y ahora obtenga las coordenadas en Dátum Bogotá, por el método de Molodensky-Badekas.
- c. Calcule las coordenadas geodésicas en Dátum Bogotá, por el método de Molodensky para el mismo punto y compare los resultados obtenidos por los tres métodos.
- d. Obtener las coordenadas geodésicas en Dátum Bogotá para los puntos de la siguiente tabla, por los métodos de Helmer y Molodensky-Badekas. Compare los resultados, con los datos obtenidos del capítulo 1, ejercicio 5.

<i>Punto</i>	<i>Latitud (φ) Norte</i>	<i>Longitud (λ) Oeste</i>	<i>Altura Elipsoidal (h) metros</i>
<i>CIOH1</i>	<i>10° 23' 27.999668''</i>	<i>75° 32' 2.65888''</i>	<i>-4.6355</i>
<i>LEVT</i>	<i>10° 23' 29.05171''</i>	<i>75° 32' 0.84387''</i>	<i>-4.6854</i>
<i>LAMP</i>	<i>10° 23' 25.7719''</i>	<i>75° 32' 1.190022''</i>	<i>-4.6631</i>

Capítulo 3. Proyecciones Cartográficas

3.1. Proyecciones Cartográficas

En los capítulos anteriores se definió un modelo de geometría no euclidiana como representación de la superficie de tierra, en la cual un punto del elipsoide se localiza por el sistema de coordenadas geodésicas o curvilíneas (latitud, longitud y altura). Pero en la práctica se requiere una representación euclidiana bidimensional (nortes, estes), es decir sobre una superficie plana, como un mapa impreso o digital, que sea versátil en la determinación de las distancias, posicionamiento de puntos, cartas náuticas, localización de zonas de interés, cálculo de áreas y otras necesidades temáticas. Lo que lleva a definir una *Proyección Cartográfica* como una correspondencia biunívoca entre los puntos de la superficie terrestre y los puntos de un plano llamado Plano de proyección.

Algunas *proyecciones cartográficas* asumen un modelo esférico como representación de la tierra y utilizan diferentes escalas; también se utilizan modelos elipsoidales, cuya escala de representación es 1:1 y se conocen como *proyecciones geodésicas*. El estudio de las proyecciones se realiza mediante la *cartografía matemática* que es la ciencia que utiliza transformaciones matemáticas de coordenadas entre las superficies curvilíneas y un plano de proyección; estas transformaciones implican considerar entre otros elementos: factores de escala, distorsiones, convergencia de meridianos, líneas loxodrómicas, simetrías y grillas. Independiente de las ecuaciones de transformación de la proyección: *toda representación de la superficie curvilínea, puede ser reemplazada por una proyección ortogonal plana realizada a una escala conveniente*. Este enunciado es la *ley fundamental de la deformación* de cartografía matemática.

Una esfera o un elipsoide, no son figuras desarrollables en un plano, su representación a través de un plano de proyección genera una distorsión en sus propiedades geométricas: ángulos, áreas y distancias. En la tabla 3.1., se muestra una clasificación general de las proyecciones cartográficas, según sus propiedades de forma: Conforme, Equiárea, Equidistante y arbitrarias que se clasifican en un grupo aparte de las anteriores, como las Loxodrómicas que conservan los rumbos. También se realiza una clasificación según la superficie desarrollable: Cilíndrica, Azimutal y Cónica.

Estas clasificaciones de las proyecciones no son excluyentes entre forma y superficie desarrollable, por ejemplo una proyección cartográfica puede ser conforme y cilíndrica, como la proyección Mercator, conforme y cónica, como la proyección Bipolar Oblicua Conforme Cónica. Mientras que en las propiedades de forma, si se presentan condiciones de exclusión, por ejemplo *ninguna proyección puede ser equivalente y conforme a la vez*.

Es indispensable mencionar que en ningún caso se pretende realizar una clasificación detallada de las proyecciones, como la realizada por la USGS (United States Geological Survey) o por la ICA (International Cartography Association) o la DMA (The Defense Mapping Agency), sólo se busca entender los conceptos generales de las proyecciones, en términos de sus distorsiones y superficies desarrollables, en este capítulo se hará énfasis en las proyecciones Gauss-Krüger, UTM y Mercator, puesto que son las de mayor interés para la DIMAR y el CIOH.

En la tabla 3.2 aparecen algunas de las proyecciones generales: propiedades de forma, extensión, área de localización y propósito general; que sirven de base conceptual para la elaboración de mapas análogos y digitales de la DIMAR.

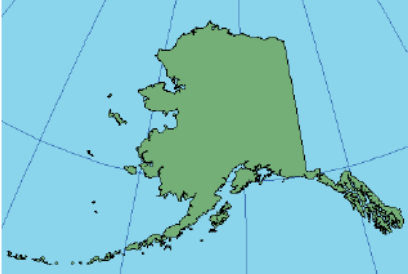
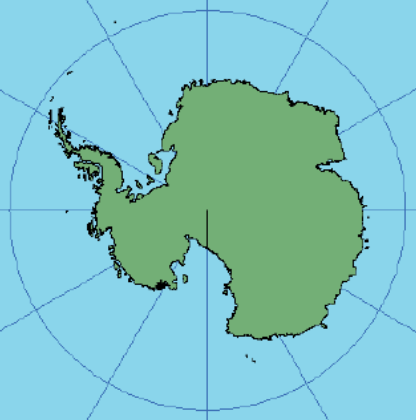
Clasificación de los Sistemas de Proyección	Tipo de Proyección	Características	Ejemplos	Gráfica de ejemplo
Deformación	Conforme	<p>Son aquellas proyecciones que mantienen los ángulos existentes entre líneas en la superficie terrestre conservando la forma de los objetos. Este tipo de proyecciones presentan meridianos y paralelos que se cruzan en ángulo recto y la escala es la misma en todas las direcciones alrededor de un punto, sea el punto que sea. Los paralelos amplían su distancia de separación a medida que se acercan a los polos</p> <p>La cualidad métrica que pierden es el tamaño de la superficie cartografiada deformándose longitudes y áreas, lo que afecta principalmente al factor de escala de tal manera que no será constante entre regiones del mapa. El término "mapa conforme" es a veces erróneo, pues las condiciones de conformidad sólo son válidas en áreas pequeñas, porque la forma de los continentes difiere entre la realidad y el mapa.</p>	<p>Alaska Grid Esterográfica Mercator Gauss-Krüger UTM (Universal Transverse Mercator) USP (Universal Polar Sterographic)</p>	 <p>Alaska Grid. Tomado de Map Projections</p>
	Equiárea o Equivalente	<p>Mantiene el área de la superficie curvilínea en el plano de proyección y la conservan equivalente en todas las zonas de un mapa, lo que implica la distorsión de las otras propiedades: forma, ángulos y escala. La cualidad métrica de forma es la más afectada</p> <p>La separación entre paralelos va disminuyendo a mayor latitud: la reducción de la escala a lo largo del meridiano es compensada exactamente por el aumento de la escala a lo largo del paralelo. Ninguna proyección puede ser equivalente y conforme a la vez.</p>	<p>Mollweide Lambert Azimutal Cónica Equivalente Albers Ecker II Robinson</p>	 <p>Lambert Azimuthal Equal Area. Tomado de Map Projections</p>

Tabla 3.1 a. Clasificación de los sistemas de proyección por deformación.


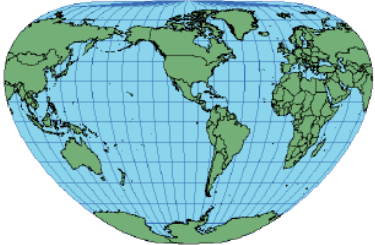






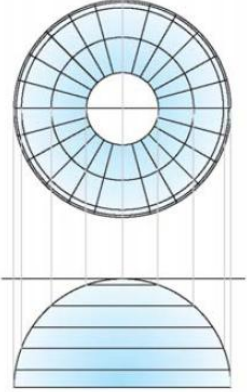
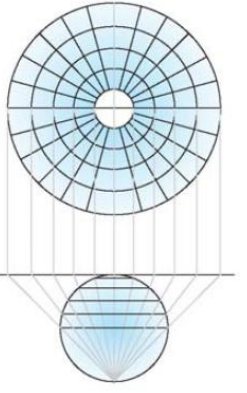
Clasificación de los Sistemas de Proyección	Tipo de Proyección	Características	Ejemplos	Gráfica de ejemplo
Deformación	Equidistante	<p>Proyecciones que preservan la distancia entre ciertos puntos, aunque este término significa la conservación de distancias, en realidad no existe sistema alguno que conserve las distancias en todas las direcciones del mapa. Sin embargo, existen proyecciones que mantienen inalteradas las distancias según determinadas direcciones definidas a priori, por lo que reciben esta denominación.</p> <p>La escala no es mantenida correctamente, sin embargo una o más líneas a lo largo del mapa sí la mantienen en la mayoría de las proyecciones, al igual que algunas longitudes específicas, independiente del tamaño de la línea o curva definida. Por ejemplo en la proyección sinusoidal, el Ecuador y todos los paralelos tienen su verdadera longitud. En otras proyecciones, no sólo los paralelos sino también los meridianos tienen verdadera longitud.</p>	<p>Equidistante Cónica</p> <p>Equirectangular</p> <p>Simple Cónica</p> <p>Plate – Carée</p>	 <p>Equidistant Conic Tomado de Map Projections</p>
Arbitrarias		<p>Como su nombre lo indica, son aquellas proyecciones escogidas para ubicarlas según la necesidad, no buscan conservar ninguna de las cualidades métricas en consideración, pero son diseñadas de tal forma que minimicen las deformaciones. Por ejemplo, las proyecciones que mantienen el rumbo, también conocidas como loxodrómicas.</p>	<p>Loximutal</p> <p>Mercator</p>	 <p>Loximuthal Tomado de Map Projections</p>

Tabla 3.1 a. Clasificación de los sistemas de proyección por deformación.

Clasificación de los Sistemas de Proyección	Tipo de Proyección	Características	Según la proyección del eje	Gráfica de Ejemplo
Superficie Desarrollable	Cilíndricas	<p>Estas proyecciones utilizan un cilindro como figura geométrica de proyección, el cual puede ser tangente o secante a la superficie terrestre.</p> <p>En todas las proyecciones de este grupo, los paralelos son líneas rectas, cuya longitud es la misma que la del Ecuador, mientras que los meridianos son también líneas rectas paralelas separados entre sí una longitud que es correcta solamente en el Ecuador. Paralelos y meridianos se cortan entre sí ortogonalmente. Los meridianos tienen la misma longitud, pero los paralelos se incrementan más cerca al polo.</p> <p>Es una proyección conforme y muestra la verdadera dirección a lo largo de líneas rectas. La proyección Mercator es una de las más comunes, con tangencia en el Ecuador. En esta proyección las líneas de rumbo son rectas y constantes.</p>	<p><i>Normal:</i> Cuando el eje del cilindro, es tangente al plano del Ecuador</p>	 <p>Tomado de Map Projections</p>
			<p><i>Transversa:</i> Cuando el eje del cilindro es tangente al meridiano central.</p>	 <p>Tomado de Map Projections</p>
			<p><i>Oblicua:</i> Cuando el eje del cilindro pasa por el centro de la Tierra en cualquier dirección.</p>	 <p>Tomado de Map Projections</p>

Clasificación de los Sistemas de Proyección	Tipo de Proyección	Características	Ejemplos	Gráfica de ejemplo
Superficie Desarrollable	Azimutales Sistemas Punto de Tangencia	<p>Son también conocidas como <i>Proyecciones Planas o Cenitales</i>, lo que indica que es un sistema de proyección que conserva los azimutes de las direcciones originadas desde el punto origen de la proyección a otro cualquiera dentro del plano. En este caso, el mapa se obtiene por la proyección de la superficie terrestre sobre un plano generalmente tangente en un punto determinado.</p> <p>La imagen con respecto al origen se proyecta manteniendo sus características, sin embargo, a medida que se aleja del origen hacia los extremos del plano de proyección, las distorsiones aumentarán. Utilizando esta proyección sólo sería posible mapear un hemisferio.</p>	<p><i>Polar:</i> Cuando <i>M</i> coincide con alguno de los polos de la Tierra.</p>	 <p>Tomado de Map Projections</p>
			<p><i>Transversa o Meridiana:</i> Cuando el punto <i>M</i> está situado sobre el Ecuador.</p>	 <p>Tomado de Map Projections</p>
			<p><i>Horizontal u Oblicua:</i> Cuando <i>M</i> se encuentra en cualquier otra posición.</p>	 <p>Tomado de Map Projections</p>

Clasificación de los Sistemas de Proyección	Tipo de Proyección	Características	Ejemplos	Gráfica de ejemplo
Superficie Desarrollable	Acimutales Sistemas Perspectivos.	<p>Son también conocidas como <i>Proyecciones Planas o Cenitales</i>, lo que indica que es un sistema de proyección que conserva los acimuts de las direcciones originadas desde el punto origen de la proyección a otro cualquiera dentro del plano. En este caso el mapa se obtiene por la proyección de la superficie terrestre sobre un plano generalmente tangente en un punto determinado.</p>	<p><i>Ortográfica:</i> Si el punto origen se encuentra en el infinito.</p>	 <p>Tomado de Map Projections</p>
		<p>La imagen con respecto al origen se proyecta manteniendo sus características, sin embargo a medida que se aleja del origen hacia los extremos del plano de proyección, las distorsiones aumentarán. Utilizando esta proyección sólo sería posible mapear un hemisferio. Este es idéntico al anterior.</p>	<p><i>Estereográfica:</i> Si la proyección es vista de polo a polo.</p>	 <p>Tomado de Map Projections</p>

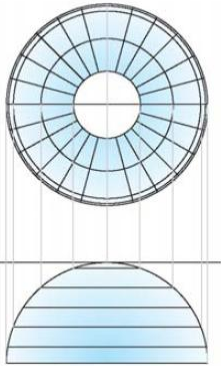
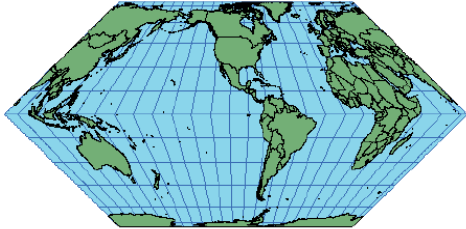
Clasificación de los Sistemas de Proyección	Tipo de Proyección	Características	Según la proyección del eje	Gráfica de Ejemplo
Superficie Desarrollable	Acimutales Sistemas Perspectivos.	<p>Son también conocidas como <i>Proyecciones Planas o Cenitales</i>, lo que indica que es un sistema de proyección que conserva los acimuts de las direcciones originadas desde el punto origen de la proyección a otro cualquiera dentro del plano. En este caso el mapa se obtiene por la proyección de la superficie terrestre sobre un plano generalmente tangente en un punto determinado.</p> <p>La imagen con respecto al origen se proyecta manteniendo sus características, sin embargo a medida que se aleja del origen hacia los extremos del plano de proyección, las distorsiones aumentarán. Utilizando esta proyección sólo sería posible mapear un hemisferio</p>	<p><i>Gnomónica</i>: Si el punto origen coincide con el centro de la Tierra. La grafica está repetida</p>	 <p>Tomado de Map Projections</p>
Otros Sistemas	Otros Sistemas	<p>Existen otros tipos de proyecciones cartográficas que no pueden ser catalogadas con las características mencionadas. Por ejemplo la proyección Ecker II, cuyos paralelos y meridianos son líneas rectas, con los paralelos en los polos con una longitud igual a la mitad del ecuador.</p>	<p><i>Seudocilíndricos</i></p>	 <p>Tomado de Map Projections</p>

Tabla 3.1 b. Clasificación de los sistemas de proyección por superficie desarrollable.

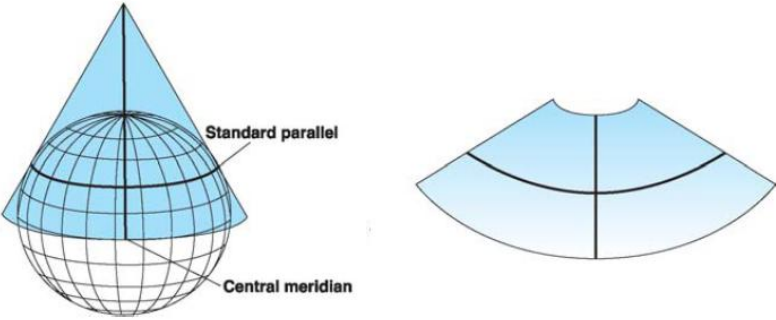
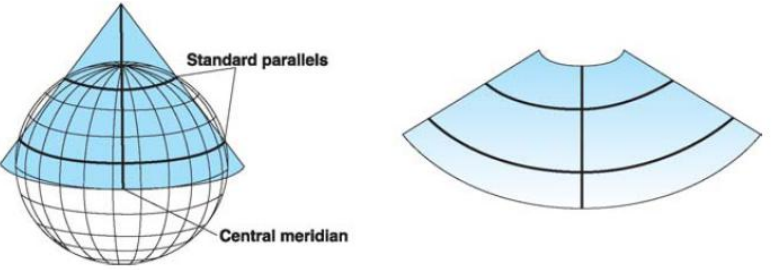
Clasificación de los Sistemas de Proyección	Tipo de Proyección	Características	Gráfica de Ejemplo
Superficie Desarrollable	Cónicas	<p>En las proyecciones cónicas, la imagen de la superficie de la tierra se proyecta en un cono. El eje del cono coincide con el eje de los polos, y el contacto de cono y esfera se produce a lo largo de un paralelo llamado estándar (también puede ser secante obteniendo dos paralelos estándar).</p> <p>El eje del cono puede ubicarse en cualquier posición y debe pasar por el centro de la Tierra, lo que permite que también se clasifiquen en <i>Directos</i>, <i>Transversos</i> y <i>Oblicuos</i>, este último no muy común.</p>	 <p>Tomado de Map Projections</p>
		<p>Generalmente, el cono es ubicado sobre uno de los polos de tal forma que los puntos de tangencia forman un círculo paralelo al ecuador y sobre el cual se presentan mínimas distorsiones pero aumentan a medida que se alejan del mismo. Por esta misma condición, la proyección sólo es aconsejable para cartografiar pequeñas áreas o hasta una cuarta parte de la Tierra.</p>	 <p>Tomado de Map Projections</p>

Tabla 3.1 b. Clasificación de los sistemas de proyección por superficie desarrollable.

Nombre de la proyección	Tipo	Propiedades					Extensión adecuada de representación					Localización y Forma					Propósito General							
		Conforme	Equiárea	Equidistante	Acimutales	Perspectiva	Conserva Rumbos	Mundial	Hemisferio	Continental/Océanica	Mar/Regional	Media Escala	Gran Escala	Note/Sur	Este/Oeste	Oblicua	Ecuatorial	Latitud Media	Polar/Circular	Topográfica	Geológica	Temática	Presentación	Navegación
Azimutal Equidistante	Planar			X	X			**	X	X		**				X	X	X	X				X	X
Cilíndrica Equiárea	Cilíndrica		X		X									X		X						X		
Equidistante-Cónica	Cónica			X					**	X				X			X					X		
Gauss Krüger	Cilíndrica Transversa	X							X	X	X	X	X			X	X		X	X				X
Geográfica	Esférica	X	X	X	X		X														X	X		
Lambert Conforme Cónica	Cónica	X			**				X	X	X	X		X			X		X	X		X	X	X
Mercator	Cilíndrica	X				X	**			X	X	X		X		X			X	X			X	X
Polar Estereográfica	Planar	X			X	**		X	X		X						X		X			X		X
UTM	Cilíndrica Transversa	X								X	X	X	X			X	X		X					X

X: Mínima Distorsión

** : Distorsión Moderada en la Mayoría del Área

Tabla 3.2. Características de algunas proyecciones cartográficas. Tomado de Map Projections.

3.2. Proyección Transversa de Mercator. Gauss- Krüger

La Proyección Transversa de Mercator es un sistema de representación: cilíndrica, conforme y transversa y es la más conocida de las proyecciones geodésicas en Colombia, se utiliza para la representación cartográfica de la superficie total del país, actualmente en dátum WGS84 y hace unos años en dátum Bogotá.

En esta proyección, el meridiano central se conoce como meridiano origen y corresponde a la línea de tangencia entre el elipsoide y el cilindro. En el meridiano origen no se presentan deformaciones con un factor de escala $m=1$, incrementándose éstas a medida que alejan los puntos de él. Por tal razón para representar el País, la superficie del elipsoide se divide en proyecciones de 3° de amplitud cada una con diferentes orígenes.

Fue definida por la necesidad de corregir las distorsiones que presenta la Proyección Conforme de Mercator en latitudes elevadas, por el aumento de las separaciones entre los paralelos a medida que se aleja del Ecuador, pero buscando preservar su característica de coincidencia de ángulos entre el mapa y superficie terrestre. También es conocida como Proyección Conforme Transversa, Proyección Transversa de Mercator, Sistema Cilíndrico de Lambert y *Proyección Conforme de Gauss – Krüger*, por los matemáticos que la definieron. Véase la figura 3.1.

Su construcción consiste en la utilización de un cilindro tangente a un meridiano en todos sus puntos, definiendo un huso horario. Este procedimiento indica que para cartografiar toda la superficie terrestre, deben desarrollarse proyecciones análogas en todos los meridianos que la rodean, según la extensión definida para las proyecciones parciales con diferencia de longitud geográfica según el meridiano tangente. De esta forma, se mantiene un control de las deformaciones sobre cada uno de los meridianos manejando igualdad de condiciones o parámetros para toda la tierra.

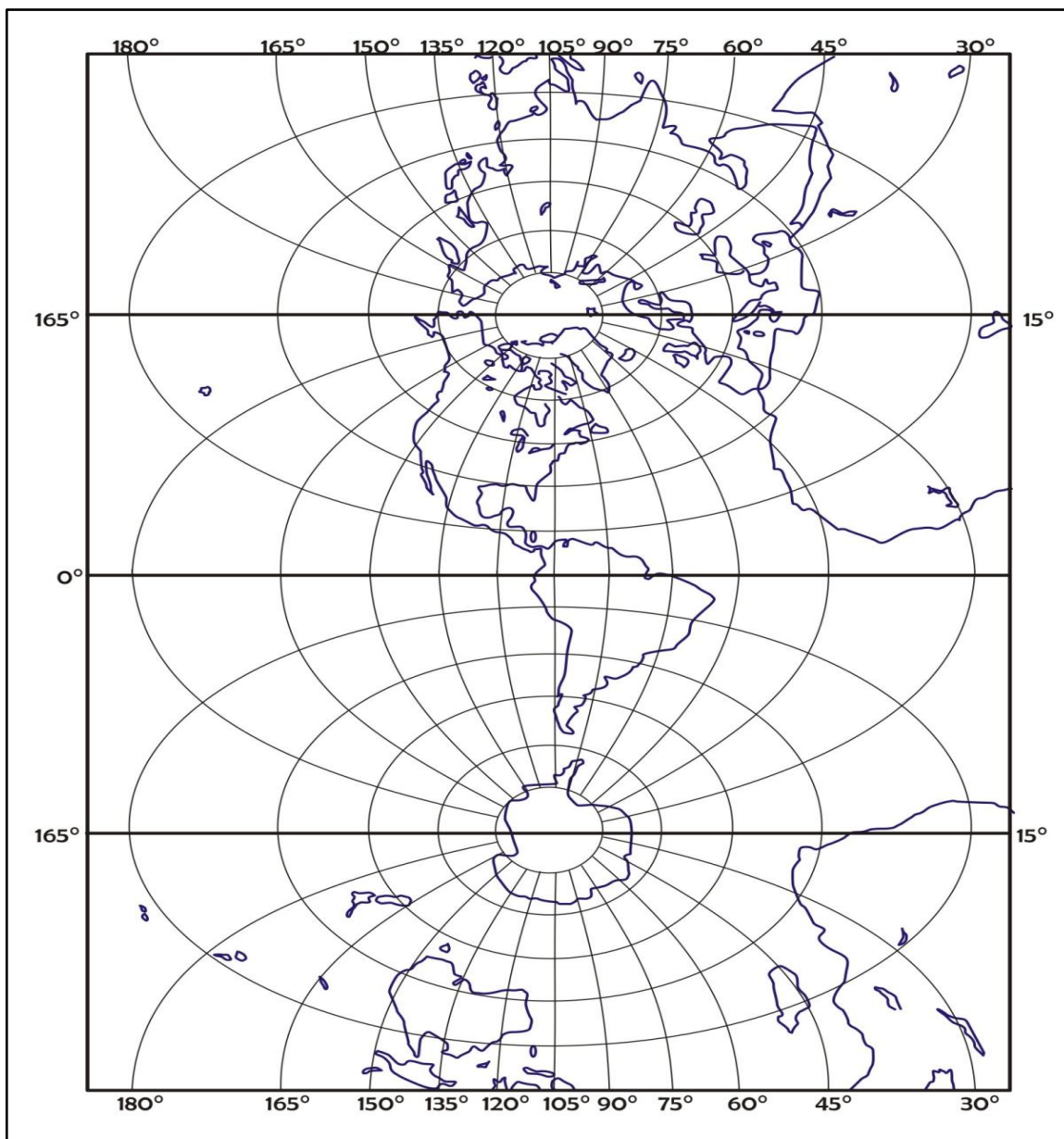


Figura 3.1. Proyección Gauss Krüger

En la proyección Gauss- Krüger, se cumplen las siguientes reglas y características:

- a. El meridiano central y el Ecuador son líneas rectas, el resto de los meridianos y paralelos son curvas complejas.
- b. El meridiano central no tiene distorsión, por lo tanto su factor de escala es $m=1$. Garantizando su escala verdadera a lo largo del mismo.
- c. El área de extensión es de $1^{\circ} 30'$ a lado y lado del meridiano central para el caso de Colombia, con husos de 3° de ancho.
- d. Conforme Cilíndrica Horizontal (el eje está orientado paralelo al plano ecuatorial).
- e. A las coordenadas x e y , es decir *nortes* y *estes* se les suma $1'000.000\text{m}$ a cada una en Colombia.
- f. Se extienden en dirección norte sur, entre 80° N y 80° S únicamente.
- g. La superficie de la tierra proyectada corresponde a un elipsoide de revolución.

3.2.1. Problema directo

Considérese la figura 3.1, en la cual se tiene representados el elipsoide y la proyección Conforme de Gauss.

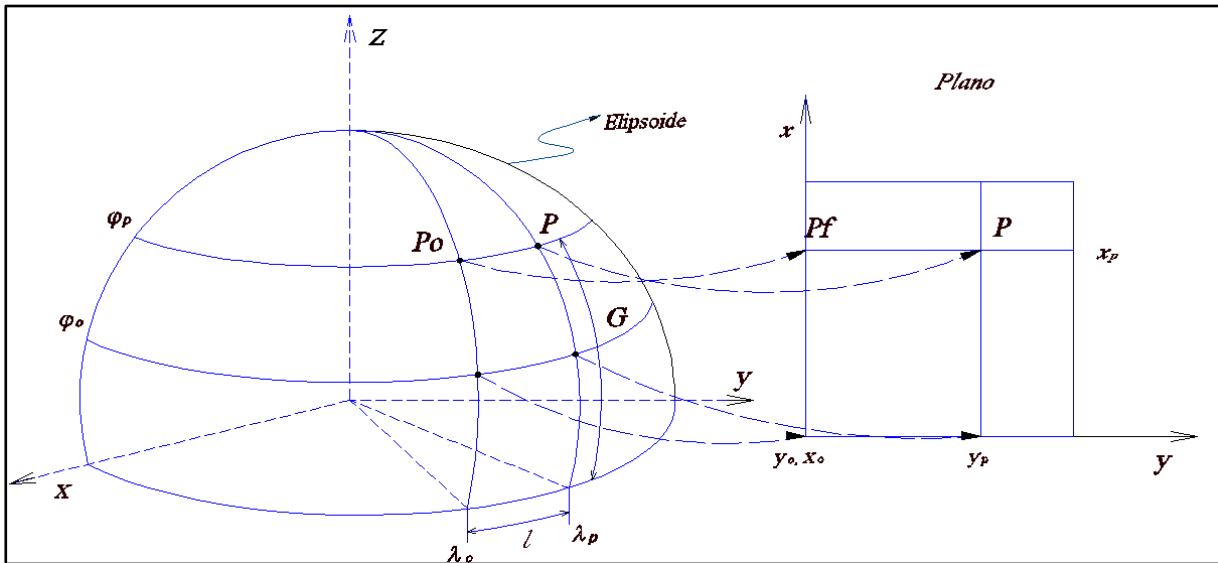


Figura 3.2. Superficies Curvilínea y plana en la Proyección Gauss – Krüger.

Se definen:

$(\varphi_o, \lambda_o) =$ Coordenadas geodésicas del punto origen

$(\varphi_p, \lambda_p) =$ Coordenadas geodésicas del punto de cálculo

$(y_o, x_o) =$ Coordenadas planas del punto origen

$(y_p, x_p) =$ Coordenadas planas del punto de cálculo

$P_o =$ Punto sobre el meridiano de referencia con la misma latitud del punto de cálculo

$P_f =$ Punto guía el meridiano de referencia con la misma coordenada x , del punto de cálculo, es decir $x_p = x_{P_f}$

$l =$ Diferencia de longitud entre el punto de cálculo y el meridiano de referencia

Una proyección cartográfica es una transformación de coordenadas entre dos superficies, definida como:

$$(x, y) = f(\varphi, \lambda) \quad [3.1]$$

Es decir es, una función en donde un punto de cálculo sobre el elipsoide, con sus coordenadas geodésicas latitud y longitud se puede representar por uno y solo un punto en coordenadas cartesianas sobre un plano. Esta imagen de puntos del elipsoide sobre el plano, en cartografía se conoce como el *problema directo*. Dado que el elipsoide presenta curvatura, es necesario considerar los parámetros curvilíneos sobre el elipsoide (q, l); $q =$ latitud isométrica y $l =$ longitud reducida. Entonces la relación matemática 3.1 se puede definir en términos de los elementos diferenciales de arco sobre el elipsoide y el plano de proyección de la siguiente manera:

$$\begin{aligned}x &= x(q,l) \\y &= y(q,l)\end{aligned}\tag{3.2}$$

Estos parámetros permiten definir la superficie de isometría del elipsoide, en la proyección Conforme Gauss-Krüger y de acuerdo a las ecuaciones diferenciales de Cauchy y Riemann, se define una transformación diferencial como una función de variable compleja de la siguiente manera:

$$x + iy = F(q, il)\tag{3.3}$$

Donde F , se conoce como la función de proyección del mapa y se cumple en ella para el punto origen, que:

$$\begin{aligned}q = 0 &\Rightarrow x = 0 \\l = 0 &\Rightarrow y = 0\end{aligned}\tag{3.4}$$

Se define el problema directo de la proyección cartográfica Gauss- Krüger en términos de la siguiente relación: $(Nortes, Estes) = F(a, b, f, e^2, \varphi, \lambda, m, q, l)$ que es el resultado de resolver la ecuación 3.3 a través de un desarrollo en Series de Taylor⁹, y se obtiene el resultado mostrado en las ecuaciones 3.5 y 3.6.

Coordenada Norte

$$\begin{aligned}Nortes = x &= (G(\varphi) - G(\varphi_o)) + \left(\frac{t}{2}\right)(N \cos^2 \varphi)l^2 \\&+ \left(\frac{t}{24} N \cos^4 \varphi\right)(5 - t^2 + 9t^4 + 4\eta^4)l^4 \\&+ \left(\frac{t}{720} N \cos^6 \varphi\right)(61 - 58t^2 + t^4 + 270\eta^2 - 330t^2\eta^2)l^6 \\&+ \left(\frac{t}{40320} N \cos^8 \varphi\right)(1385 - 3111t^2 + 543t^4 - t^6)l^8 + \dots + 1'000.000\end{aligned}$$

[3.5]

Coordenada Este

$$\begin{aligned}Estes = y &= (N \cos \varphi)l + \left(\frac{1}{6} N \cos^3 \varphi\right)(1 - t^2 + \eta^2)l^3 \\&+ \left(\frac{1}{120} N \cos^5 \varphi\right)(5 - 18t^2 + t^4 + 14\eta^2 - 58t^2\eta^2)l^5 \\&+ \left(\frac{1}{5040} N \cos^7 \varphi\right)(61 - 479t^2 + 179t^4 - t^6)l^7 + \dots + 1'000.000\end{aligned}\tag{3.6}$$

El arco de Meridiano del Punto de cálculo es:

$$G(\varphi) = \frac{a}{1+n} (\alpha\varphi - \beta\text{sen}2\varphi + \gamma\text{sen}4\varphi - \delta\text{sen}6\varphi + \epsilon\text{sen}8\varphi)\tag{3.7}$$

⁹ Se omite los pasos intermedios

Donde se definen:

$\varphi = \varphi_P$	$l = \lambda_P - \lambda_o$	$n = \frac{a+b}{a-b} = \frac{f}{2-f}$
$N = \frac{a}{(1-e^2 \text{sen}^2 \varphi)^{1/2}}$	$\eta^2 = \frac{e^2}{1-e^2} \cos^2 \varphi$	$t = \tan \varphi$
$\alpha = 1 + \frac{1}{4}n^2 + \frac{1}{64}n^4$	$\beta = \frac{3}{2} \left(n - \frac{n^3}{8} \right)$	$\gamma = \frac{15}{16} \left(n^2 - \frac{n^4}{4} \right)$
$\delta = \frac{35}{48}n^3$	$\varepsilon = \frac{315}{512}n^4$	

Tabla 3.3. Parámetros de transformación del problema directo Gauss Krüger

Los parámetros del elipsoide a, b, f y e^2 fueron definidos en la sección 1.5.

3.2.2. Problema Inverso

Como se tiene una relación biunívoca de los puntos también es posible definir el *problema inverso*, en el cual se pueden obtener las coordenadas geodésicas conocidas las coordenadas cartesianas, mediante la relación inversa de la ecuación 3.1:

$$(\varphi, \lambda) = f^{-1}(x, y) \quad [3.8]$$

También se debe resolver una función de variable compleja expresada en la ecuación:

$$(q, il) = F^{-1}(x + iy) \quad [3.9]$$

Entonces el problema directo de la proyección cartográfica Gauss- Krüger en términos de la siguiente relación: $\varphi, \lambda, m, q, l = F^{-1}(a, b, f, e^2, \text{Nortes}, \text{Estes})$ con el que se resuelve 3.8 también a través de serie de Taylor¹⁰, y se obtiene el resultado mostrado en las ecuaciones 3.10 y 3.11.

Latitud

$$\begin{aligned} \varphi = \varphi_o - & \left(\frac{t}{2N^2} \right) (1 + \eta^2) \Delta E^2 + \left(\frac{t}{24N^4} \right) (5 + 3t^2 + 6\eta^2 - 6t^2\eta^2 - 3\eta^4 - 9t^2\eta^4) \Delta E^4 \\ & - \left(\frac{t}{720N^6} \right) (61 + 90t^2 + 45t^4 + 107\eta^2 - 162t^2\eta^2 - 45t^4\eta^2) \Delta E^6 \\ & + \left(\frac{t}{40320N^8} \right) (1385 + 3633t^2 + 4096t^4 + 1575t^6) \Delta E^8 \end{aligned} \quad [3.10]$$

Longitud

$$\begin{aligned} \lambda = \lambda_o + & \left(\frac{1}{N \cos \varphi} \right) \Delta E - \left(\frac{1}{6N^3 \cos \varphi} \right) (1 + 2t^2 + \eta^2) \Delta E^3 \\ & + \left(\frac{1}{120N^5 \cos \varphi} \right) (5 + 28t^2 + 24t^4 + 6\eta^2 + 8t^2\eta^2) \Delta E^5 \end{aligned}$$

¹⁰ ibid

$$-\left(\frac{1}{5040N^7 \cos \varphi}\right)(61 + 662t^2 + 1320t^4 + 720t^6)\Delta E^7 \quad [3.11]$$

La latitud del punto Guía, es:

$$\varphi = \frac{\Delta N}{\alpha} + \beta \operatorname{sen}\left(\frac{2\Delta N}{\alpha}\right) + \gamma \operatorname{sen}\left(\frac{4\Delta N}{\alpha}\right) + \delta \operatorname{sen}\left(\frac{6\Delta N}{\alpha}\right) + \varepsilon \operatorname{sen}\left(\frac{8\Delta N}{\alpha}\right) \quad [3.12]$$

Los meridianos en un elipsoide coinciden en el polo norte, mientras que casi todas las proyecciones conforme esto no se cumple, porque no proyectan las zonas polares. El ángulo que se presenta entre la posición real del meridiano y la posición proyectada en el mapa se conoce como la Convergencia de Meridianos Ψ , cuya ecuación es:

$$\Psi = \frac{\Delta E}{N} t \left(1 + \frac{1}{6} \frac{\Delta E^2}{N^2} (1 - 2t^2 + 5\eta^2)\right) \quad [3.13]$$

Se mencionó que el factor de escala del meridiano origen se mantiene constante, mientras que las zonas alejadas de él, presentan una distorsión en el factor de escala, la cual para cualquier punto de la proyección que no se encuentre en el meridiano central, es:

$$m^2 = 1 + \cos^2 \varphi (1 + \eta^2) t^2 + \frac{1}{3} \cos^4 \varphi (2 - t^2) t^4 \quad [3.14]$$

Donde se definen:

$\varphi_f = \varphi$	$\eta^2 = \frac{e^2}{1-e^2} \cos^2 \varphi$	$n = \frac{a+b}{a-b} = \frac{f}{2-f}$
$t = \tan \varphi$	$N = \frac{a}{(1-e^2 \operatorname{sen}^2 \varphi)^{1/2}}$	$\Delta N = N - N_o$
$\Delta E = E - E_o$	$\alpha = \left(\frac{a+b}{2}\right) \left(1 + \frac{1}{4} n^2 + \frac{1}{64} n^4\right)$	$\beta = \frac{3}{2} n - \frac{27}{32} n^3 + \frac{269}{512} n^5$
$\gamma = \frac{21}{16} n^2 - \frac{55}{32} n^4$	$\delta = \frac{151}{96} n^3 - \frac{417}{128} n^5$	$\varepsilon = \frac{1097}{512} n^4$

Tabla 3.4. Parámetros de transformación del problema inverso Gauss Krüger.

3.3. Proyección UTM

La Proyección Universal Transversa de Mercator (U.T.M), es un sistema cilíndrico transverso por utilizar un cilindro como figura geométrica de proyección perpendicular a un plano meridiano en particular, y conforme porque conserva las magnitudes angulares tanto en dirección como en sentido basado en la Proyección Transversa de Mercator o Gauss – Krüger, tras la necesidad en la Segunda Guerra Mundial de contar con cartografía precisa y única para toda la superficie terrestre. Mientras que en la proyección Gauss-Krüger el factor de escala $m=1$ para el meridiano central, en la proyección UTM se incluye un valor m_o , cuyo factor global generalmente es $m_o=0.9996$. Obteniéndose una verdadera distancia de proyección aproximadamente 180 Km con respecto al meridiano central.

Generalmente se introduce un falso este de 500 km, para evitar valores negativos al oeste del meridiano central y para puntos al sur del Ecuador se utiliza un falso norte de 10000 km, con el mismo propósito.

En esta proyección se establecen las siguientes características:

- La superficie de la tierra proyectada, corresponde a un elipsoide biaxial de revolución.
- Conserva ángulos verdaderos.
- El meridiano central y el Ecuador son líneas rectas, el resto de los meridianos y paralelos son curvas complejas.
- El origen de la longitud es el meridiano central y el de la latitud es el Ecuador.
- Posee una mínima distorsión en áreas grandes de cada zona.
- La unidad de medida es el metro.
- Representa la forma real de la superficie terrestre.
- Se divide en 60 *husos* de 6° de amplitud cada uno.
- A las coordenadas en el Hemisferio Sur se les suma 10 millones de metros, evitándose con esto las coordenadas negativas.
- El meridiano central tiene una coordenada x igual a 500 mil metros.
- Favorece la medición de distancias porque conserva una escala constante a lo largo del meridiano central. Con el fin de reducir la distorsión lateral de cada zona y conseguir que presenten un factor de escala igual a uno (1) se aplica un factor de 0.9996 en líneas ubicadas a 180 km hacia el este y oeste del meridiano central.
- No contempla las regiones polares.
- Permite la transformación de coordenadas U. T. M. entre husos contiguos.

El producto final, será un mapa con la representación ortogonal de meridianos y paralelos, los meridianos estarán separados a igual distancia pero los paralelos se distanciarán a medida que se aumente la latitud, concluyéndose que no existirá distorsión en los puntos tangentes al globo. Esta proyección es comúnmente utilizada en la realización de mapas mundiales.

Debido al rango de latitudes comprendido entre los 80° N y 80° S, cada zona se dividirá en secciones de 8° de latitud lo que da como resultado la existencia de 20 secciones por huso; se agrupan todas las secciones con igual latitud para ser denominadas filas facilitando su identificación por la asignación de letras mayúsculas desde la C hasta la X sin contar con las siguientes: CH, I, LL, Ñ y O, las letras A, B, Y, Z serán reservadas para las regiones polares, permitiendo así identificar claramente todas las regiones sobre la superficie del elipsoide. Mientras que las zonas de los meridianos se numeran de 1 a 60, comenzando en 1 para la zona 180° W, incrementándose de 6° hasta llegar a 60 para la zona 174° E; para el caso de Colombia las zonas de interés son 17, 18 y 19. Véase figura 3.3 que muestra la Zona del Caribe Colombiano.

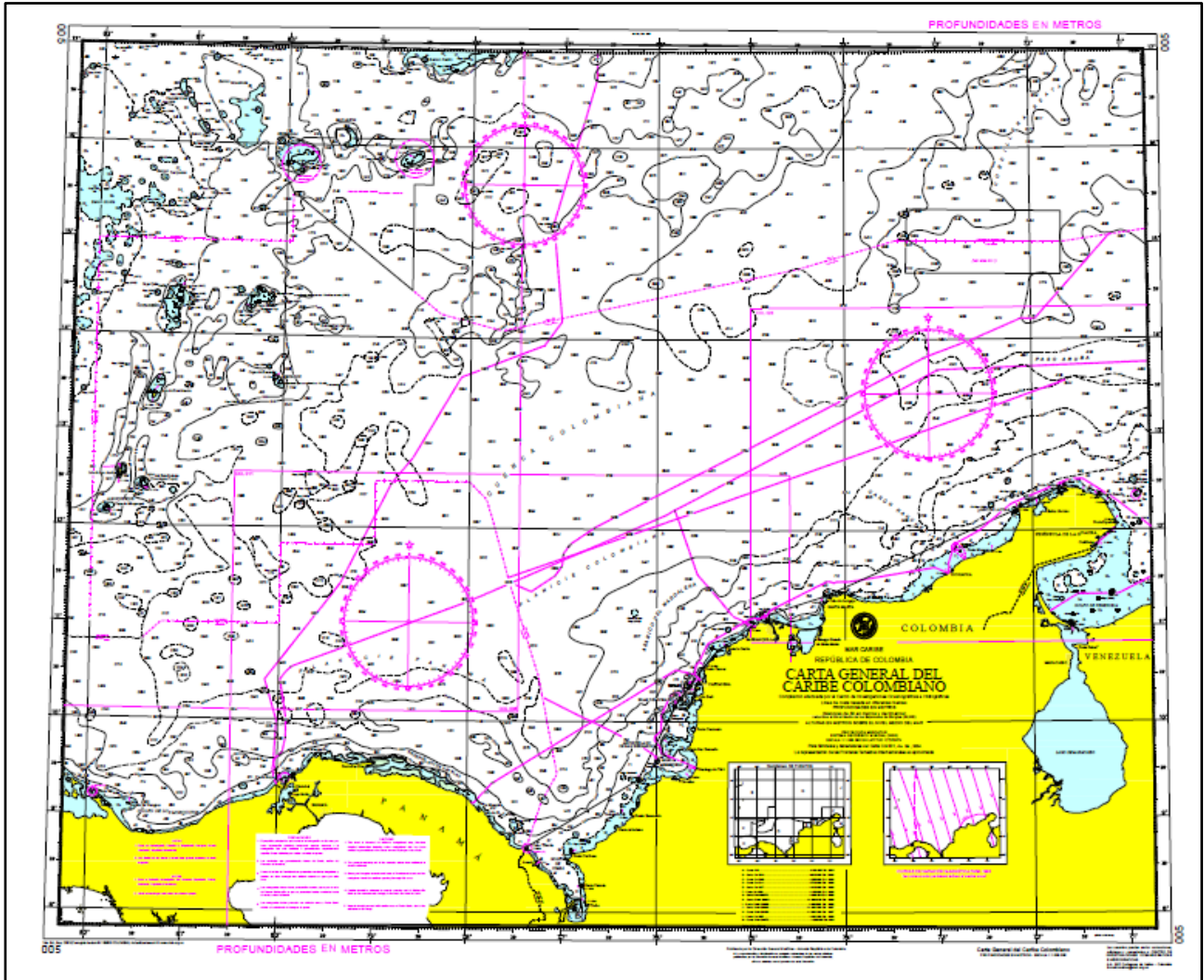


Figura 3.3. Proyección UTM. Carta del Caribe Colombiano

3.3.1. Problema directo

En la proyección UTM, también se requiere una función de proyección F , que resuelva la ecuación 3.3 conocidas las características definidas anteriormente y que la diferencian de la proyección Gauss-Krüger. Lo que permite definir el problema directo de la proyección cartográfica UTM a través de la relación $(Nortes, Estes, \Psi, m) = F(a, b, f, e^2, \varphi, \lambda, m_o, l)$. Como se mencionó la amplitud de la zona es de 6° y el factor de escala $m_o = 0.996$ para el meridiano origen.

Coordenada Norte

$$Nortes = x = m_o NA \quad [3.15]$$

Con:

$$A = \frac{G}{N} + \left(\frac{l^2 sc}{2} \right) + \left(\frac{l^4 sc^3}{24} \right) (5 - t^2 + 9\eta^2 + 4\eta^4) + \left(\frac{l^6 sc^5}{720} \right) (61 - 58t^2 + t^4 + 270\eta^2 - 330t^2\eta^2 + 445\eta^4)$$

[3.16]

La longitud de arco de meridiano G , es la misma magnitud definida en la ecuación 3.7.

Coordenada Este

$$Estes = y + 0.5 * 10^6 + K * 10^6 \quad [3.17]$$

Con:

$$y = lc + \left(\frac{l^3 c^3}{6} \right) (1 - t^2 + \eta^2) + \left(\frac{l^5 c^5}{120} \right) (5 - 18t^2 + t^4 + 14\eta^2 - 58t^2\eta^2 + 13\eta^4) \quad [3.18]$$

Convergencia de Meridianos

$$\Psi = ls \left(1 + \frac{l^2 c^2}{3} (1 + 3\eta^2 + 2\eta^2) + \frac{l^4 c^4}{15} (2 - t^2) \right) \quad [3.19]$$

Factor de Escala:

$$m = m_o \left(1 + \frac{l^2 c^2}{2} (1 + \eta^2) + \frac{l^4 c^4}{24} (5 - 4t^2 + 14\eta^2 + 13\eta^4 - 28t^2\eta^2 + 4\eta^6 - 48t^2\eta^4 - 24t^2\eta^6) + \frac{l^6 c^6}{720} (61 - 148t^2 + 16t^4) \right) \quad [3.20]$$

Donde se definen:

$\varphi_p = \varphi$	$s = \text{sen } \varphi$	$c = \text{cos } \varphi$
$t = \tan \varphi$	$N = \frac{a}{\sqrt{1 - e^2 s^2}}$	$l = \lambda - \lambda_o$
$\eta^2 = \frac{e^2}{1 - e^2} c^2$	$K = \text{parte_entera} \left(\frac{\lambda_o \left(\frac{180}{\pi} \right) + 180 + 3}{6} \right)$	

Tabla 3.5. Parámetros de transformación problema directo UTM.

3.3.2. Problema Inverso

Se define por la relación $\varphi, \lambda, m, \Psi = F^{-1}(a, b, f, e^2, m_o, \text{Nortes}, \text{Estes})$ de forma similar al problema de la Proyección Gauss-Krüger.

Latitud

Como se debe resolver un problema inverso similar a la sección 1.8, también es necesario realizar una iteración para encontrar una solución que permita obtener la latitud de un punto conocida la longitud de arco de meridiano G , mencionada en la ecuación 3.7.

Latitud inicial

Es necesario definir la latitud de un punto guía φ_o^f , con la cual es posible resolver la ecuación para obtener la latitud.

$$\varphi_o^f = \left(\frac{1+n}{a} \right) \left(\frac{1}{a_o m_o} \right) \Delta N \quad [3.21]$$

$$G_i^f = \frac{a}{1+n} (\alpha \varphi_i^f - \beta \text{sen} 2\varphi_i^f + \gamma \text{sen} 4\varphi_i^f - \delta \text{sen} 6\varphi_i^f + \epsilon \text{sen} 8\varphi_i^f) \quad [3.22]$$

$$d\varphi_i^f = \frac{1}{a} \left(\frac{\Delta N}{m_o} - G_i^f \right)$$

[3.23]

$$\varphi_{i+1}^f = \varphi_i^f + d\varphi_i^f \quad [3.24]$$

El cálculo termina cuando $|d\varphi_i^f| \leq 10^{-12}$ radianes.

Donde se tiene:

$s = \text{sen}\varphi^f$	$c = \text{cos}\varphi^f$	$t = \text{tan}\varphi^f$
$\eta^2 = \frac{e^2}{1-e^2}c^2$	$N = \frac{a}{\sqrt{1-e^2s^2}}$	$x = \text{nortes}$
$Y = \frac{\Delta E}{m_o N}$	$K = \text{parte_entera}\left(\frac{\Delta E}{10^6}\right)$	$y = \Delta E - K*10^6 - 0.5*10^6$
$\alpha = \left(\frac{a+b}{2}\right)\left(1 + \frac{1}{4}n^2 + \frac{1}{64}n^4\right)$	$\beta = \frac{3}{2}n - \frac{27}{32}n^3 + \frac{269}{512}n^5$	$\gamma = \frac{21}{16}n^2 - \frac{55}{32}n^4$
$\delta = \frac{151}{96}n^3 - \frac{417}{128}n^5$	$\varepsilon = \frac{1097}{512}n^4$	

Tabla 3.6. Parámetros de transformación problema inverso UTM.

Latitud

$$\begin{aligned} \varphi = \varphi^f - \frac{t}{2}(1 + \eta^2)Y^2 + \frac{t}{24}(5 + 3t^2 + 6\eta^2 - 6t^2\eta^2 - 3\eta^4 - 9t^2\eta^4)Y^4 \\ - \frac{t}{720}(61 + 90t^2 + 45t^4 + 107\eta^2 - 162t^2\eta^2 - 45t^4\eta^2)Y^6 \end{aligned} \quad [3.25]$$

Longitud

$$\lambda = \lambda_o + \frac{1}{c}\left(Y - \frac{1}{6}(1 + 2t^2 + \eta^2)Y^3 + \frac{1}{120}(5 + 28t^2 + 24t^4 + 6\eta^2 + 8t^2\eta^2)Y^5\right) \quad [3.26]$$

Convergencia de Meridianos Ψ , cuya ecuación es:

$$\Psi = t\left(Y - \frac{1}{3}(1 + t^2 - \eta^2)Y^3 + \frac{1}{15}(2 + 5t^2 + 5t^4)Y^5\right) \quad [3.27]$$

El factor de escala, para cualquier punto de la proyección que no se encuentre en el meridiano central, es:

$$m = m_o\left(1 + \frac{1}{2}(1 + \eta^2)Y^2 + \frac{1}{24}(1 + 6\eta^2)Y^4\right) \quad [3.28]$$

3.4. Proyección Mercator

Es la proyección cartográfica más antigua inventada por Gerardus Mercator en 1569. Es famosa en todo el mundo y es muy utilizada en la navegación, en el CIOH se utiliza porque corresponde a la normatividad de la IHO (International Hydrographic Organization), también se utiliza en navegación aérea y en mapas temáticos de corrientes oceánicas. Su éxito corresponde con que cualquier línea recta que se trace marca el rumbo real, con lo cual se puede navegar siguiendo con la brújula el ángulo que se marca en el mapa. A esta línea de rumbo se llama loxodrómica. La proyección se basa en el modelo matemático de un elipsoide de revolución (ver figura 3.4), que se representa en un cilindro vertical, tal como se muestra en las figuras 3.5 y 3.6.

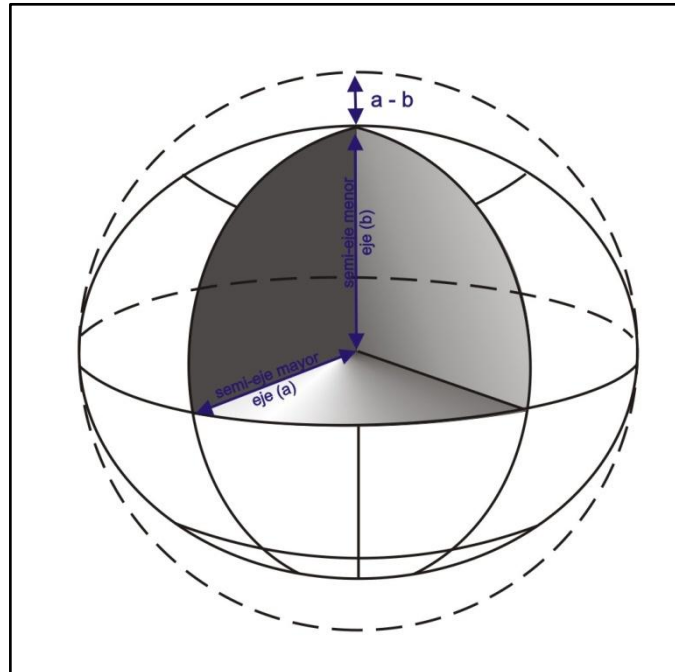


Figura 3.4. Elipsoide y Esfera de Revolución

Esta proyección es cilíndrica y conforme se caracteriza porque tanto los meridianos como los paralelos son líneas rectas y se cortan perpendicularmente. Los meridianos son líneas rectas paralelas entre sí dispuestas verticalmente a la misma distancia unos de otros. Los paralelos son líneas rectas paralelas entre sí dispuestas horizontalmente pero aumentando la escala a medida que se aleja del Ecuador. Este aumento de escala hace que no sea posible representar en el mapa las latitudes por encima de los 80° , lo que significa que esta proyección presenta una buena exactitud en su zona central, pero las zonas superior e inferior correspondientes a norte y sur presentan grandes deformaciones. Los mapas con esta proyección se utilizaron en la época colonial con gran éxito.

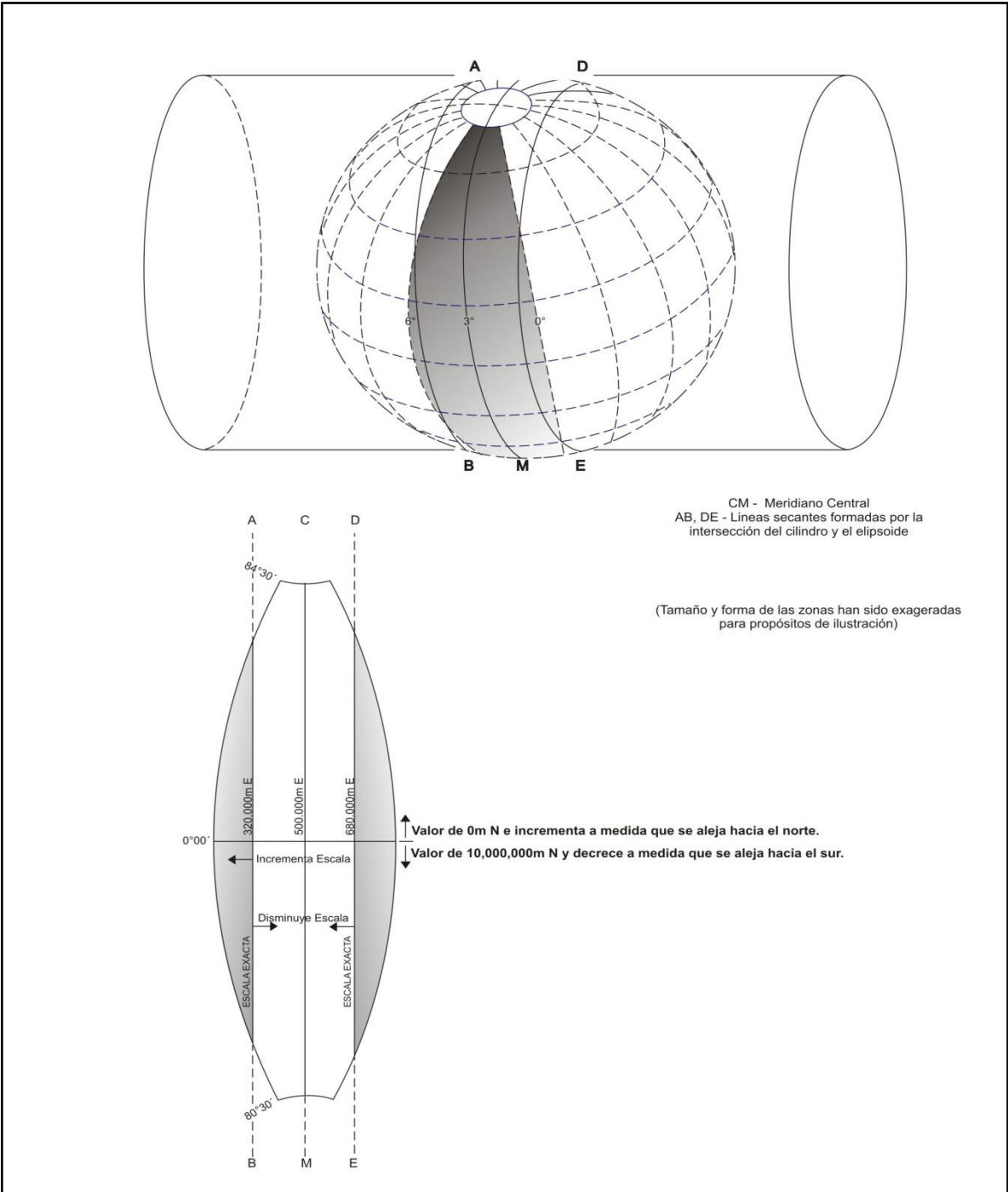


Figura 3.5. Proyección Mercator, representación del meridiano central y la zona

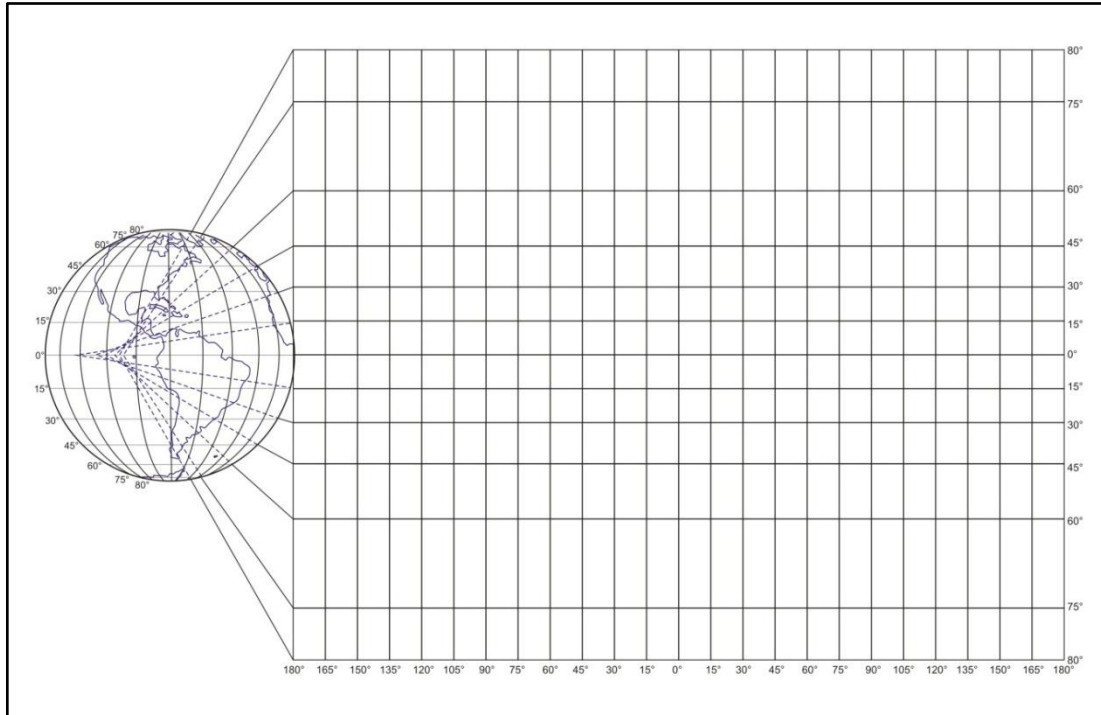


Figura 3.6. Proyección Mercator, Paralelos y Meridianos

Considerando que también se requiere resolver una función de proyección F como en el caso de las proyecciones anteriores, es decir obtener la solución de ecuación 3.3, que permita proyectar una zona de interés, tal como se muestra en el mapa 3.7 correspondiente a la carta del Caribe Colombiano del CIOH.

Las ecuaciones de la proyección. Para una latitud $\varphi_o \neq 0$ se define el factor de escala de la siguiente manera:

$$m = \frac{m_o a}{N \cos \varphi} \quad [3.29]$$

$$m_o = \frac{N_o \cos \varphi_o}{a} = \frac{\cos \varphi_o}{(1 - e^2 \sin^2 \varphi_o)} \quad [3.30]$$

Con

$$N = \frac{a}{\sqrt{1 - e^2 \sin^2 \varphi_o}} \quad [3.31]$$

La convergencia de meridianos es: $\tan \alpha = \tan t$ es decir, que la grilla de azimuth de la proyección Mercator es igual al rumbo sobre el elipsoide, de esta manera se muestra a través de esta ecuación la condición Loxodrómica de la proyección.

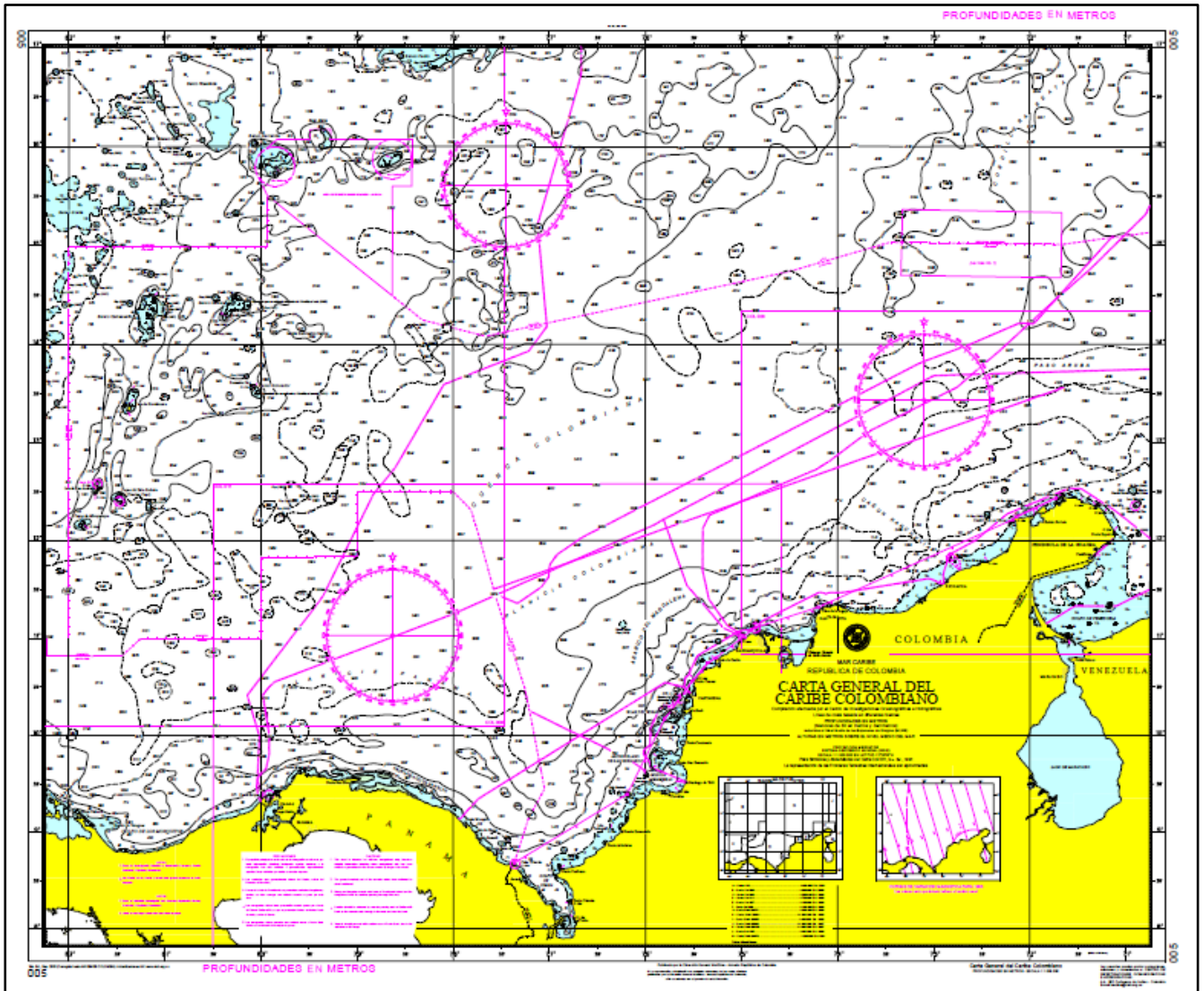


Figura 3.7. Proyección Mercator. Carta del Caribe Colombiano

3.5. Clasificación de la cartografía colombiana

La cartografía básica es el conjunto técnico de operaciones necesarias para presentar a escala la forma y localización de la superficie terrestre a través de observaciones, cálculos geodésicos, mediciones topográficas del terreno y su representación por lo general sobre el papel.

Las cartas cubiertas por el Plan de Cartografía Náutica Nacional se clasifican así:

Carta de símbolos, abreviaturas y términos (COL 001)

Es un libro que contiene los estándares en simbología utilizados en las cartas náuticas colombianas. Está realizado siguiendo las normas de la OHI por lo que también puede ser empleado para interpretar cartografía de otro país que siga la normatividad del organismo internacional (OHI).

3.5.1. Carta náutica

Se llama carta de navegación o carta náutica a la representación gráfica de una porción de la superficie del mar y costa adyacente dibujada sobre un plano a escala, de forma semejante, orientada y exacta para permitir una navegación marítima, fluvial y lacustre segura. Su trazado

se logra mediante un sistema de proyección adecuado que permita obtener con facilidad y exactitud la latitud y longitud de cualquier punto del plano.

En ella se indica las profundidades (sondeos), la configuración de las costas, islas, bajos, así como un prolijo detalle de la configuración marítima, de modo que permita navegar por ella a los buques o embarcaciones, sorteando los peligros. Debe señalar, además, los objetos naturales y artificiales que existen fijos en tierra, que sean visibles desde el mar y puedan servir de referencia al navegante para obtener su situación y trazar rumbos. Es así que debe idearse y diseñarse de modo que indique los detalles útiles al marino con toda la precisión posible y en todas las circunstancias previsibles.

Las cartas náuticas están destinadas a satisfacer principalmente las siguientes necesidades:

- Ayuda, información y seguridad a la navegación.
- Navegación por rutas comerciales.
- Navegación e información de áreas de pesca.
- Navegación e información de rutas turísticas.
- Divulgación de información náutica que contribuya a la difusión de los intereses marítimos de la nación.
- Utilización como información base de estudios científicos y técnicos de desarrollo nacional.
- Base de difusión de materias de índole educativa.

3.5.2. Clasificación Internacional de las Cartas Náuticas

Conforme con las especificaciones internacionales, las Cartas Náuticas se clasifican como a continuación se indica:

Según su escala:

Escala pequeña (Overview): Cartas náuticas de escalas inferiores o iguales a 1:2.000.001 (Cartas Oceánicas o de Travesía).

Escala media: Cartas náuticas entre escalas 1:2.000.000 y 1:75.001 (Cartas Generales y Costeras).

Escala grande: Cartas náuticas de escalas mayores de 1:75.000 (Cartas de Aproximación, Puertos, Fondeaderos, Canales, Estrechos, muelles).

Según su Objetivo:

Oceánicas o de Travesía: Satisfacen la navegación oceánica, para viajes prolongados en altamar entre puertos distantes; se usan generalmente en lugares donde no se alcanza a ver la costa. Sus escalas son de 1:2.000.001 y menores.

Generales: Utilizadas para la navegación a lo largo de la costa entre puertos costeros distantes, con frecuencia la costa no está a la vista. Sus escalas fluctúan entre 1:2.000.000 y 1:350.001.

Costeras: Permiten desarrollar la navegación costera en donde la posición de los buques puede determinarse utilizando ayudas a la navegación y puntos conspicuos en la costa como referencia. Sus escalas fluctúan entre 1:350.000 y 1:75.001.

De Aproximación o Acceso a Puerto: Permiten desarrollar la navegación costera y aproximarse a los puertos, ríos y canales del litoral (Acceso a Puerto, Aguas Costeras Congestionadas o Tortuosas). Sus escalas fluctúan entre 1:75.000 y 1:30.001.

De Puertos o Fondaderos: Diseñadas para recalar a puerto y zonas de fondeo dentro de un área relativamente pequeña (Puertos, Bahías, Fondaderos, Estrechos). En estas cartas se pueden utilizar las instalaciones portuarias y zarpar de allí con seguridad. Sus escalas fluctúan entre 1:30.000 y 1:12.501.

De Canales, Muelles y Atraque: Permiten surcar las aguas interiores, especialmente el track normal de navegación. Sus escalas son 1:12.500 y mayores.

Según su Edición:

Nueva: Primera publicación de una carta que cubre un área no cartografiada anteriormente a la escala indicada, o cubre un área diferente de cualquier carta existente.

Nueva edición: Nueva impresión de una carta ya editada con anterioridad, pero que ha sufrido alteraciones mayores de forma y de contenido, las cuales obligan a publicarla como una nueva edición, anulando la edición anterior.

Reimpresión: Nueva impresión de la edición vigente de una carta, a la cual se le han incluido todos los avisos a los navegantes que la afectan. Eventualmente, pueden ser incorporadas también modificaciones de formato. La reimpresión no anula la edición vigente.

Aumento de stock: Se denomina de este modo a la impresión de una carta, sin alterar sus originales de reproducción, con el propósito de reponer stock de venta.

3.5.3. Clasificación Nacional de las Cartas Náuticas

La clasificación de la cartografía efectuada por la Dirección General Marítima DIMAR, por intermedio del Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas CIOH, fue realizada de acuerdo a los Reglamentos de la Organización Hidrográfica Internacional, OHI para cartas internacionales (INT) y Especificaciones Cartográficas de la OHI (Publicación M4, Parte B, Sección 100 – General. edición 3.003 Agosto de 2006).

La numeración de las cartas náuticas está distribuida de Este (E) a Oeste (W) en el Mar Caribe y de Norte (N) a Sur (S) en el Océano Pacífico. Para efectos de su enumeración según su objetivo se subdividieron en tres grupos así:

Primer dígito cero: Oceánicas y Generales del Caribe y el Pacífico

Primer dígito par: Mar Caribe Colombiano

Primer dígito impar: Océano Pacífico Colombiano

Del mismo modo estos primeros dígitos sean pares o impares, (lo que da una ubicación inicial si son del Pacífico o del Caribe) también tienen una distribución por escalas como a continuación se indica en las figuras 3.8 y 3.9 y tablas 3.3 y 3.4.

Mar Caribe

PRIMER DÍGITO	USO	ESCALA
Cero (0)	CARTAS OCEÁNICAS O DE TRAVESÍA	1:2.000.001 y Menores
	CARTAS GENERALES	1:2.000.000 - 1:350.001
Cuatro (4)	CARTAS COSTERAS	1:350.000 - 1:75.001
Dos (2)	CARTAS DE APROXIMACIÓN (Acceso a Puerto, Aguas Costeras Congestionadas o Tortuosas)	1:75.000 - 1:30.001
	CARTAS DE PUERTO (Puertos, Bahías, Fondeaderos, Estrechos)	1:30.000 - 1:12.501
Ocho (8)	CARTAS DE CANALES, MUELLES (Canales, Muelles, Atraque)	1:12.500 y Mayores

Tabla 3.3. Clasificación Cartas Costeras del Caribe.

CARTAS COSTERAS MAR CARIBE
(Escala 1:350.000 - 1:75.001)

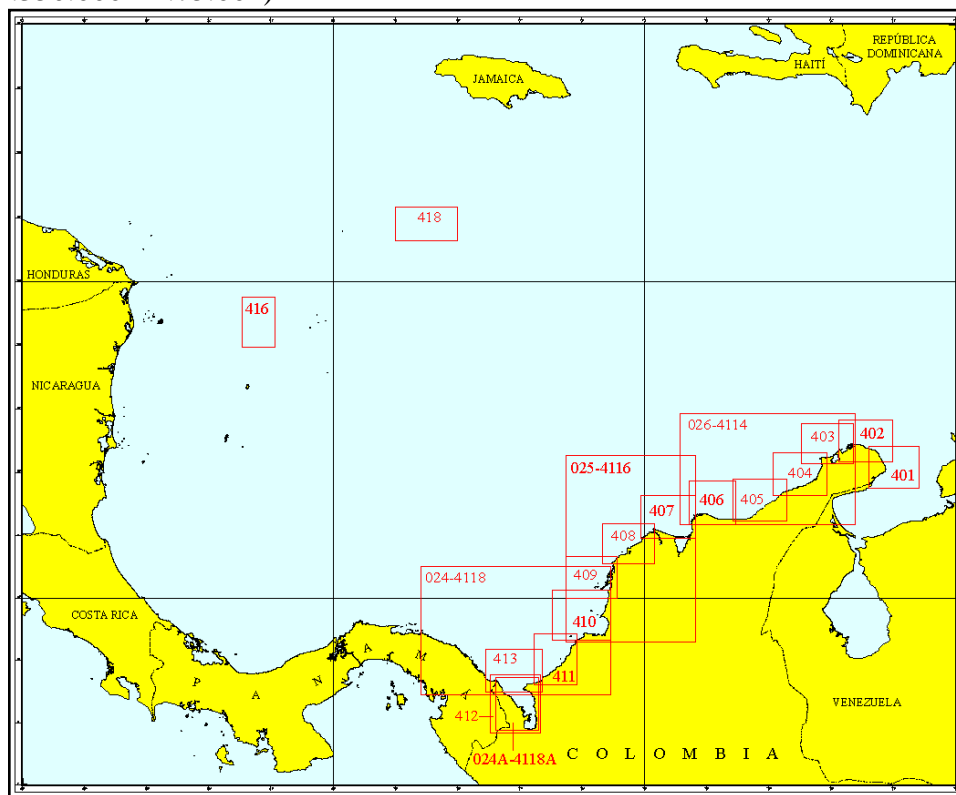


Figura 3.8. Cartas Costeras del Caribe

Océano Pacífico

PRIMER DÍGITO	USO	ESCALA
Cero (0)	CARTAS GENERALES	1:2.000.000 - 1:350.001
Tres (3)	CARTAS COSTERAS	1:350.000 - 1:75.001
	CARTAS DE APROXIMACIÓN (Acceso a Puerto, Aguas Costeras Congestionadas o Tortuosas)	1:75.000 - 1:30.001
Uno (1)	CARTAS DE PUERTO (Puertos, Bahías, Fondeaderos, Estrechos)	1:30.000 - 1:12.501
Siete (7)	CARTAS DE CANALES, MUELLES (Canales, Muelles, Atraque)	1:12.500 y Mayores

Tabla 3.4. Clasificación Cartas Costeras del Pacífico

CARTAS COSTERAS ÓCEANO PACÍFICO
(Escala 1:350.000 - 1:75.001)

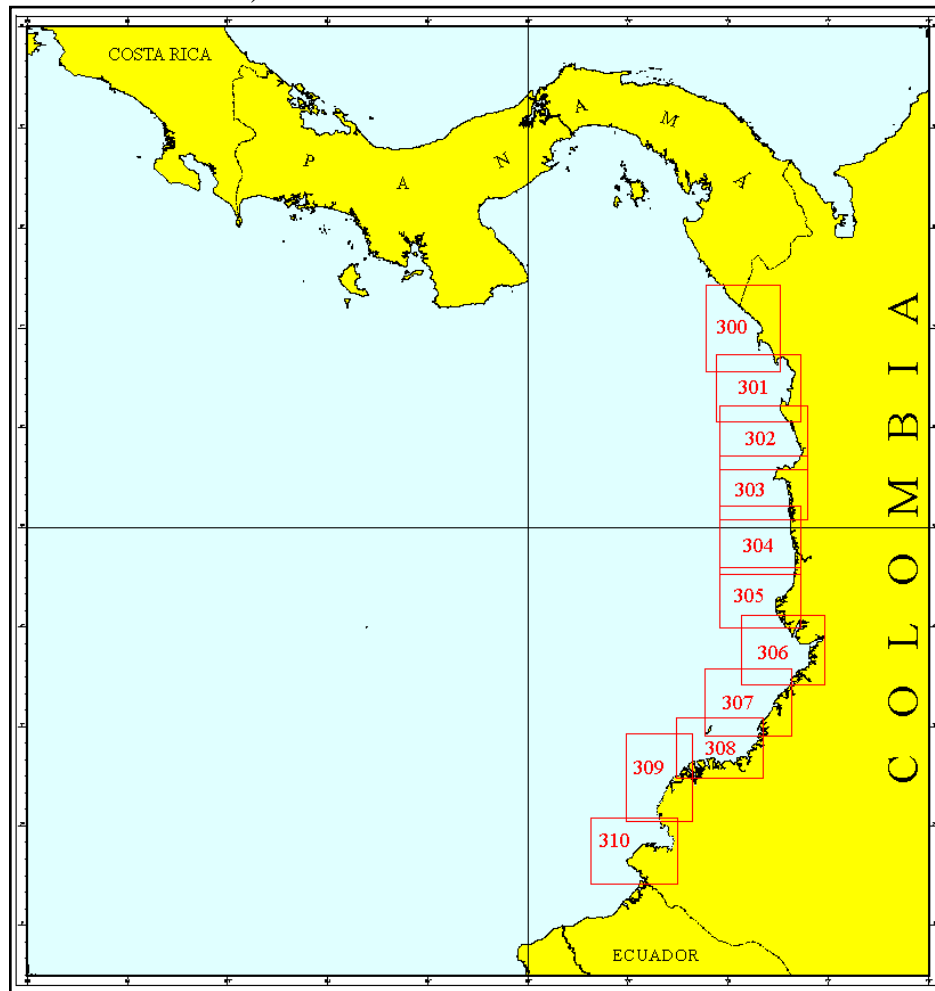


Figura 3.9. Cartas Costeras del Pacífico

3.5.4. Carta Náutica Electrónica (ENC - Electronic Nautical Chart)

La Organización Marítima Internacional (OMI) y la Organización Hidrográfica Internacional (OHI) han venido promoviendo el desarrollo del sistema de navegación con carta electrónica con el fin de aumentar la seguridad en la navegación y para esto ha desarrollado especificaciones técnicas y reglas las cuales deben ser cumplidas por los diferentes Servicios Hidrográficos del mundo permitiendo así una estandarización para la conversión de las cartas de papel a formato s-57.

Definición: (ENC) Base de datos normalizada en cuanto al contenido, estructura y formato, producida para ser usada con ECDIS bajo la autoridad de los Servicios Hidrográficos autorizados por el Gobierno. La ENC, contiene toda la información cartográfica necesaria para una navegación segura y puede contener información náutica suplementaria.

La numeración de las cartas náuticas electrónicas, obedece a estándares internacionales y corresponde a un identificador de 8 caracteres. Los dos primeros caracteres son letras que identifican al país productor a nivel internacional, para el caso de Colombia, las dos primeras letras son "CO". El tercer carácter es ocupado por un número que corresponde al objetivo o propósito de la carta y los cinco caracteres restantes son utilizados por el servicio hidrográfico para la identificación individual de las celdas, el cual será el mismo número asignado a su equivalente en carta de papel; el archivo original tendrá la extensión (.000) y se incrementará de acuerdo a las actualizaciones que se hagan a la celda, es decir para la carta náutica 253 la

celda sería identificada: **CO500253.000**. El objetivo, por su parte, tiene relación directa con la escala, lo que se refleja en la siguiente tabla:

<i>Número</i>	<i>Objetivo</i>	<i>Intervalo de escalas</i>
1	<i>Vista general (Overview)</i>	<i>1:2.000.001 y menores</i>
2	<i>General</i>	<i>1:350.001 a 2.000.000</i>
3	<i>Costera (coastal)</i>	<i>1:75.001 a 350.000</i>
4	<i>Aproximación (approach)</i>	<i>1:30.001 a 75.000</i>
5	<i>Bahía, Puertos (harbour)</i>	<i>1:12.501 a 30.000</i>
6	<i>Canales, muelles (berthing)</i>	<i>1:12.500 y mayores</i>

Tabla 3.5. Clasificación de Cartas Electrónicas según su propósito y escala

Tomando el mismo ejemplo de la carta 253: **CO500253.000** lo detallamos así:

CO = Identificación internacional del país productor (COLOMBIA).

5 = Objetivo o propósito de navegación (Bahía, Puertos)

00253 = Identificación individual de la celda se coloca el numero de la carta y delante se llenan con ceros)

000 = Número de actualización

Nota: Cada vez que se genere un archivo de actualización la extensión cambiará de la siguiente manera:

000 = Primera edición

001 = Primera actualización

002 = Segunda actualización (el número se incrementa secuencialmente)

3.5.5. Corrección y Actualización de las Cartas Náuticas

Las correcciones y actualizaciones que deban efectuarse a la carta náutica, se empleará solamente la carta de símbolos, abreviaturas y términos (COL 001) y se tendrá especial cuidado de no obstruir otras informaciones que figuren en la carta. No se debe olvidar que la carta náutica constituye uno de los elementos más importantes que emplea el navegante en la determinación de rumbos, distancias, situaciones, etc., siendo su preocupación primordial, el mantener la cartografía siempre al día y en condiciones de uso inmediato.

Nota: Las cartas náuticas que se venden a los usuarios deben estar corregidas y actualizadas hasta el último Aviso a los Navegantes a la fecha de su entrega. Se recomienda a los usuarios mantener debidamente actualizadas sus cartas con base a las divulgaciones de los Avisos a los Navegantes, los cuales son publicados en la página web del CIOH www.cioh.org.co, con el fin de no incurrir en errores al momento de utilizar las cartas.

Los usuarios pueden enviar correcciones, adiciones y comentarios al Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas, A.A. 982 Cartagena de Indias - Colombia, e-mail: nautica@cioh.org.co.

Aviso a los Navegantes:

El Aviso a los Navegantes es un reporte oficial de datos para suministrar información de utilidad relacionada con las modificaciones en las ayudas a la navegación, los peligros para la misma, nuevos sondajes de importancia y todo lo que permita brindar seguridad en la navegación y actualización de las publicaciones náuticas y cartográficas. Los avisos a los navegantes pueden ser de carácter general (G), temporal (T) o permanente (P). Únicamente puede ser expedido por el Área de hidrografía “Servicio Hidrográfico” del CIOH.

Avisos permanentes (P): Informa un cambio permanente en las cartas o publicaciones afectadas causadas por modificaciones en las estructuras y características, remoción definitiva, reubicación, adición de nuevas ayudas y cambio en el fondo marino o la línea de costa.

Avisos temporales (T): Informa novedades o alteraciones de naturaleza transitoria que se presentan físicamente en las ayudas en la navegación.

Avisos generales (G): Comunican a los navegantes toda información o instrucción que por su naturaleza no altera un documento y advierten anticipadamente acontecimientos de cualquier tipo que van a producirse en la comunidad marítima específicamente y que generalmente no implican correcciones a las cartas y publicaciones náuticas. También se utilizan para suministrar información de manera local o jurisdiccional de un puerto o área específica.

Derechos de Autor (copyright)

Los Derechos de Autor son un conjunto de normas, jurisprudencias, doctrinas y comentarios encaminados a la protección de los creadores. El Derecho de Autor es el derecho de cualquier creador a que se le reconozca la autoría de las obras artísticas o literarias resultado de su ingenio e imaginación.

Es la protección que le otorga el Estado al creador de las obras literarias o artísticas desde el momento de su creación y por un tiempo determinado.

¿Qué normas regulan el derecho de autor en Colombia?

- Artículo 61 de la Constitución Política de Colombia;
- Decisión Andina 351 de 1993;
- Código Civil, Artículo 671;
- Ley 23 de 1982;
- Ley 44 de 1993;
- Ley 599 de 2000 (Código Penal Colombiano), Título VIII;
- Ley 603 de 2000;
- Decreto 1360 de 1989;
- Decreto 460 de 1995;
- Decreto 162 de 1996.

3.6. Ejercicios

- a. Considere los puntos de la tabla, determine las coordenadas planas (Nortes, Estes) en Dátum WGS84, para la proyección Gauss Krüger.

<i>Punto</i>	<i>Latitud (φ) Norte</i>	<i>Longitud (λ) Oeste</i>	<i>Altura Elipsoidal (h) metros</i>
<i>CIOHI</i>	<i>10° 23' 27.999668"</i>	<i>75° 32' 2.65888"</i>	<i>-4.6355</i>
<i>LEVT</i>	<i>10° 23' 29.05171"</i>	<i>75° 32' 0.84387"</i>	<i>-4.6854</i>
<i>LAMP</i>	<i>10° 23' 25.7719"</i>	<i>75° 32' 1.190022"</i>	<i>-4.6631</i>

- b. Determine las coordenadas planas, de los mismos puntos pero ahora en Dátum Bogotá.
- c. Calcule las coordenadas geodésicas en Dátum Bogotá y Dátum WGS84, resolviendo el problema inverso de la Proyección Gauss-Krüger, es decir obtener la latitud y longitud de los puntos conocidas su coordenadas cartesianas $\varphi, \lambda, m, q, l = F^{-1}(a, b, f, e^2, \text{Nortes}, \text{Estes})$. No olvide calcular el factor de escala y la convergencia de meridianos.
- d. Con las coordenadas geodésicas de la siguiente tabla, determinar las coordenadas cartesianas Nortes y Estes para la proyección UTM, con los parámetros del Dátum WGS84.

<i>Punto</i>	<i>Latitud (φ) Norte</i>	<i>Longitud (λ) Oeste</i>	<i>Altura Elipsoidal (h) metros</i>
<i>22</i>	<i>10° 23' 25,771901"</i>	<i>75° 32' 01,190224"</i>	<i>-4,6631</i>
<i>24</i>	<i>10° 23' 26,921367"</i>	<i>75° 32' 01,074215"</i>	<i>-4,4388</i>
<i>26</i>	<i>10° 23' 27,239832"</i>	<i>75° 32' 01,036638"</i>	<i>-4,6832</i>
<i>27</i>	<i>10° 23' 27,142346"</i>	<i>75° 32' 00,451168"</i>	<i>-4,6726</i>
<i>29</i>	<i>10° 23' 27,587493"</i>	<i>75° 31' 59,969405"</i>	<i>-3,9659</i>

- e. Calcule las coordenadas geodésicas en Dátum WGS84, resolviendo el problema inverso de la Proyección UTM, es decir obtener la latitud y longitud de los puntos conocidas su coordenadas cartesianas $\varphi, \lambda, m, \Psi = F^{-1}(a, b, f, e^2, m_o, \text{Nortes}, \text{Estes})$. No olvide calcular el factor de escala y la convergencia de meridianos.

Capítulo 4. Nivelación

4.1. Campo Gravitatorio terrestre

En la naturaleza existen cuatro fuerzas fundamentales: fuerza gravitatoria, fuerza electromagnética, interacción nuclear fuerte e interacción nuclear débil. Cada una interviene en procesos distintos e implica diferentes tipos de partículas. La gravitatoria es la más débil de las interacciones y no desempeña ningún papel en la estructura de las moléculas, átomos o núcleos atómicos. Sin embargo, la gravedad es la fuerza predominante entre cuerpos muy grandes, tales como los astros, estrellas, planetas y satélites planetarios. El interés de su estudio para geofísica es obtener información sobre la densidad y sus variaciones al interior de la tierra, mientras en Geodesia la gravedad ayuda a definir el Geoide.

4.1.1. Ley de gravitación Universal de Newton

La ley de gravitación universal propuesta por Newton es la atracción mutua que experimentan los cuerpos por tener determinadas masas y postula que: “La fuerza entre dos partículas de masas m_1 y m_2 es directamente proporcional al producto de las masas e inversamente proporcional al cuadrado de la distancia entre el centro de las masas” Véase figura 4.1.

$$\vec{F} = G \frac{(m_1 m_2) \vec{r}}{r^2} \quad [4.1]$$

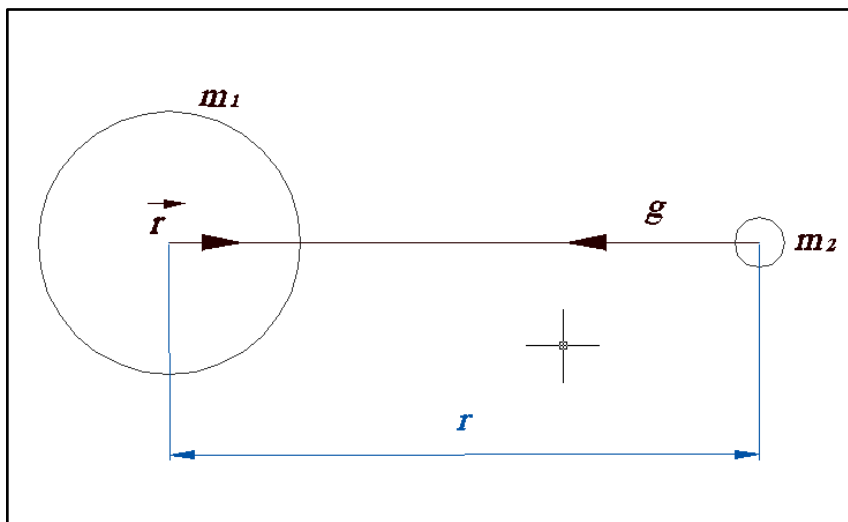


Figura 4.1. Distancia entre dos masas. Ley de Gravitación Universal

Donde \vec{F} es la fuerza de atracción en la dirección de m_2 , \vec{r} es el vector unitario en la dirección de m_2 , r es la distancia entre m_1 y m_2 y G es la *constante de gravitación universal*. En el sistema internacional SI, $G=6.672*10^{-11} Nm^2/kg^2$ o en el sistema CGS, $G=6.672*10^{-8} dinas cm^2/g^2$

4.1.2. Campo de Gravedad

La aceleración de m_2 debido a la presencia de m_1 puede ser encontrada dividiendo \vec{F} en m_2 en la ecuación 4.1, obteniéndose

$$\vec{g} = G \frac{m_1 \vec{r}}{r^2} \quad [4.2]$$

La aceleración \vec{g} es igual a la fuerza por unidad de masa debido a m_1 . Si m_1 se considera la masa de la tierra M_T , \vec{g} será la aceleración de la gravedad y está dada por

$$\vec{g} = G \frac{M_T}{R_T^2} \vec{r} \quad [4.3]$$

R_T es el radio de la tierra y \vec{r} representa la dirección de la aceleración. Cualquier cuerpo experimenta exactamente la misma aceleración en un determinado campo gravitatorio, por esta razón se acostumbra a utilizar el mismo símbolo \vec{g} debido a la tierra o a una masa m_1 .

La medida de la aceleración de la gravedad se conoce como la intensidad del campo gravitatorio y su valor numérico para la superficie de la tierra es aproximadamente de 980 cm/s^2 . Sin embargo, este dato no tiene la precisión necesaria para entender el comportamiento del campo de gravedad en la tierra, por lo tanto es indispensable utilizar una medida de sensibilidad mayor para los propósitos de investigación teóricos y aplicados en Geodesia y Geofísica; ya sea con fines de prospección geofísica o para estudio del campo de gravedad, en Geodesia.

El instrumento de medición del campo gravitatorio es un Gravímetro y utiliza magnitudes más sensibles como el *miligal*. Cuyas equivalencias son $1 \text{ miligal} = 10^{-5} \text{ Gal}$, $1 \text{ Gal} = 1 \text{ cm/s}^2$, microgal $1 \mu\text{Gal} = 1 \cdot 10^{-3} \text{ miligales}$ y nanogal $1 \text{ nGal} = 1 \cdot 10^{-6} \text{ miligales}$.

4.2. Figura de la tierra

El problema de la determinación de la forma de la tierra es uno de los más antiguos de Geodesia, desde la Grecia antigua hasta nuestros días se han perfeccionado las concepciones para definirla, se encontró que se puede resolver desde dos puntos de vista: uno geométrico y otro dinámico o físico. En el primer caso se puede determinar midiendo longitudes de arco de meridianos y paralelos y en el segundo caso por la observación del campo gravitatorio a través de la medición de su magnitud.

4.2.1. Geoide

En la figura 4.2 se observa un elipsoide de rotación con velocidad angular ω , en donde además se representa la superficie topográfica, sobre la cual se encuentra el punto T , cuyo vector gravedad \vec{g} o campo gravitatorio, se define como

$$\vec{g} = \vec{F} + \vec{f} \quad [4.4]$$

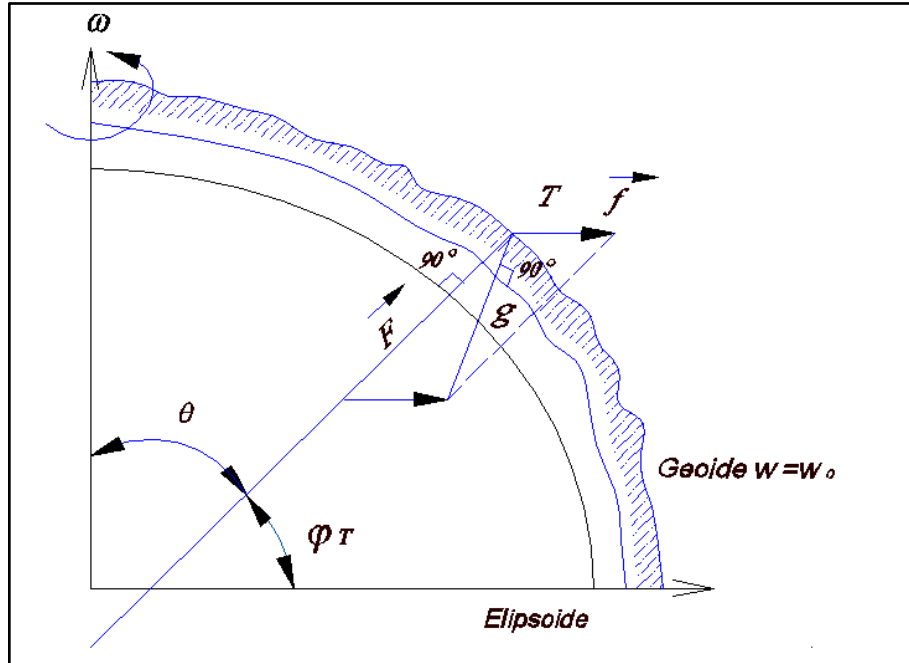


Figura 4.2. Geoide

Donde \vec{F} es la fuerza de aceleración gravitacional y \vec{f} es la aceleración centrífuga, la fuerza \vec{F} es causada por la fuerza de atracción de la tierra asociada al punto de interés, mientras que \vec{f} es causada por la rotación de la tierra alrededor del eje menor, cuya ecuación se define como:

$$\vec{f} = \omega^2 \vec{p} = \omega^2 r \text{sen} \theta \quad [4.5]$$

Donde \vec{p} es el vector posición del eje de rotación y θ es la colatitud del punto de interés T , nótese que esta fuerza es función de la latitud de un punto, cuyo valor es máximo en el ecuador y nulo en los polos. Siempre e independiente de la latitud la magnitud de \vec{f} es inferior que \vec{F} .

Los campos vectoriales \vec{g} , \vec{F} y \vec{f} tienen asociados sus respectivos potenciales, que son campos escalares: W es el potencial gravitatorio, V el potencial gravitacional y Φ el potencial centrífugo, la relación de los campos vectoriales y escalares se define en los siguientes términos.

$$\vec{g} = \text{grad}(W) \quad [4.6]$$

$$\vec{F} = \text{grad}(V)$$

$$\vec{f} = \text{grad}(\Phi)$$

Para entender el concepto del gradiente, este se define para cada uno de los campos vectoriales \vec{g} , \vec{F} y \vec{f} de forma análoga a la siguiente expresión:

$$\vec{g} = \text{grad}(W) = \left(\frac{\partial W}{\partial x} \quad \frac{\partial W}{\partial y} \quad \frac{\partial W}{\partial z} \right) \quad [4.7]$$

De manera similar a la ecuación [4.4], el potencial gravitatorio es la suma del potencial gravitacional y el potencial centrífugo:

$$W = V + \Phi \quad [4.8]$$

Calcular el potencial gravitacional V no es sencillo¹¹, requiere resolver en puntos exteriores a la tierra, la ecuación de Laplace:

$$\nabla^2 V = 0 \quad [4.9]$$

La solución de esta ecuación implica también la determinación de un número de constantes de integración, que deben calcularse experimentalmente, mediante medidas de la superficie de la Tierra y se realiza por el método de separación de variables a través de funciones armónicas esféricas y cuya solución para el potencial V se expresa en términos generales por la siguiente ecuación (Delf, 2004):

$$V = \frac{GM}{r} \left(1 + \sum_{n=2}^{n_{max}} \sum_{m=0}^n \left(\frac{a}{r} \right)^n \left(\bar{C}_{n,m} \cos m\lambda \right) + \left(\bar{S}_{n,m} \sin m\lambda \right) \bar{P}_{n,m} \sin w \right) \quad [4.10]$$

Con

GM = constante de gravitación universal y masa de la tierra
 r = longitud del vector posición del centro de masas de la tierra
 a = semieje mayor
 n = grado de la expansión de los armónicos esféricos
 m = orden de la expansión de los armónicos esféricos
 w = latitud geocéntrica
 λ = longitud geocéntrica

$\bar{C}_{n,m}$ = coeficientes gravitacionales normalizados para $\cos m\lambda$

$\bar{S}_{n,m}$ = coeficientes gravitacionales normalizados para $\sin m\lambda$

$\bar{P}_{n,m}(\sin w)$ = funciones asociadas normalizadas de Legendre

Los polinomios de Legendre son un conjunto de funciones polinómicas ortogonales y desempeñan un papel similar a funciones seno y coseno en una serie de Fourier, mientras que los coeficientes $\bar{C}_{n,m}$ y $\bar{S}_{n,m}$ pueden considerarse constantes de integración. Sus valores deben determinarse por lo tanto mediante la aplicación de condiciones de frontera, es decir de medidas de la forma y dimensiones de la tierra. La ecuación 4.10, se encuentra en función del grado expansión de los armónicos esféricos n_{max} y su precisión depende su magnitud.

Para el caso del potencial centrífugo Φ , la ecuación de Laplace no es aplicable, obteniéndose $\nabla^2 \Phi = 2\omega$, cuya expresión del potencial será:

$$\Phi = \frac{1}{2} \omega^2 r^2 \sin^2 \theta = \frac{1}{2} \omega^2 (x^2 + y^2) \quad [4.11]$$

Como se muestra en la figura 4.3 las superficies equipotenciales, se definen por una función de potencial $W = constante$, en la cual todos los puntos que la conforman tiene la misma magnitud en su valor de gravedad. De este manera el *geoide* se define como una superficie de nivel equipotencial $W = W_0$ es decir, es una superficie de referencia continua del campo de gravedad de la tierra, asociada con el nivel medio del mar; sin embargo, desde un punto de vista físico riguroso esta superficie de potencial no es completamente constante debido a los procesos dinámicos en el océano, y además presenta deformación por la atracción gravitatoria presente en las plataformas oceánica y continental.

¹¹ Sólo se presenta una expresión general de la ecuación sin considerar todo el rigor físico matemático propio de la Geodesia Física.

Para aplicaciones geodésicas y oceanográficas, la determinación del geoide es de fundamental importancia, ya que sirve como una superficie de referencia vertical que permite describir las áreas continentales y la superficie de la topografía del mar (Torge, 2001). En la actualidad, en todos los países del mundo los modelos geoidales permiten corregir las alturas elipsoidales derivadas de GPS para ser transformadas en alturas ortométricas, lo cual convierte al geoide en una necesidad práctica para la gran cantidad de usuarios del GPS. En Suramérica, por ejemplo, son destacados los avances en el conocimiento de superficies de referencia, tal es el caso de los modelos geoidales regionales desarrollados por países como Argentina (Pacino et al., 2001), Brasil (Blitzkow y Lobianco, 2001) y Colombia (Sánchez, 2002), con el modelo Geocol 2004, el cual se puede consultar en los documentos de Magna-Sirgas del IGAC.

4.2.2. Modelo EGM96

EGM96 (Earth Geopotential Model 1996), en español conocido como el modelo geopotencial global de la tierra, creado desde el modelo armónico esférico con coeficientes de orden y grado de 360. Este modelo es el resultado de una colaboración entre la National Imagery and Mapping Agency (NIMA), la NASA Goddard Space Flight Center (GSFC), y Ohio State University.

Este modelo se obtiene a través de la integración de datos de gravedades de fuentes terrestres, aéreas y marinas de diferentes áreas del mundo, incluyendo África, Canadá, algunas zonas de Suramérica y África, el Sureste Asiático, El Oeste de Europa y la Unión Soviética. La grilla de cálculo es de 30'×30'. La figura 4.3 muestra un modelo de ondulación geoidal del mundo, en el rango de -107 m a 84 m relativo al datum WGS84, que fue obtenido a través del modelo EGM96.

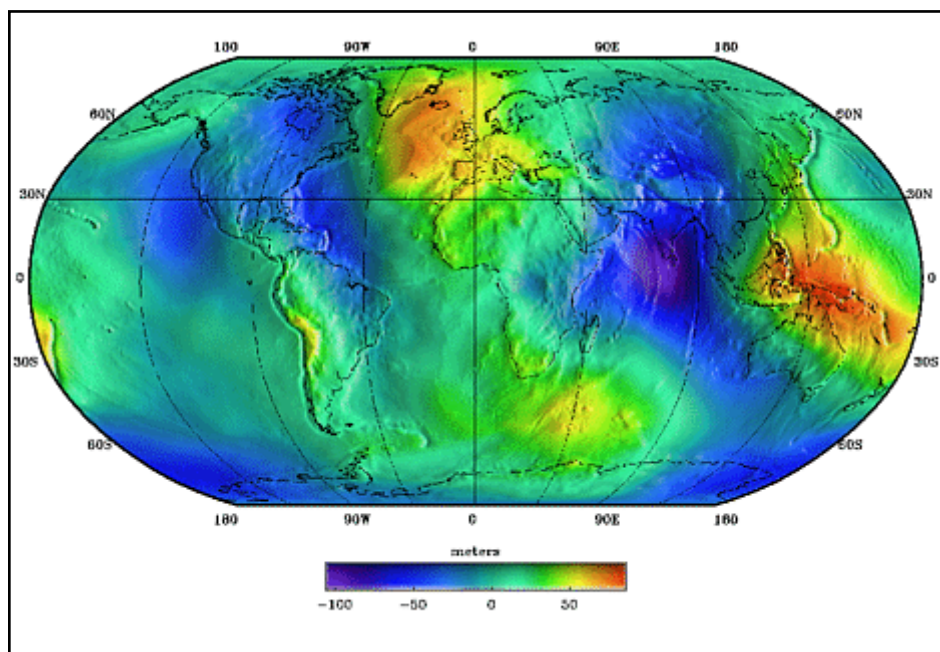


Figura 4.3. Ondulación Geoidal. Tomado de <http://cddis.nasa.gov/egm96/egm96.html>.

4.2.3. Marea y Datums del Nivel del Agua

Marea es el cambio periódico del nivel del mar, producido principalmente por las fuerzas gravitacionales que ejercen la Luna y el Sol y por otros fenómenos en los que se destaca la variación de la presión atmosférica.

En un día hay dos pleamares, la más alta es llamada "Pleamar más alta" (HHW) y la más baja, "pleamar más baja" (LHW). Análogamente, las dos bajamares son llamadas "bajamar más baja" (LLW) y "bajamar más alta" (HLW). Para medir la desigualdad se encuentran, los términos "desigualdad diurna de pleamar" (DHQ) y "desigualdad diurna de bajamar" (DLQ). La DHQ es definida como la mitad de la diferencia entre las medias de las pleamares más altas y de las pleamares más bajas y la DLQ es definida como la mitad de la diferencia entre las medias de las bajamares más bajas y las bajamares más altas. Ver figura 4.4.

Un dátum vertical es una superficie de nivel y es utilizado para reconocer alturas o profundidades, diferente al elipsoide que es un dátum de tipo horizontal. El dátum del mar es llamado "dátum de nivel de agua". El dátum al cual son referidas las profundidades en una carta es conocido como el "dátum de carta". Un dátum de nivel de agua es llamado un "dátum de marea" cuando está definido en términos de una cierta fase de marea. Según las características de los lugares se utilizan diferentes niveles de referencia de las alturas de las mareas como: la Media de la bajamar más baja (MLLW) que es usada para los dátum de sondajes de las cartas y es calculada de la tabulación de las observaciones de la marea, en este caso el promedio de la bajamar más baja de cada día lunar por un período de 19 años.

La Marea Astronómica más Baja (LAT) se ha adoptado para el uso internacional por la Organización Hidrográfica Internacional (OHI). Los Dátum de Cartas usados en algunas antiguas Cartas del Almirantazgo Británico fueron el Nivel Medio de las Bajamares de Sicigias (MLWS) y la Bajamar de Sicigias de la India (ISWL). Ambos Dátum MLWS y ISWL se derivan de sumatorias de las amplitudes de varios constituyentes armónicos principales bajo el Nivel Medio del Mar local.

En lugares donde hay muy poca o ninguna marea, se utilizan otros dátum de nivel de agua. En el Mar Negro se usa el Nivel Medio del Mar o el Nivel medio del Agua. En los Grandes Lagos de Canadá y de los Estados Unidos se utilizan Dátum de Bajamar (LWD) fijos para cada lago con base en el análisis de los promedios mensuales durante los estados de bajo nivel. En lagunas sin mareas y en bahías de los Estados Unidos donde el área cambia desde influenciada por la marea a sin efecto de marea, un LWD es utilizado el cual es determinado al restar 0,2 m del Nivel Medio Local derivado de las observaciones y ajustado a un período de 19 años.

Los dátum de Nivel de agua son completamente distintos a los dátum geodésicos verticales, de hecho, es imposible transferir un dátum de marea de un lugar a otro con nivelación geodésica de precisión, sin considerar las condiciones de marea locales. La red geodésica establece, sin embargo, las relaciones entre las muchas estaciones de marea y sus dátum de elevación de marea.

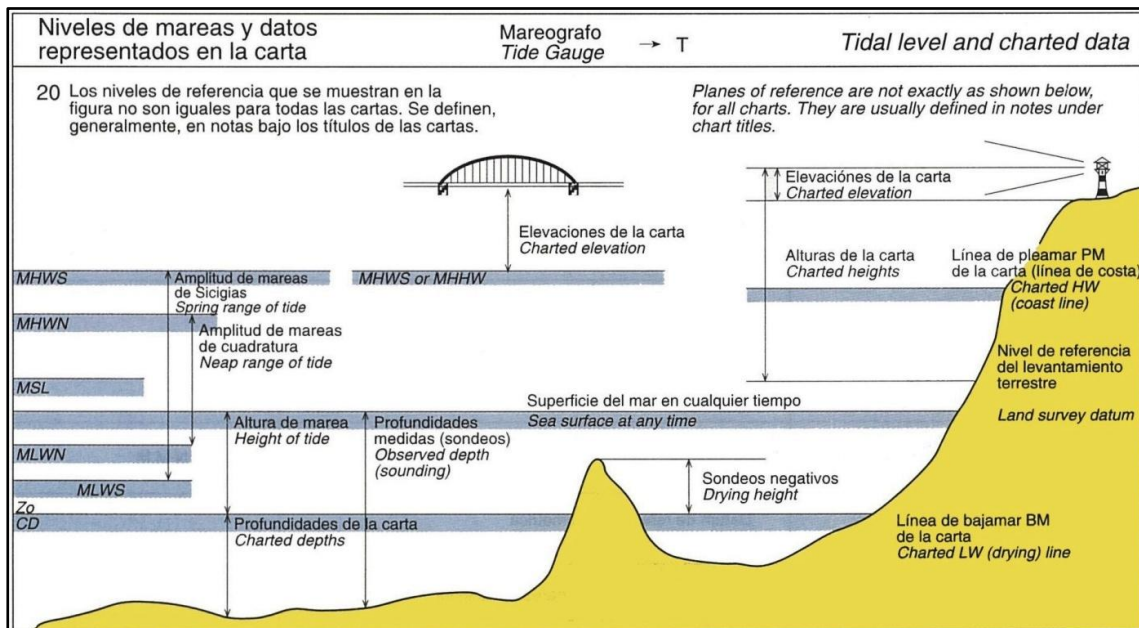


Figura 4.4. Niveles de Marea. Tomado de Carta 001 CIOH

4.3. WGS84 y GRS80

WGS84 (World Geodetic System 1984) en español sistema geodésico mundial, es un sistema de coordenadas geocéntricas terrestre convencional y es la base para los sistemas de posicionamiento globales GNSS y utiliza como elipsoide de referencia a WGS 84. Mientras que GRS80 (Geodesic Reference System) Sistema Geodésico de Referencia 1980, fue adoptado en la Asamblea General de la Unión Internacional de Geodesia y Geofísica (IUGG). Es esencialmente la base de posicionamiento geodésico del sistema de posicionamiento global y, por tanto, también su uso es generalizado en la comunidad geocientífica.

En general un datum horizontal como GRS80 o WGS84 tiene varios parámetros físicos y geométricos, pero puede ser completamente definido por cuatro parámetros linealmente independientes cuyas magnitudes se muestran en la tabla 4.1 y son: semieje mayor a , constante Gravitacional y la masa de la Tierra incluyendo la atmosfera GM , coeficiente dinámico de la tierra J_2 incluyendo la deformación permanente por las mareas y velocidad angular de rotación ω . Sin embargo, para definir un elipsoide se requiere el aplastamiento f que es otro parámetro geométrico, el cual se calcula por una rigurosa normalización de segundo grado del coeficiente zonal gravitacional ($C_{2,0}$). Como se muestra en la tabla 4.1, son tan pequeñas las diferencias entre estos dos datums horizontales que en la práctica en algunas ocasiones se asumen despreciables y se consideran GRS80 y WGS84 con parámetros similares.

Parámetro	Valor WGS84	Valor GRS80
a	6' 378 137 m	6' 378 137 m
GM	$3\,986\,004.418 \cdot 10^8 \text{ m}^3 \text{ s}^{-2}$	$3\,986\,005 \cdot 10^8 \text{ m}^3 \text{ s}^{-2}$
J_2	$108\,262.998905 \cdot 10^{-8}$	$108\,263 \cdot 10^{-8}$
ω	$7\,292\,115 \cdot 10^{-11} \text{ rad s}^{-1}$	$7\,292\,115 \cdot 10^{-11} \text{ rad s}^{-1}$
f^1	298. 257223563	298. 257222101

Tabla 4.1. Parámetros del datum GRS80 y WGS84

4.4. Formula internacional de gravedad

A pesar de que la Tierra no es exactamente un elipsoide, las equipotenciales del elipsoide proporcionan una forma simple, coherente y uniforme de un sistema de referencia para todos los efectos geodésicos y geofísicos. Desde el punto de vista del campo de interés, se definió la Fórmula Internacional de la gravedad aprobada por la Unión Internacional de Geodesia y Geofísica (UIGG) en la cual *gravedad normal* se asociada a un elipsoide de revolución, con su respectivo potencial U_o y los parámetros mencionados para definir un datum, es decir, considera la misma velocidad angular en la superficie de la tierra y toda la masa de la tierra se considera contenida en un elipsoide, la superficie de potencial U_o del elipsoide, se asume igual al potencial W_o del geoide, donde su origen coincide con el centro de masas de la Tierra.

Con estos supuestos, se obtiene la formula internacional de la gravedad, también conocida como gravedad normal, en función de la latitud del lugar φ , por lo cual será mayor en el polo que en el ecuador¹².

$$\gamma = 978032.7 * (1 + 0053024 * (\text{sen}^2 \varphi) - 0.0000058 * (\text{sen}^2 2\varphi)) \text{ miligales} \quad [4.12]$$

En la práctica el campo de gravedad de un elipsoide es básico, porque es un modelo matemático que permite obtener un modelo de referencia con el cual se obtienen los valores anómalos de gravedad de tipo global y local.

4.5. Tipos de alturas

Como se ha mencionado, para entender el punto de vista dinámico o físico es necesario considerar como se muestra en la figura 4.5, la existencia de tres superficies: topografía, geoide y elipsoide. La *topografía* se representa por cadenas montañosas, valles y depresiones, es decir, corresponde a la superficie de las plataformas oceánicas y continentales, y es la realidad espacial en la tierra. El *geoide* es una superficie físico-matemática, lo que implica que no es una superficie matemática simple, como sí lo es el *elipsoide* el cual se define a través de sus parámetros geométricos y corresponde a una superficie conceptual y abstracta que permite una representación sencilla de la tierra y fue tratado en el capítulo 1, ver ecuación 1.1.

Sí se considera un punto T en la superficie topográfica, este tiene asociadas dos alturas, una elipsoidal h , de tipo geométrico por estar referida al elipsoide y otra ortométrica H , de tipo físico por estar referida al geoide, las cuales se relacionan a través de la siguiente ecuación.

$$h = H + N \quad [4.13]$$

Altura elipsoidal (h) La altura elipsoidal o geométrica h se mide con respecto a un elipsoide de referencia y corresponde a la línea recta perpendicular desde esta superficie hasta el punto $h = TT'$.

Altura Ortométrica (H): esta es una altura física asociada al geoide que se define como la distancia entre el geoide y el punto TQ . Para su cálculo se debe tener en cuenta el valor medio de gravedad medido a lo largo de la línea de plomada \vec{g} , como este valor de altura no se puede medir directamente debe recurrirse a procedimientos indirectos, como las rutas de nivelación a partir de los puntos en la costa donde el geoide es accesible, entonces debe ser estimado con base en un valor de gravedad observado en la superficie terrestre y manejando alguna hipótesis sobre la distribución interna de las masas.

¹² Esta fórmula esta para GRS80 y varía según las condiciones definidas para la misma por la Asociación Internacional de Geodesia y Geofísica.

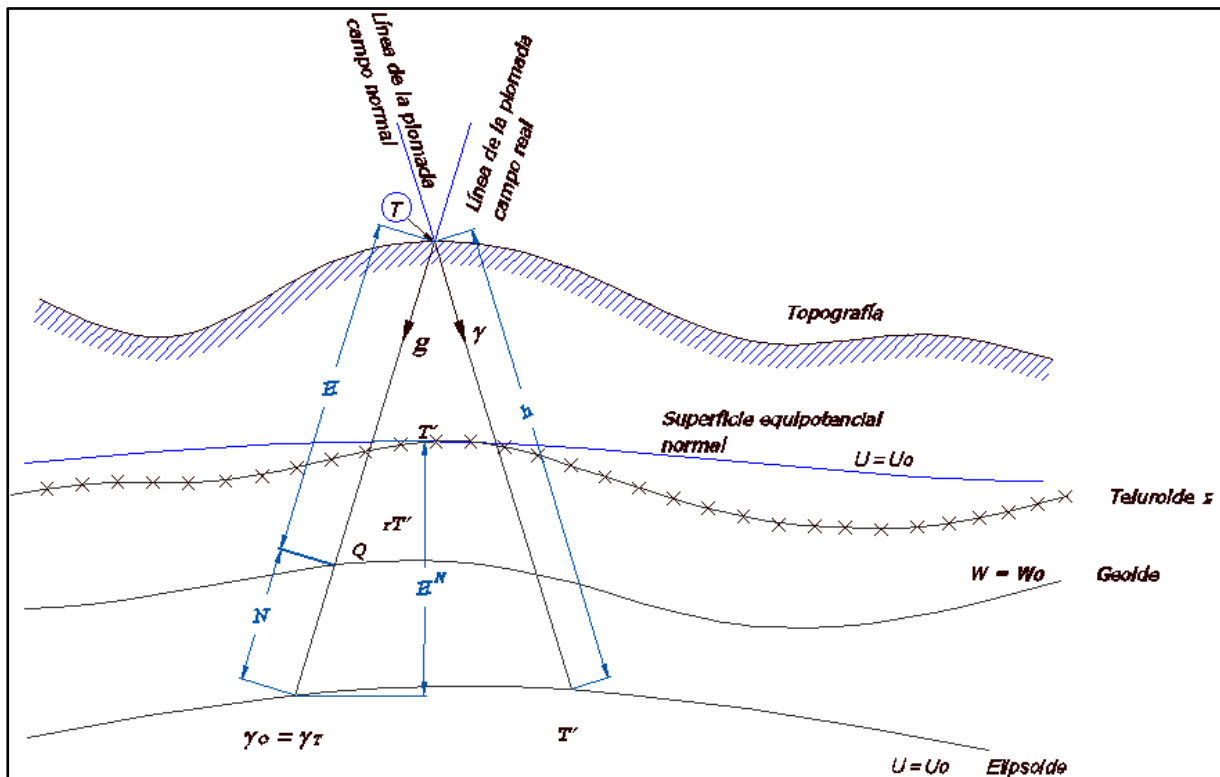


Figura 4.5. Superficies de referencia.

Para entender la diferencia entre esta altura y la altura dinámica junto con su connotación geométrica, es preciso tener claro que una misma superficie equipotencial del campo de gravedad no tiene la misma altura Ortométrica en todos sus puntos, debido a que esta superficie no mantiene una distancia constante sobre el geoide. Tal como se muestra en la figura 4.5.

Ondulación Geoidal (N): también conocida como altura geoidal la ondulación geoidal es la relación entre la altura elipsoidal y ortométrica como se describe en la ecuación 4.13, siendo la distancia entre la superficie del geoide y la del elipsoide. Ver figura 4.5.

$$N = h - H \quad [4.14]$$

Número Geopotencial (C): este número corresponde a la diferencia de potencial entre el geoide medido en una estación de referencia situada al nivel del mar y el punto sobre la superficie terrestre con un valor de potencial asociado.

Altura Dinámica (H^{din}): esta es una altura físicamente ligada al geoide, de tal modo que todos los elementos con una misma altura dinámica se sitúan sobre una misma superficie equipotencial del campo de gravedad terrestre. Esta altura puede ser representada por el número geopotencial (C) y la gravedad normal a una latitud determinada (γ_0), normalmente 45° (es decir 980629,4 miligales).

$$H^{din} = \frac{C}{\gamma_0} \quad [4.15]$$

Altura Normal (H^N): esta altura es una aproximación a la altura Ortométrica y define la altura sobre el teluroide, una superficie ficticia, esta altura se mide a lo largo de la perpendicular al elipsoide. Para su cálculo se tiene en cuenta el número geopotencial (C) y la gravedad normal del punto ($\bar{\gamma}$) en lugar del valor de gravedad medio utilizado en la altura ortométrica. Esta

altura se puede calcular exactamente ya que no requiere ningún conocimiento de la distribución interna de masas.

$$H^N = \frac{C}{\gamma} \quad [4.16]$$

$$\bar{\gamma} = \frac{1}{H^N} \int_0^{H^N} \gamma \cdot dh$$

4.6. Métodos de Nivelación

Los métodos de nivelación buscan determinar las diferencias de cota o desniveles de los puntos con respecto a una superficie de referencia. En general, la *nivelación* es fundamental para obtener datos necesarios en la elaboración de mapas, proyectos de ingeniería, oceanografía, hidrografía y obras civiles de construcción. En la figura 4.6. se muestra de manera general la forma en que se obtiene la diferencia de nivel entre los puntos A y B, con respecto al nivel medio del mar, que es una superficie de nivel, conocida como dátum vertical o Geoide definido en la sección 4.2.1.

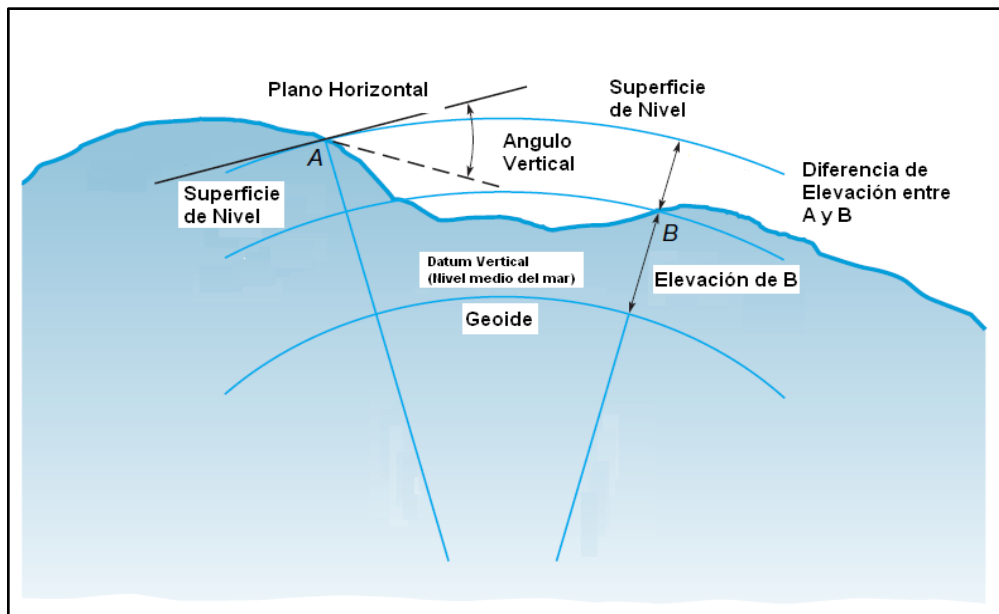


Figura 4.6. Diferencias de nivel entre un punto A y un punto B Tomado de ftp://ftp.prenhall.com/pub/esm/civil_engineering.s-044/wolf/struct_concrete_2e/weblog4.pdf

En el desarrollo de proyectos de nivelación para hidrografía y oceanografía, se tienen entre otros: a) El cálculo de escurrimientos o drenajes de una región a través de las pendientes, b) proyectos de carreteras, canales, vías de drenaje y sistemas de acueducto y alcantarillado que se ajusten a las condiciones óptimas de la superficie topográfica, c) puntos batimétricos en la plataforma oceánica, d) estudio de los movimientos geodinámicos de las placas de la corteza terrestre.

Existen varias clasificaciones de los tipos de nivelación y en este manual se presenta una clasificación de los tipos de nivelación según la forma en que ésta se realiza y se controla, como lo son Nivelación Directa y Nivelación Indirecta.

En los métodos de Nivelación Directa se encuentran:

- Nivelación Geométrica Simple
- Nivelación Geométrica Compuesta

En los métodos de nivelación indirecta se encuentran:

- Nivelación Trigonométrica
- Nivelación Barométrica
- Nivelación GPS¹³

En la nivelación directa se reconocen dos tipos de nivelación según el número de posiciones instrumentales utilizado, así la nivelación simple se tiene cuando se utiliza sólo una posición y la nivelación compuesta cuando se requiere de dos o más posiciones instrumentales. Entendida una posición instrumental como armar el nivel sobre en un lugar específico.

Según la manera en que se utilizan los puntos de cierre, las nivelaciones compuestas son abiertas o cerradas, es decir, si se parte de un punto con cota conocida y se llega a un punto con cota desconocida la nivelación es abierta, si por el contrario se parte de un punto con cota conocida y se llega a un punto también con cota conocida que incluso puede ser el mismo punto inicial, entonces se denomina nivelación cerrada. Los instrumentos utilizados para realizar la nivelación geométrica o diferencial son de varios tipos: nivel de burbuja, nivel de mano, nivel tipo Y, nivel de tipo fijo o de anteojo corto, nivel basculante de anteojo fijo, nivel automático, nivel de rastreo laser, nivel de precisión geodésica y GPS. En la tabla 4.2, se hace una breve descripción de cada uno de ellos.

¹³ Este método será explicado en el capítulo 5.

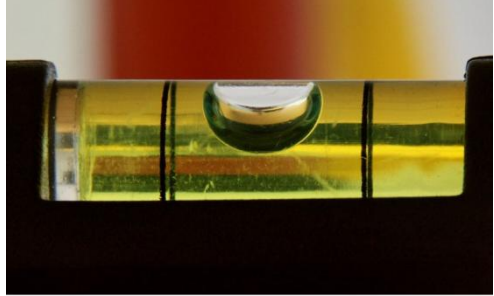

Tipo de Nivel	Descripción	Ejemplo
Nivel de Burbuja	<p>Un nivel de esta clase es un tubo de vidrio, sellado en ambos extremos, que contiene un líquido sensible y pequeña burbuja de aire. El líquido es incongelable de acción rápida y relativamente estable para variaciones normales de la temperatura. El principio de este instrumento está en un pequeño tubo transparente (cristal o plástico) el cual está lleno de líquido con una burbuja de aire en su interior. La burbuja es de tamaño inferior a la distancia entre las dos marcas. Si la burbuja se encuentra simétricamente entre las dos marcas, el instrumento indica un nivel exacto que puede ser horizontal, vertical u otro, dependiendo de la posición general del instrumento.</p>	 <p>Tomado de: http://es.wikipedia.org/wiki/Archivo:DetalleNivelDeBurbuja.jpg</p>
Nivel de Mano	<p>El nivel de mano es un instrumento óptico que se sostiene con una sola mano y se usa con trabajos de poca precisión y para fines de verificación rápida. Su anteojo es un tubo de latón de unas seis pulgadas de largo, con un objetivo de vidrio simple y un ocular. Tiene además un pequeño nivel de burbuja montado sobre una ranura superior del tubo, y se ve a través del ocular utilizando un prisma o un espejo inclinado a 45 grados. Tiene un hilo horizontal que cruza el centro del tubo.</p>	 <p>Tomado de http://www.ascscientific.com/level.html</p>

Tabla 4.2. Tipos de Instrumentos de Nivelación



Tipo de Nivel	Descripción	Ejemplo
<p>Nivel Tipo Y (WYE)</p>	<p>Este nivel que no se utiliza actualmente, pero que durante muchos años se utilizó en los comienzos de los trabajos de topografía y geodesia, tiene un anteojo no fijo sobre soportes en Y llamados así debido a su forma. Las abrazaderas curvas articuladas en uno de sus extremos y empotradas en el otro, aseguran a su anteojo en su lugar. El tipo de anteojo desmontable es más fácil de ajustar que el nivel de anteojo fijo, porque en el primero el tubo puede sacarse de sus soportes y colocarse en dirección opuesta, esto permite que una sola persona pueda efectuar todos los ajustes sin ayuda.</p>	 <p>Tomado de http://americanhistory.si.edu/collections/surveying/ Tipo PH*337201</p>
<p>Nivel de Tipo Fijo (DUMPY)</p>	<p>Este tipo de nivel esta rígidamente unido a la regla de nivel y es paralelo a esta. El nivel de burbuja unido a la regla de nivel y protegido, permanece siempre en el mismo plano vertical que el anteojo, pero unos tornillos situados en cada extremo permiten ajustarlo verticalmente y se puede cambiar el nivel de burbuja cuando se daña. Este nivel también se dejó de utilizar hace algunos años.</p> <p>El instrumento requiere que se realice una nivelación en cada cuadrante para garantizar que es correcta a través de un recorrido completo de 360°. El telescopio está articulado a un lado del eje del instrumento, se trata de levantar volteando hacia el otro lado del eje central, esta acción anula eficazmente cualquier error introducido por la falta de procedimiento de configuración o errores en el ajuste del instrumento.</p>	 <p>Tomado de http://americanhistory.si.edu/collections/surveying/ Tipo PH*333634</p>

Tabla 4.2. Tipos de Instrumentos de Nivelación

Tipo de Nivel	Descripción	Ejemplo
<p>Nivel Basculante Fijo (TILTING DUMPY)</p>	<p>Este tipo de niveles son utilizados en trabajos de alta precisión y topográficos generales, aunque hace algunos años no se fabrican aún son utilizados por los topógrafos. Llevan un nivel de burbuja circular para nivelarlos aproximadamente empleando tornillos niveladores, o bien, una articulación esférica o de rotula que permite inclinar la base y fijarla en posición casi a nivel. Su nivelación exacta se logra inclinando o basculando el anteojo ligeramente en un plano vertical en torno a un fulcro situado en el eje vertical del instrumento, sin cambiar la altura de este. Un tornillo micrométrico situado bajo del ocular controla este movimiento. La característica basculante, ahorra tiempo y aumenta la precisión, ya que sólo se necesita mover un tornillo para mantener horizontal la visual al girar el anteojo alrededor de su eje vertical.</p>	 <p>Tomado de http://americanhistory.si.edu/collections/surveying/ Tipo 1982.0671.14</p>
<p>Niveles Automáticos</p>	<p>Los niveles automáticos análogos tienen un dispositivo de auto nivelación. En la mayoría de estos instrumentos se logra la nivelación aproximada usando una base con tres tornillos niveladores que centran una burbuja circular, aunque algunos modelos tienen una articulación esférica y de rotulo. Después de centrar manualmente la burbuja, un compensador automático nivela la visual y la mantiene a nivel con toda precisión.</p> <p>En este grupo se encuentran los niveles digitales electrónicos que también utilizan un compensador de auto nivelación después de la nivelación previa realizada por el operario. Además de realizar las mediciones y captura de datos de forma digital, con su telescopio y su retícula de hilos, el instrumento también se puede utilizar para obtener lecturas manualmente como los niveles automáticos análogos.</p>	 <p>Tomado de http://www.leica-geosystems.com/corporate/en/products/levels/ Tipo óptico 720</p>

Tabla 4.2. Tipos de Instrumentos de Nivelación




Tipo de Nivel	Descripción	Ejemplo
Nivel Laser	<p>Por su parte los niveles laser que también son electrónicos son instrumentos para obras civiles de construcción (interiores y exteriores). Además de disponer de un de alto alcance, ser automáticos y poseer función de auto nivelación, disponen de un mando a distancia y un control comfortable.</p> <p>El propósito fundamental de estos instrumentos es crear una línea visible de orientación conocida o un plano de elevación determinado a partir del cual puedan efectuarse mediciones de distancias y pendientes. Los niveles láser de rayo simple son aparatos que proyectan “líneas de alineamiento o plomada” utilizadas en obras de construcción de túneles, alcantarillas y edificaciones. Los niveles láser de rayo rotatorio tienen dispositivos ópticos rotatorios que permiten el giro acimutal del rayo, generando así planos de referencia, son muy útiles en levantamientos cartográficos.</p> <p>También existen para los niveles láser componentes adicionales (detector láser, trípodes, adaptadores de inclinación, blancos de comprobación magnéticos, soportes de pared).</p>	 <p>Tomado de http://www.leica-geosystems.com/corporate/en/products/levels/ Tipo Rugby 300</p>

Tabla 4.2. Tipos de Instrumentos de Nivelación

Tipo de Nivel	Descripción	Ejemplo
Niveles Geodésicos	<p>Los instrumentos de nivelación Geodésica son los niveles más precisos que existen, pueden ser automáticos ópticos o electrónicos o también niveles láser, la diferencia con los demás niveles está en la precisión que estos requieren para la obtención de alturas, dado que su uso en general esta en la definición de sistemas de referencia vertical, es decir “el geoide”. La mira o estadal de estos equipos garantizan una alta precisión junto con el nivel. Pueden ser de tipo análogo o digital.</p> <p>Por ejemplo el nivel "Wild N3", es un nivel de precisión geodésico clásico construido en los años 60 del siglo XX. Aunque fue diseñado originalmente para las redes geodésicas se utiliza para propósitos topográficos de levantamientos de obras civiles, presas, instalaciones industriales, ensamblaje de fuselaje de aviones y control de desplazamiento vertical, dada su alta precisión y versátil diseño. Tiene una precisión de lectura del orden de 0,01 mm.</p>	 <p>Tomado de http://www.wild-heerbrugg.com/wild_n3.htm Tipo Wild N3</p>
GPS	<p>El GPS un instrumento que permite obtener alturas elipsoidales, porque determina las coordenadas curvilíneas (latitud, longitud y altura), a partir de coordenadas ortogonales X,Y,Z, tal como se explico en el problema inverso de coordenadas rectangulares del capítulo 1. Es la técnica de nivelación de uso masivo, pero tiene limitaciones en cuanto a la precisión de los datos, porque esta depende de las características del receptor, generalmente en redes de control geodésico los datos obtenidos también se controlan con las técnicas clásicas de nivelación geodésica. En general esta nivelación se realiza en tiempo real, con el control de los puntos de la poligonal. El levantamiento del terreno se realiza fácilmente, es suficiente comenzar a tomar los datos según el diseño de adquisición previamente realizado.</p>	 <p>Tomado de http://www.trimble.com/trimbler7gnss.shtml Tipo R7 GNSS system</p>

4.7. Nivelación Geométrica

Este método de nivelación mide la distancia vertical de un punto con respecto a una superficie de nivel, permitiendo así la determinación directa de su altura. Es el método de uso más común, se determina una línea visual horizontal utilizando un nivel óptico o compensador automático digital. Utiliza un anteojo telescópico con la amplificación adecuada que permite la lectura de miras graduadas, situadas sobre puntos fijos.

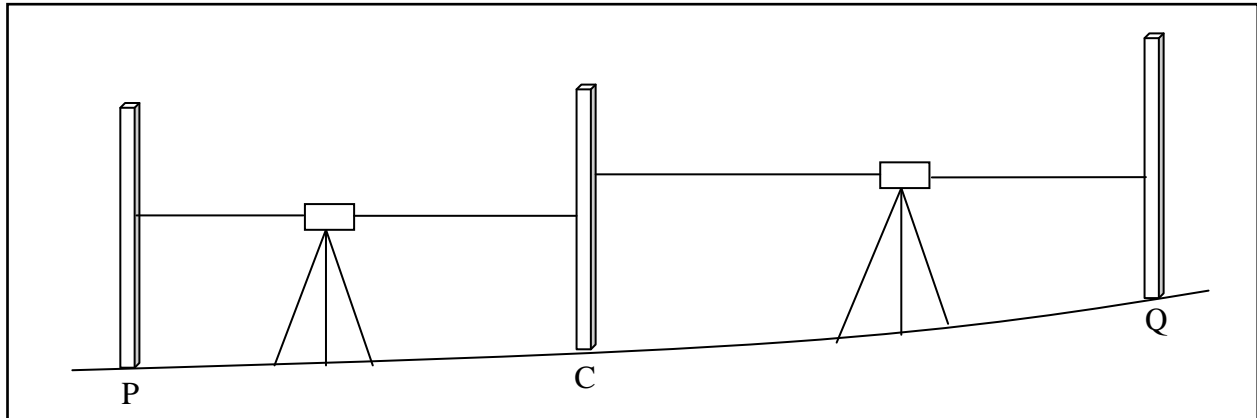


Figura 4.7. Ejemplo de nivelación desde un punto P hasta un punto Q.

El método consiste en seguir una ruta de nivelación, como la mostrada en la figura 4.7, en donde se va desde un punto P hasta un punto Q, a través de la determinación de diferencias de nivel (también conocidas como subes o bajas) se obtiene la cota del punto Q.

El nivel se sitúa aproximadamente en la mitad de la distancia entre el banco de nivel P (punto con cota conocida) y el punto de cambio C, conocida la cota H_P y medida la vista atrás (V^+), se determina la altura instrumental HI , la cual al restarle la vista adelante (V^-) permite obtener la cota de cambio H_C ; de la misma forma se obtiene la cota H_Q . Con la disposición de puntos que se indica en la figura 4.7 se tiene que:

$$\text{Cota Punto } P = H_P = 125.17 \text{ m}$$

$$\text{Vista atrás } (V^+) = 1.38 \text{ m}$$

$$\text{Vista adelante } (V^-) = 0.98 \text{ m}$$

$$\text{Altura instrumental punto A, } HI_A = H_P + (V^+) = 125.17 \text{ m} + 1.38 \text{ m} = 126.55$$

$$\text{Cota punto de Cambio} = H_C = HI_A - (V^-) = 125.57$$

$$\text{Vista atrás } (V^+) = 1.43 \text{ m}$$

$$\text{Vista adelante } (V^-) = 0.78 \text{ m}$$

$$\text{Altura instrumental cambio C, } HI_C = H_C + (V^+) = 125.57 \text{ m} + 1.43 \text{ m} = 127 \text{ m}$$

$$\text{Cota punto de Q} = H_Q = HI_C - (V^-) = 126.22 \text{ m}$$

4.7.1. Instrumentos de Nivelación. Nivel Automático Análogo

La Figura 4.8 muestra el esquema de un nivel, estos instrumentos permiten medir diferencias de cota de acuerdo al tipo de nivel y sus especificaciones de precisión y requiere para su medición miras o estadales que son reglas plegables de diferentes longitudes.

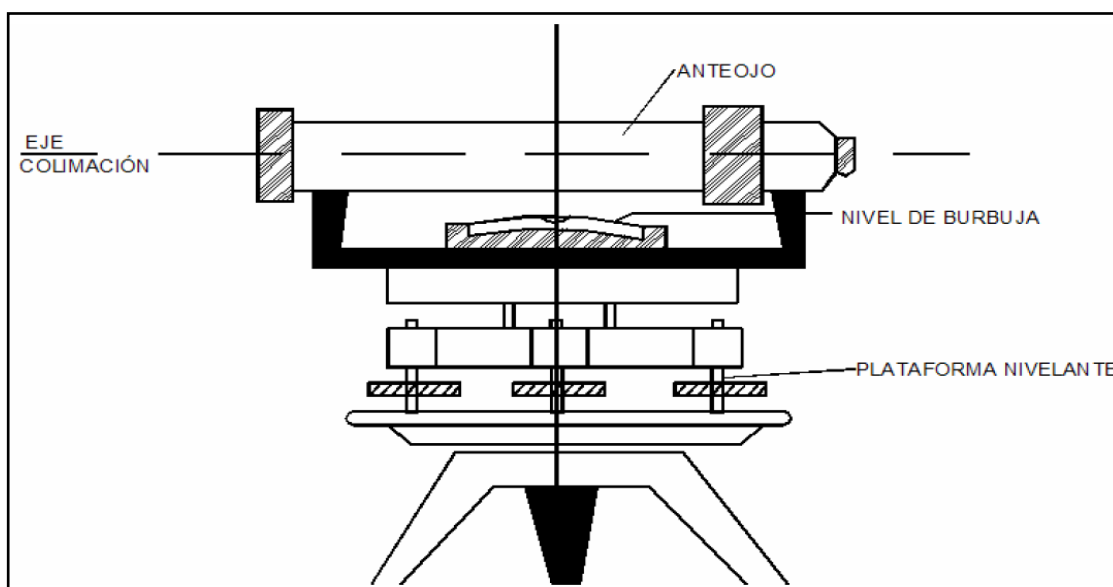


Figura 4.8. Esquema de un Nivel

Mediante el giro de los tornillos nivelantes se centra la burbuja del nivel en la posición correcta, lo que permite determinar un plano horizontal sobre el cual se realiza la nivelación. El instrumento tiene un anteojo telescópico para realizar la observación, este es un tubo metálico que contiene cuatro partes principales: objetivo, lente negativo, retícula y ocular. En la sección 4.11 se muestra el trabajo de campo y el procedimiento desarrollado con un nivel análogo automático.

4.7.2. Carteras de cálculo

Un aspecto fundamental del trabajo de campo es el registro de la información proveniente de las diferentes mediciones angulares y lineales, estas notas de campo se registran en libretas denominadas carteras y deben contener toda la información descriptiva y numérica del levantamiento. Se debe mencionar el punto visado, las vista atrás ($V+$), intermedia ($V-$) y adelante ($V-$), la altura instrumental (HI), la cota, descripción y gráfico. En la Tabla 4.3 se observa un modelo de cartera para una nivelación geométrica compuesta.

<i>Punto</i>	<i>Vista Atrás (V+)</i>		<i>Vista Intermedia (V-)</i>		<i>Vista Adelante (V-)</i>		<i>Altura instrumental (HI)</i>	<i>Cota</i>	<i>Descripción</i>	<i>Gráfico</i>
<i>A</i>	<i>S</i>		<i>S</i>		<i>S</i>					
	<i>M</i>		<i>M</i>		<i>M</i>					
	<i>I</i>		<i>I</i>		<i>I</i>					
<i>B</i>	<i>S</i>		<i>S</i>		<i>S</i>					
	<i>M</i>		<i>M</i>		<i>M</i>					
	<i>I</i>		<i>I</i>		<i>I</i>					
<i>C</i>	<i>S</i>		<i>S</i>		<i>S</i>					
	<i>M</i>		<i>M</i>		<i>M</i>					
	<i>I</i>		<i>I</i>		<i>I</i>					
<i>D</i>	<i>S</i>		<i>S</i>		<i>S</i>					
	<i>M</i>		<i>M</i>		<i>M</i>					
	<i>I</i>		<i>I</i>		<i>I</i>					

Tabla 4.3. Modelo de Cartera: Nivelación Geométrica Compuesta

4.7.3. Precisión en la toma de datos

Según el tipo y la finalidad del levantamiento las mediciones deben mantenerse dentro de ciertos límites de precisión. Cuando se toma una medición se presentan errores cuyo valor es desconocido, sin embargo, es posible conocer el origen de los errores y al compensar el efecto conjunto de ellos se puede lograr la precisión requerida. En los levantamientos se busca eliminar los errores sistemáticos (aquellos que en condiciones de igualdad se repiten en la misma cantidad y con el mismo signo) de tal modo que las mediciones quedarán afectadas por los errores accidentales cometidos. En términos de precisión en los levantamientos de nivelación y según la calidad de los equipos y los datos adquiridos las nivelaciones geométricas se clasifican como topográficas o geodésicas. (Véase tabla 4.4).

Clase de Nivelación	Longitud de la Visual Máxima	Aproximación en la Lectura de la Mira	Error Máximo en Centímetros
Poca precisión	300 m	5 cm	$9.5\sqrt{k}$
Ordinaria	150 m	0.5 cm	$2.4\sqrt{k}$
Precisión	100 m	0.1 cm	$1.2\sqrt{k}$
Geodésica 2º orden	100 m	0.1 cm	$0.8\sqrt{k}$
Geodésica 1º orden	100 m	0.1 cm	$0.4\sqrt{k}$

Tabla 4.4. Error permitido dada la precisión de una nivelación

Donde k corresponde a la distancia nivelada en kilómetros

4.7.4. Nivelación Recíproca

Este es un método de nivelación geométrica simple y es útil para mejorar la precisión de las cotas obtenidas, considerando que no tiene métodos de control. La nivelación recíproca es utilizada para nivelar lugares inaccesibles o lejanos, y para eliminar los efectos del error residual, de la curvatura de la tierra y la refracción. Teniendo dos puntos A y B , el procedimiento para nivelarlos es el siguiente (observe la Figura 4.9):

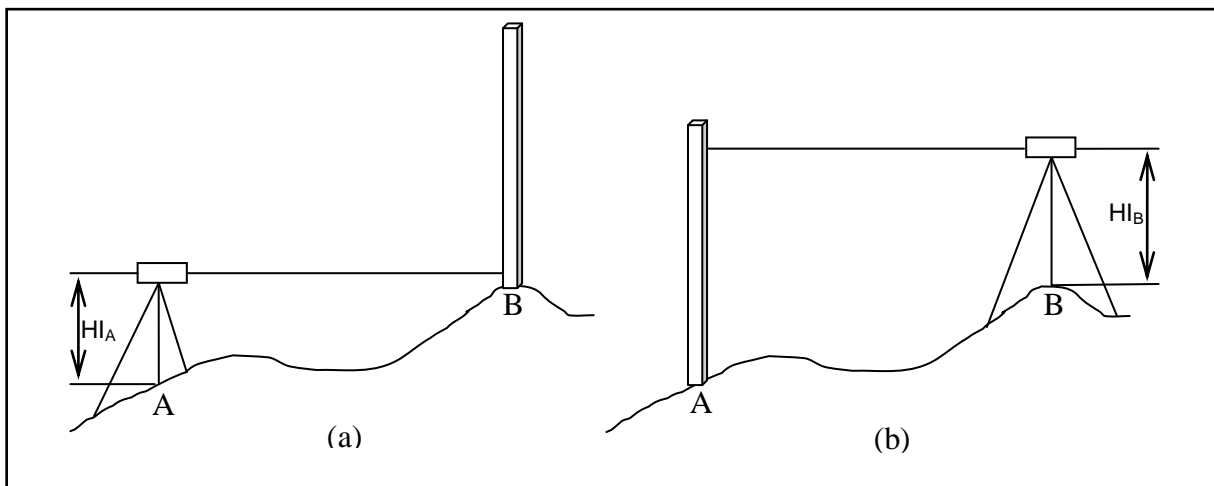


Figura 4.9. Método de estaciones recíprocas

Como se observa en el caso (a) se realiza la observación de A hacia B y se calcula el desnivel entre los puntos A y B así:

$$\Delta H_A^B = HI_A - H_B \quad [4.17]$$

HI_A : Altura instrumental de la estación A

Posteriormente se invierten las posiciones del nivel y la mira realizando la observación desde B hacia A como se observa en el caso (b), de este modo se obtiene el desnivel entre los puntos A y B así:

$$\Delta H_B^A = H_A - HI_B \quad [4.18]$$

HI_B : Altura instrumental de la estación B

El desnivel promedio entre los puntos A y B teniendo en cuenta las mediciones directa y recíproca será:

$$\frac{\Delta H_A^B + \Delta H_B^A}{2} = \frac{(HI_A - HI_B) + (H_A - H_B)}{2} \quad [4.19]$$

4.7.5. Nivelación No recíproca

Este método se diferencia del anterior en que solo se realiza la observación en una dirección, de tal modo que el desnivel entre dos puntos A y B se obtiene directamente. Este método es el utilizado en el procedimiento de Nivelación Radial y permite obtener una menor precisión que el de la nivelación recíproca al no compensar el efecto del error residual, de la curvatura de la tierra y de la refracción.

4.7.6. Error de cierre

La nivelación geométrica se fundamenta en el paralelismo de las visuales para todos los puntos del levantamiento, por lo que se deben considerar observaciones a distancias cortas. Las alturas verticales determinadas por el nivel y la mira se asumen paralelas entre si, sin embargo, desde un punto de vista físico – matemático riguroso, tal como se mencionó al comienzo del capítulo las superficies equipotenciales no son paralelas, lo que implica que siempre habrá un pequeño error de cierre y este error no será igual en distintas rutas de nivelación.

En una nivelación cerrada el error de cierre corresponde a la diferencia entre la lectura inicial del punto de partida, y la lectura de cierre del mismo punto. Este error debe mantenerse dentro de una tolerancia dada según la precisión del levantamiento realizado, si el error supera la tolerancia, entonces la nivelación se debe realizar nuevamente, en caso contrario el error se debe compensar en cada una de las observaciones.

4.7.7. Topográfica o líneas cortas

Cuando un levantamiento topográfico se realiza en una pequeña extensión de terreno de tal modo que existe una cercanía entre puntos, es posible suponer que el terreno es plano sin tener en cuenta la curvatura de la tierra. Si se tiene en cuenta que un arco de la superficie terrestre de 20 km de longitud es tan solo 1 cm más largo que si se asume una superficie plana y que para un triángulo con área de 190 km² solo se comete un error de un segundo de exceso esférico, entonces, el error teniendo en cuenta esta hipótesis es mínimo.

En términos de las características de un levantamiento de nivelación, éste puede ser absoluto sí se amarra a coordenadas curvilíneas, en donde se conoce la cota con respecto al

nivel medio del mar, o la altura elipsoidal de un sistema de referencia geocéntrico como WGS84, mientras que es un levantamiento relativo si se toma arbitrariamente una altura en un sistema de referencia local.

4.7.8. Geodésica o líneas largas

Los levantamientos geodésicos se utilizan en las mediciones sobre grandes extensiones de terreno, como por ejemplo en el caso de la definición de un sistema de referencia vertical como un Geoide, el cual requiere de gran precisión teniendo que considerar la curvatura de la tierra, la cual se debe reducir mediante relaciones matemáticas que corrigen los datos obtenidos. En este manual no se mencionarán las ecuaciones de la nivelación geodésica diferencial o trigonométrica, considerando que no se realizó una red geodésica de control, sino un levantamiento topográfico.

El levantamiento geodésico se realiza mediante un Marco de Referencia, que es la materialización de un sistema de referencia, con una red de vértices geodésicos establecidos estratégicamente en lugares de obras civiles de importancia en una región, como pistas de aeropuertos, vías principales y edificios. Esta red es de gran importancia porque permite constituir redes y puntos de referencia para otros levantamientos de menor precisión, es el caso de las redes MAGNA-SIRGAS y ARENA.

4.8. Nivelación Trigonométrica Topográfica

Este es un método indirecto de nivelación, en el cual los desniveles o diferencias de cota se determinan mediante el uso de procedimientos trigonométricos, considerando un triángulo rectángulo situado en un plano vertical, para esto se tiene en cuenta la medida de distancias y ángulos verticales (cenitales) tomados con cinta métrica y teodolito o bien con una estación total y un prisma.

Para medir la cota del punto B (H_B) a partir de la cota conocida del punto A (H_A), se ubica el instrumento en A y se mide el ángulo vertical (Z) y la distancia directa hasta B , de este modo la cota del punto B es la distancia entre la horizontal que pasa por A y la que pasa por B sumado a la cota del punto A , como se observa en la figura 4.10.

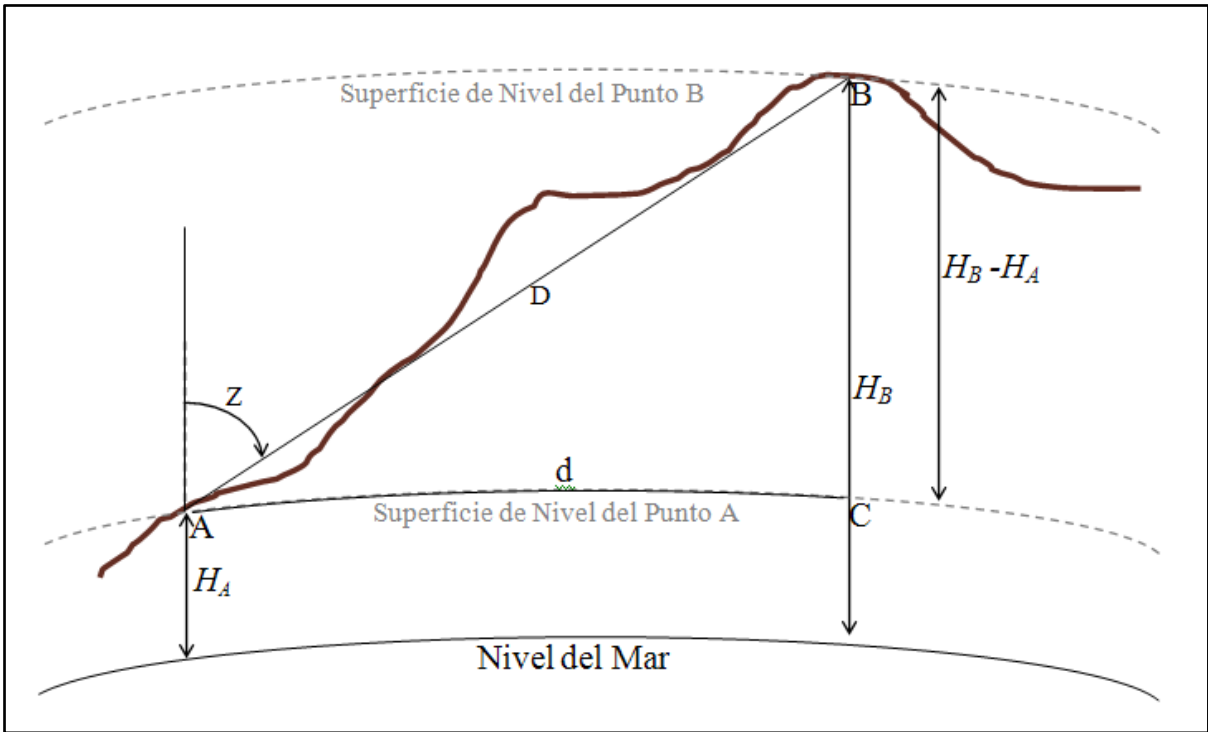


Figura 4.10. Nivelación Trigonométrica.

$H_B - H_A$: Diferencia de nivel entre los puntos A y B.

H_B : Cota desconocida del punto B.

H_A : Cota conocida del punto A.

D : Distancia inclinada observada desde el punto A hasta el punto B.

d : Distancia horizontal observada desde el punto A hasta el punto B.

Z : Ángulo cenital leído en A hacia B.

El cálculo de la diferencia de nivel ($H_B - H_A$) sin tener en cuenta la curvatura de la tierra ni la refracción atmosférica sería el siguiente:

Considérese el Triángulo ABC:

$$H_B - H_A = D * \text{sen} (90 - Z) \quad [4.20]$$

Donde

$$d = D * \text{cos} (90 - Z)$$

$$H_B - H_A = d * \text{tan} (90 - Z)$$

$$H_B - H_A = d * \text{ctg} Z$$

Haciendo una corrección combinada por curvatura y refracción, la expresión de la diferencia de nivel quedaría así:

$$H_B - H_A = d * \text{ctg} Z \pm 0.07 * \frac{d^2}{1000} \quad [4.21]$$

Se toma el signo (+) si $Z < 90^\circ$ y (-) si $Z > 90^\circ$

Para el cálculo de la diferencia de nivel adicionalmente es preciso tener en cuenta la altura del instrumento y la altura de la mira o prisma como se visualiza en la Figura 4.11.

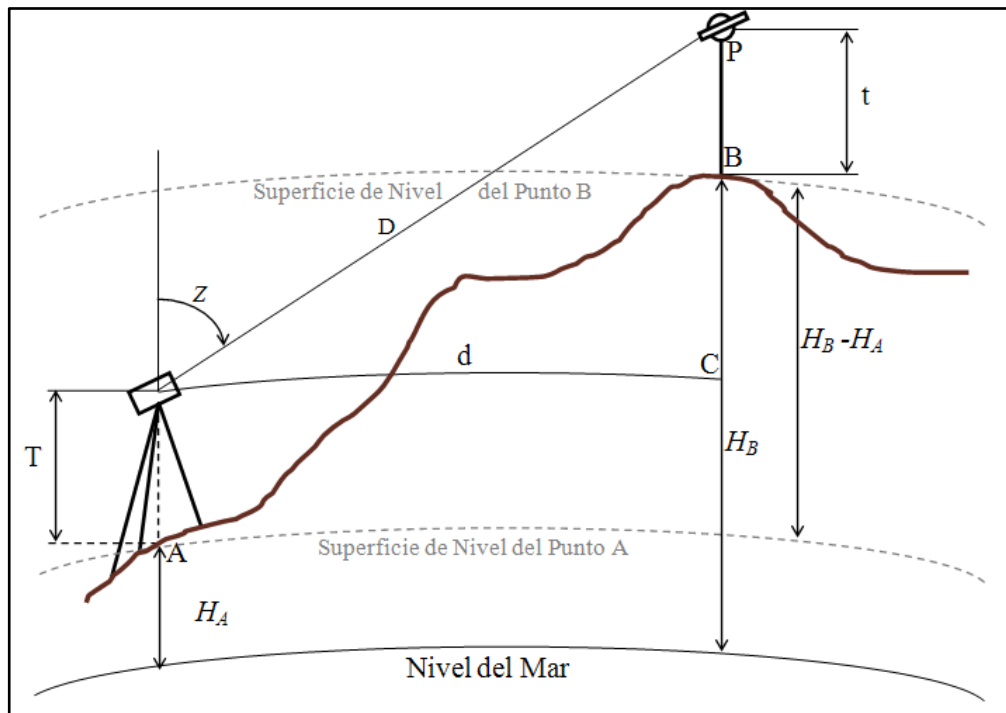


Figura 4.11. Nivelación Trigonométrica. Corrección por altura de los instrumentos.

T = Altura del teodolito sobre el punto con cota conocida.

t = Altura de la mira o del prisma sobre el punto de observación.

Considerando estos valores la cota del punto B sería:

$$H_B = H_A + T \pm \overline{PC} - t \quad [4.22]$$

4.8.1. Instrumentos de Nivelación. Estación total

Una Estación Total es un aparato que combina un instrumento electrónico digital para la medición de ángulos con un instrumento electrónico para medir distancias, para esto incorpora a un teodolito electrónico un distanciómetro y un microprocesador.

El principio de funcionamiento de un distanciómetro es similar a un GPS (ver figura 4.12), se emite una señal de energía electromagnética portadora que tiene una frecuencia modulada f y una longitud de onda λ de referencia, la cual regresa por medio de un reflector con un *desfasamiento* o desplazamiento de fase, conocido el ángulo de desfase al punto emisor se determina la fracción de longitud de la onda p por el desfase de la señal y de esta manera se determina con precisión la distancia L .

$$L = \frac{n\lambda + p}{2} \quad [4.23]$$

Donde

L = distancia entre los puntos

n = número de longitudes de onda completas

p = fracción de longitud de onda

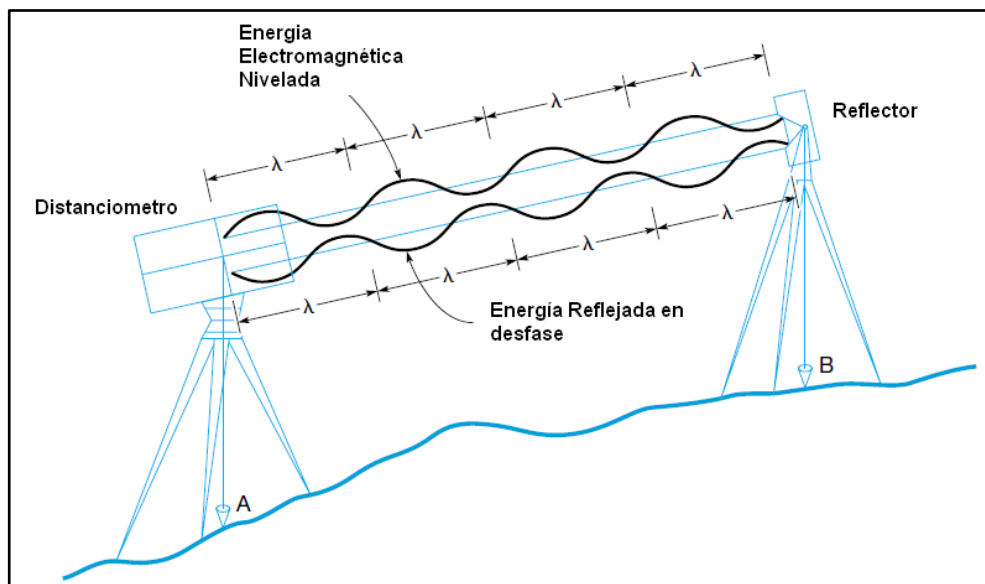


Figura 4.12. Principio de Funcionamiento de un Distanciómetro.
 Tomado de ftp://ftp.prenhall.com/pub/esm/civil_engineering.s-044/wolff/struct_concrete_2e/weblog6.pdf

El microprocesador incorporado en la estación total, es una computadora que almacena los datos adquiridos por el teodolito electrónico, el cual mide automáticamente ángulos horizontales y verticales, así como distancias inclinadas desde una sola estación. Con base en estos se calculan directamente las componentes horizontales y verticales de las distancias, las elevaciones y coordenadas, las cuales son mostradas en un LCD.

Las estaciones totales, con sus microprocesadores, pueden efectuar diferentes funciones y cálculos, dependiendo de la forma en que están programadas, la mayoría son de fácil operación. Después de seleccionar el tipo de levantamiento en un menú, automáticamente aparecerán sugerencias o indicadores para ayudar al operador en cada paso del levantamiento. Además de proporcionar ayuda al operador los microprocesadores de las estaciones totales pueden realizar numerosos tipos de cálculos. Las capacidades varían según los diferentes instrumentos, pero algunos cálculos estándar de las estaciones totales son:

- Obtención de promedios de mediciones múltiples angulares y de distancias.
- Corrección electrónica de distancias medidas por constantes de prismas.
- Presión atmosférica y temperatura.
- Correcciones por curvatura y refracción de elevaciones determinadas por nivelación trigonométrica.
- Reducción de las distancias inclinadas en sus componentes vertical y horizontal.
- Calculo de elevaciones de punto a partir de las componentes de distancias verticales.
- Calculo de las coordenadas de los puntos de levantamiento a partir de las componentes de distancia y ángulos horizontales.
- Permite obtener en tiempo real la diferencia de nivel entre dos puntos.

La Estación Total *South NTS 355* (figura 4.13) se utilizó en el ejercicio de aplicación que se menciona en la sección 4.11, y sus especificaciones técnicas son mencionadas en la tabla 4.5. Sus principales componentes son: una pantalla alfanumérica de cristal líquido (LCD) con su teclado de control (1) localizado debajo del telescopio (2) además de los elementos tradicionales de un teodolito como lo son la cabeza del trípode (3) y el ocular del colimador (4).

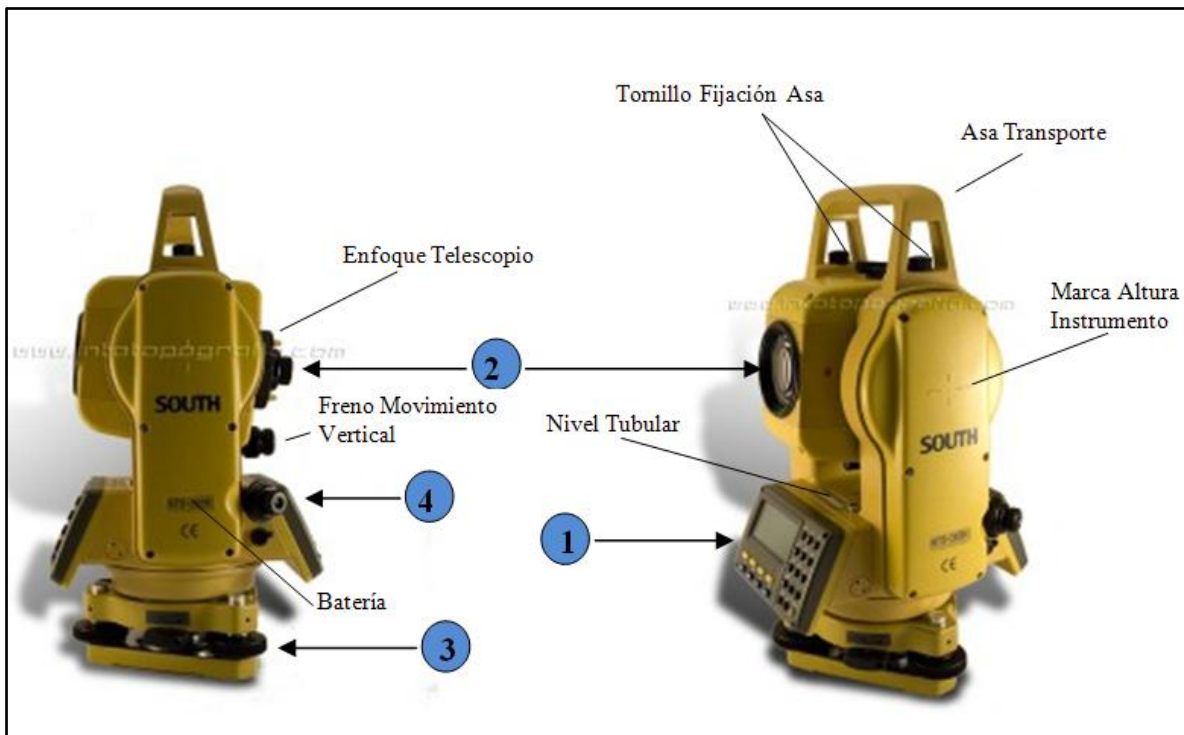


Figura 4.13. Estación Total South

<i>Característica</i>	<i>Valor</i>
<i>Precisión Angular:</i>	<i>5" (segundos)</i>
<i>Precisión distancias</i>	<i>± (2mm + 2ppm) partes por mil</i>
<i>Alcance con prisma</i>	<i>2000 m</i>
<i>Memoria Interna</i>	<i>8000 puntos</i>
<i>Duración de la batería</i>	<i>8 horas</i>
<i>Aumento de Lente</i>	<i>30X</i>

Tabla 4.5. Especificaciones Técnicas de la Estación Total South NTS 355

4.9. Nivelación Barométrica

Esta nivelación se realiza mediante el uso del barómetro, instrumento que mide la presión atmosférica, la cual se define como el peso por unidad de superficie ejercido por la atmósfera. Su unidad de medida es el *milibar* = 10^2 *pascales* = *0.75006 mm Hg* (*milímetros de mercurio*).

La presión atmosférica no sólo es afectada por la altura de un punto sobre el nivel del mar, sino también por la temperatura, la humedad relativa o las tormentas. Adicionalmente durante el día hay una variación normal de la presión barométrica, equivalente a unos 30.48 metros de altitud, conocida como oscilación diurna de la presión atmosférica. Esto hace que el método barométrico no sea preciso y no se pueda comparar con las demás técnicas directas o indirectas de nivelación, ya que tiene un error de $\pm 1m$.

La poca precisión de esta técnica en la medición de alturas no es una limitante para que el barómetro sea utilizado como uno de los instrumentos principales para los pronósticos meteorológicos, considerando que para predecir el tiempo es imprescindible averiguar el tamaño, forma y movimiento de las masas de aire continentales; esto puede lograrse realizando observaciones barométricas simultáneas en una serie de puntos distintos.

Tipos de barómetros

El anerode es un tipo de barómetro, en el que la presión atmosférica deforma la pared elástica de un cilindro en el que se ha hecho un vacío parcial, lo que a su vez mueve una aguja (ver figura 4.14). Los barómetros modernos son electrónicos y transmiten la información de forma digital, lo que ha llevado a incorporar un barómetro más evolucionado: el barógrafo.

El barógrafo no sólo representa el valor actual de la presión sino también su evolución multi temporal, información decisiva para saber lo que ocurre en la atmósfera. Se emplean casi siempre en tierra, ya que aunque son muy precisos también son muy sensibles a los movimientos. Gracias a la técnica digital, se ha podido integrar alrededor de estos barógrafos el resto de aparatos de medida de las otras variables meteorológicas, como el higrómetro y el termómetro (medidores de la humedad y la temperatura respectivamente) y configurar una estación completa en una sola unidad. Actualmente los barógrafos digitales han alcanzado un alto grado de exactitud y confiabilidad y presentan un buen número de funciones complementarias de gran utilidad para realizar una predicción meteorológica precisa.



Figura 4.14. Barómetro: Weather Bureau 720 – 920 mb

4.9.1. Descripción del Método de Nivelación Barométrica Utilizando un Altimetro

El altímetro es un tipo de barómetro anerode en el que inicialmente se toman las medidas de altura y temperatura sobre el punto de altura conocida, tomando nota también de la hora en que se realizan estas mediciones, posteriormente se procede a tomar estas mismas medidas en los puntos cuya cota se desea conocer. Al finalizar, se toman nuevamente estas medidas sobre el punto inicial para observar como debido a los cambios de las condiciones atmosféricas también cambió la lectura leída inicialmente, suponiendo que las condiciones atmosféricas cambiaron gradualmente, entonces se aplicará la corrección de manera proporcional teniendo en cuenta la hora en que se realizó cada observación. Por otro lado debe tenerse en cuenta que el altímetro viene calibrado para una temperatura específica, por tanto debe aplicarse a cada lectura una corrección adicional teniendo en cuenta la temperatura observada.

Otra técnica que permite obtener diferencias de nivel utilizando barómetros, es dejar un barómetro de control sobre un banco de nivel BN y realizar un circuito de determinación de alturas con un barómetro móvil, los datos obtenidos durante el día por los dos barómetros son ajustados de la misma manera como se realiza la corrección por deriva en Gravimetría

4.10. Hidrografía

El conocimiento de la superficie submarina también compete al campo de la topografía, en este caso la hidrografía es la encargada del estudio de la geomorfología del fondo marino utilizando modernos sistemas de medición electrónica. Según la OHI (Organización Hidrográfica Internacional) la definición de Hidrografía es la siguiente:

“Rama de las ciencias aplicadas que se ocupa de la medida y descripción de las características del mar y de las áreas costeras con el propósito primario de la navegación y el resto de los propósitos y actividades marinas, incluyendo actividades costa afuera, la investigación, la protección del ambiente, y servicios de predicción.”¹⁴

Por las características propias de los cuerpos de agua el procedimiento de un levantamiento hidrográfico es muy diferente al de un levantamiento sobre tierra firme, requiriendo de una embarcación con equipo especializado que permita determinar posición, profundidad y realizar seguimiento a una línea base con precisión durante la recolección de los datos.

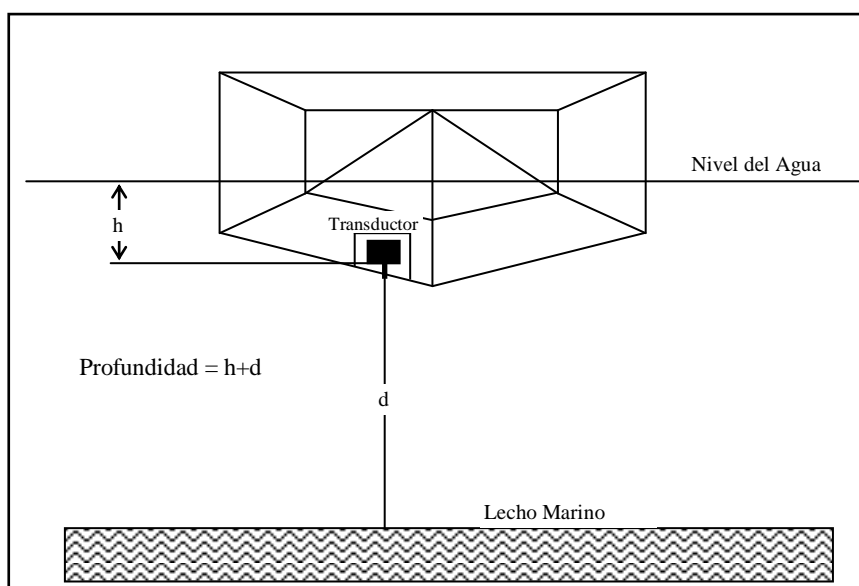


Figura 4.15. Medición de la profundidad mediante ecosonda.

Para determinar la profundidad del lecho marino, hoy en día se utilizan equipos electrónicos denominados ecosondas que se componen de una unidad de procesamiento y un transductor ubicado en la parte lateral inferior del buque como se muestra en la Figura 4.15, estos equipos emiten ondas acústicas que viajan a través del agua, rebotan en el fondo marino y regresan en forma de eco; el tiempo t que dura este pulso en viajar hasta el fondo y volver permite determinar la profundidad teniendo en cuenta la velocidad v con que se desplaza el sonido en la columna de agua donde la *profundidad* = $1/2(v)t$.

Adicionalmente se cuenta con un sistema de posicionamiento global GPS y según el orden o requerimientos del levantamiento se hace necesario contar con sensores que compensen los diferentes movimientos del buque y con un girocompás que indique la dirección del buque con relación al norte verdadero.

Antes de establecer la medida de profundidad final es preciso realizar una corrección por mareas ya que la altura de la marea es variable con respecto a un nivel de referencia. El nivel de referencia a partir del cual se toma la medida de profundidad del lecho marino en

¹⁴ OHI. Manual de Hidrografía. Publicación M-13. Mónaco. 1^{ra} Edición. Mayo de 2005.

Colombia corresponde al promedio de las mareas más bajas de sicigia (MLWS – Mean Low Water Springs) las cuales se determinan a partir de las observaciones de los mareógrafos.

Una vez se cuenta con toda la información, esta es procesada utilizando un programa especializado que permite realizar las correcciones pertinentes, para finalmente obtener una superficie que modele la profundidad del terreno.

4.11. Trabajo de campo con el nivel análogo. Método Nivelación Geométrica

El trabajo de campo diseñado tiene como propósito mostrar de una forma pedagógica y didáctica la manera de realizar un levantamiento topográfico y geodésico, en donde se comparan las cotas comunes obtenidas por las diferentes técnicas de nivelación, también busca indicar la forma de realizar las respectivas carteras de campo, mostrar los tipos de coordenadas implícitas e integrar los conceptos teóricos sobre topografía y geodesia para hidrografía, mencionados en el manual.

Se realizó el levantamiento topográfico y geodésico del edificio del CIOH y sus alrededores incluyendo los muelles, toda esta infraestructura ubicada al interior de la Escuela Naval Almirante Padilla. Se diseñaron tres ejercicios que comprenden:

- a) Nivelación Directa Geométrica Compuesta, realizada con un Nivel Automático Análogo, descrita en esta sección
- b) Nivelación Trigonométrica y levantamiento topográfico con una Estación Total, descrita en la sección 4.12. y
- c) Levantamiento Geodésico con GPS, para la obtención de latitud, longitud y altura de cada uno de los vértices, descrito en la sección 5.7.

Como se realizó un levantamiento absoluto, se utilizaron vértices geodésicos certificados por el Instituto Geográfico Agustín Codazzi, eso significa que el trabajo de campo se realizó en coordenadas geodésicas de datum WGS84, alturas elipsoidales y coordenadas cartesianas UTM, que son las coordenadas utilizadas por DIMAR y el CIOH.

4.11.1. Procedimiento

Para el área definida, como se muestra en las fotografías de la figura 4.16, se realizó una nivelación geométrica directa con un nivel automático análogo, a partir de algunos vértices de control y otros puntos de traslado previamente establecidos.

Para realizar el trabajo de campo de una nivelación geométrica en general es indispensable tener en cuenta las siguientes normas procedimentales:

1. Se debe realizar un reconocimiento del terreno antes de realizar el trabajo de campo, esto garantiza la eficiencia y facilita el trabajo de campo.
2. Se deben ubicar los vértices del levantamiento y los puntos de cambio en lugares estables que generalmente deben corresponder a obras civiles: andenes, carreteras, edificios, entre otros.
3. Es indispensable comenzar la nivelación en un punto BN también conocido como mojón y en lo posible la nivelación debe terminarse en otro punto de altura conocida o en el mismo punto, con el fin de controlar la precisión del trabajo de campo.

		<p>Nivel automático Análogo: Este nivel tiene una base nivelante en la cual se encuentran tres tornillos niveladores que centran manualmente una burbuja circular.</p> <p>Trípode: Es un trípode de tipo liviano que permite colocar el nivel. Nótese que se ubica en un lugar estable manteniendo un ángulo aproximado de 120° para garantizar la estabilidad</p>
		<p>Nótese en la fotografía, que una vez nivelado el instrumento se puede buscar la visual al Banco de Nivel BN de interés. Esto se logra con dos movimientos un movimiento horizontal manual buscando el objetivo y otro movimiento lento horizontal, con el tornillo.</p>

Figura 4.16. Trabajo de campo en Nivelación geométrica

	<p>Mira o estadal: Este tipo de mira graduable de precisión es de tipo liviana, se debe estabilizar con un nivel de mira de forma manual. En el momento de realizar la lectura, se deben leer los tres hilos: superior, medio e inferior.</p>
	<p>Una vez se tiene el objetivo o BN de interés, se realiza la medición de los hilos: superior, medio e inferior, lo que garantiza mayor precisión en los datos leídos. Esta medición se escribe en la cartera de campo.</p>

Figura 4.16. Trabajo de campo en Nivelación geométrica

4. Se debe definir si el trabajo de nivelación corresponde a un proyecto topográfico o geodésico, lo que implica tener en cuenta la tabla 4.4, de precisiones en los levantamientos de nivelación.
5. Se deben escribir en las carteras de campo todas las observaciones indispensables: como las condiciones climáticas, el equipo utilizado, la fecha y la hora.
6. Un nivel debe armarse para una altura que garantice condiciones ergonómicas al operario
7. Se debe tener especial cuidado en el traslado del nivel, por ningún motivo debe moverse con el trípode y el nivel atornillados, porque se corre el riesgo de dañar el equipo.

4.11.2. Precisión en la toma de datos

Una vez terminado el levantamiento es necesario calcular el error de cierre altimétrico y verificar que cumpla con el orden del levantamiento realizado. El levantamiento del ejemplo dado es de tercer orden de modo tal que su error permitido en centímetros es de $1.2\sqrt{k}$ donde k es la distancia nivelada en kilómetros.

Punto	V. Atrás (V+)		V. Inter (V-)		V. Adelante (V-)		HI	Cota por HI	Sube	Baja	Cota por S/B	Descripción
1	S	1.942	S		S		-3.175	-4.46			-4.46	SIRGAS
	M	1.285	M		M							
	I	0.625	I		I							
9	S	1.778	S		S	1.685	-2.881	-4.55		-0.090	-4.55	Punto traslado
	M	1.669	M		M	1.375						
	I	1.56	I		I	1.068						
23	S	1.442	S		S	2.06	-3.358	-4.641		-0.091	-4.641	Punto traslado
	M	1.283	M		M	1.76						
	I	1.125	I		I	1.46						
33	S	2.08	S		S	1.575	-3.07	-4.685		-0.044	-4.685	Punto traslado
	M	1.615	M		M	1.327						
	I	1.151	I		I	1.08						
46	S	1.485	S		S	1.79	-3.196	-4.458	0.227		-4.458	Punto traslado
	M	1.262	M		M	1.388						
	I	1.04	I		I	0.986						
1	S		S		S	1.865		-4.469		-0.011	-4.469	SIRGAS
	M		M		M	1.273						
	I		I		I	0.681						
	Σ Vista Atrás	7.114			Σ Vista Adelante	7.123						

Tabla 4.6. Cartera de nivelación geométrica por HI y Subes y Bajas

En la Tabla 4.6 se indica la nivelación de algunos puntos que no incluye puntos intermedios, y se realiza por el procedimiento explicado en la sección 4.6.1, conocido como la técnica de alturas instrumentales *HI*. Con la información de las vistas atrás y adelante se calculan las alturas de los puntos. Además se utiliza la técnica de diferencias de nivel o subes y bajas.

Se determina la distancia nivelada (k) y el error que será compensado en las estaciones, cuya cota es calculada por HI y subes y bajas. Cuando $V^+ - V^- \geq 0$ se tiene un *sube* y cuando $V^+ - V^- \leq 0$ se tiene un *baja*.

Aunque se deben realizar las lecturas de los hilos superior, medio e inferior, para los cálculos sólo se utiliza la lectura del hilo medio, porque es la que corresponde al plano horizontal del nivelación. Los demás datos se miden para controlar el valor obtenido, por ejemplo. Para el *punto 1*, la vista atrás V^+ calculada y obtenida para el hilo medio es:

$$M_{\text{calculado}} = \frac{S + I}{2} = \frac{1.942 + 0.625}{2} = 1.2835 \quad [4.24]$$

Mientras que $M_{\text{campo}} = 1.285$, según la precisión definida el valor M , de la V^+ , se aceptó como un buen dato. De la misma manera se controlan los demás puntos.

Obtener las cotas es sencillo, por ejemplo considérese el *punto 9* de la cartera de campo, mostrada en la tabla 4.6.

Para obtener la cota del *punto 9*, por el *Método de Altura instrumental HI*, se realiza el siguiente procedimiento:

Como $H_1 = -4.46$

$$HI_1 = H_1 + V^+ = -4.46 + 1.285 - 1.375 = -3.175 \quad (\text{altura instrumental de } I)$$

$$H_9 = HI_1 - V^- = -3.175 - 1.375 = -4.55 \quad (\text{cota de punto } 9)$$

Para obtener la cota del *punto 9*, por el *Método Subes y Bajos S/B*, se realiza el siguiente procedimiento:

Como $H_1 = -4.46$

$$\text{Como } V^+ - V^- = 1.285 - 1.375 = 0.090 \quad (\text{es un baja porque } V^+ - V^- \leq 0)$$

$$H_9 = H_1 + \text{baja} = -4.46 - 1.375 = -4.55 \quad (\text{cota de punto } 9)$$

Los demás puntos se calculan de la misma forma, sin embargo, previo a cualquier cálculo es necesario verificar las siguientes operaciones aritméticas.

a) Chequeo de la cartera:

$$\sum \text{vista atras} - \sum \text{vista adelante} = \text{cota final} - \text{cota inicial} \quad [4.25]$$

$$7.114 - 7.123 = -4.469 - (-4.46)$$

$$-0.009 = -0.009$$

b) Distancia nivelada k ,

Para esto se deben sumar las visuales de cada estación al punto de traslado D , las cuales en metros se calculan de la siguiente manera:

$$D = [\text{Hilo Superior(S)} - \text{Hilo inferior(I)}] * 100 \quad [4.26]$$

De este modo, la distancia total nivelada sería:

$$k = 692.6 \text{ m} = 0.6926 \text{ Km}$$

c) El error permitido para esta nivelación es:

$$\text{Error Máximo Permitido} = 1.2\sqrt{0.6926}$$

$$\text{Error Máximo Permitido} = 0.9986 \text{ cm}$$

Dado que la nivelación se cerró con el mismo punto de arranque el error encontrado es de -0.009 m (cota final – cota inicial), valor que se encuentra dentro del intervalo permitido para el orden de la nivelación.

d) Compensación del error

La compensación del error se puede hacer proporcional a los desniveles, a las distancias de las visuales o por partes iguales en todos los tramos. Ya que el desnivel no es significativo la compensación se hará proporcional a las longitudes de los tramos de la siguiente manera:

$$C = \frac{-e * D}{\sum D} \quad [4.27]$$

Donde e es el error, D es la longitud del tramo al que se le va a aplicar la compensación y $\sum D$ es la distancia nivelada. Teniendo en cuenta que las unidades de todos los datos deben estar en metros, los valores a tener en cuenta son: $e = 0.009986$ m, $\sum D = 692.6$ m y para el cálculo de la distancia D se tienen en cuenta los hilos superior e inferior dados en la tabla 4.6, utilizando la formula [4.25].

Aplicando esta compensación en las lecturas del hilo medio el resultado compensado es el mostrado en la tabla 4.7.

Punto	V. Atrás (V+)	V. Adelante (V-)	Compens.	V. Atrás_c (Vc+)	V. Adel_c (Vc-)	HI	Cota	Descripción
1	1.285		-0.0017	1.287		-3.173	-4.460	SIRGAS
		1.375	-0.0008		1.374		-4.547	Traslado
9	1.669		-0.0003	1.669		-2.878		
		1.76	-0.0008		1.759		-4.637	Traslado
23	1.283		-0.0004	1.283		-3.354		
		1.327	-0.0006		1.326		-4.680	Traslado
33	1.615		-0.0012	1.616		-3.064		
		1.388	-0.0010		1.387		-4.451	Traslado
46	1.262		-0.0006	1.262		-3.189		
1		1.273	-0.0015		1.271		-4.460	SIRGAS

Tabla 4.7. Cartera de nivel indicando la compensación del error en los puntos de cambio

Nótese que la compensación se aplicó de la siguiente manera:

$$V.Atrás_c = V. Atrás - Compensación$$

$$V.Adelante_c = V. Adel + Compensación$$

En este caso se aplico en las vistas, sin embargo, también se puede aplicar directamente en la cota teniendo en cuenta la distancia de las dos visuales a cada punto de traslado como se muestra en la figura 4.17.

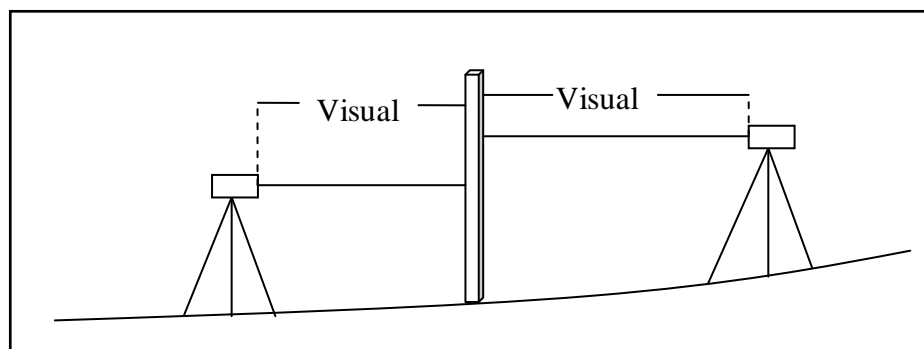


Figura 4.17. Detalle de las visuales a tener en cuenta para la aplicación de la compensación en la cota

4.12. Trabajo de campo con Estación Total

4.12.1. Diseño del ejercicio de aplicación

El levantamiento topográfico corresponde a una poligonal (ver plano final del capítulo 5) en el que la línea base de la estación de arranque y de la estación de llegada corresponden a vértices geodésicos. Este es el segundo ejercicio de aplicación del trabajo de campo realizado, del cual se muestran las fotografías en la figura 4.18.

4.12.2. Cálculos de los datos

Teniendo en cuenta que la Estación Total requiere valores de coordenadas planas de los puntos observados en campo, los errores de cierre en las *Coordenadas Este y Norte* corresponden a la relación entre las coordenadas calculadas de la estación de cierre y las coordenadas conocidas, de acuerdo a la siguiente relación matemática.

$$\text{Error Cierre Este} = \text{Este (calculado)} - \text{Este (conocido)} \quad [4.28]$$

$$\text{Error Cierre Norte} = \text{Norte (calculado)} - \text{Norte (conocido)}$$

	Punto	Norte	Este	Altitud
<i>Estación 1</i>	<i>CIOH001</i> <i>Inicial</i>	1148704.67	441538.669	-4.6355
<i>Estación 1</i>	<i>CIOH001</i> <i>Final</i>	1148704.66	441538.61	-4.62
Final - inicial	Δ	-0.01	-0.059	0.0155
<i>Estación 2</i>	<i>LEVT</i> <i>Inicial</i>	1148736.981	441593.913	-4.6854
<i>Estación 2</i>	<i>LEVT</i> <i>Final</i>	1148737.02	441593.9	-4.69
Final - inicial	Δ	0.039	-0.013	-0.0046
<i>Estación 3</i>	<i>CIOH001</i> <i>Inicial</i>	1148704.67	441538.669	-4.6355
<i>Estación 3</i>	<i>CIOH001</i> <i>Final</i>	1148704.69	441538.62	-4.76
Final - inicial	Δ	0.02	-0.049	-0.1245

Tabla 4.8. Error de cierre en coordenadas planas para cada estación.

En la Tabla 4.8 se indican las lecturas iniciales y finales de cada estación junto con el correspondiente error de cierre (Δ), restando el error de cierre de las coordenadas planas obtenidas inicialmente, se consiguen las coordenadas corregidas indicadas en la Tabla 4.9. Esta tabla tiene los puntos de control, algunos de los cuales son comunes con otros levantamientos, es decir nivelación geométrica y nivelación GPS. Las coordenadas geodésicas mostradas en la tabla se calcularon a partir de las coordenadas cartesianas corregidas, utilizando una transformación con el *Software Geocalc*.

Punto	Coordenadas Planas UTM		Coordenadas Planas Corregidas UTM		Coordenadas Geodésicas WGS84				Descripción
	Norte	Este	Norte	Este	Latitud	Longitud	Altura	Altura Corregida	
LEVT	1148736.981	441593.913			10 ° 23 ' 29.05171 "	-75 ° 32 ' 0.84387 "	-4.6854		ESTACION 1
CIOH001	1148704.67	441538.669			10 ° 23 ' 27.99668 "	-75 ° 32 ' 2.65888 "	-4.6355		CIOH001
32	1148720.58	441595.79	1148720.59	441595.849	10 ° 23 ' 28.52 "	-75 ° 32 ' 0.78 "	-4.83	-4.8455	
35	1148720.43	441565.05	1148720.44	441565.109	10 ° 23 ' 28.51 "	-75 ° 32 ' 1.79 "	-4.67	-4.6855	Esquina terraza
34	1148714.56	441580.12	1148714.57	441580.179	10 ° 23 ' 28.32 "	-75 ° 32 ' 1.29 "	-4.84	-4.8555	Esquina Bandera
27	1148678.26	441605.71	1148678.27	441605.769	10 ° 23 ' 27.14 "	-75 ° 32 ' 0.45 "	-4.65	-4.6655	
29	1148691.91	441620.41	1148691.92	441620.469	10 ° 23 ' 27.59 "	-75 ° 31 ' 59.97 "	-3.96	-3.9755	
30	1148696.7	441627.35	1148696.71	441627.409	10 ° 23 ' 27.74 "	-75 ° 31 ' 59.74 "	-4.53	-4.5455	
8	1148697.02	441650.83	1148697.03	441650.889	10 ° 23 ' 27.75 "	-75 ° 31 ' 58.97 "	-4.5	-4.5155	
LEVI	1148736.981	441593.913			10 ° 23 ' 29.05171 "	-75 ° 32 ' 0.84387 "	-4.6854		
CIOH1	1148704.67	441538.669			10 ° 23 ' 27.99668 "	-75 ° 32 ' 2.65888 "	-4.6355		Estación 2
24	1148671.55	441586.83	1148671.511	441586.843	10 ° 23 ' 26.92 "	-75 ° 32 ' 1.07 "	-4.46	-4.4554	Ed CIOH Esquina Jardín
22	1148636.23	441583.25	1148636.191	441583.263	10 ° 23 ' 25.77 "	-75 ° 32 ' 1.19 "	-4.69	-4.6854	Lámpara Garita
LAMP	1148636.263	441583.213			10 ° 23 ' 25.7719 "	-75 ° 32 ' 1.19022 "	-4.6631		Estación 3
CIOH1	1148704.67	441538.669			10 ° 23 ' 27.99668 "	-75 ° 32 ' 2.65888 "	-4.6355		CIOH001
2	1148637.29	441651.89	1148637.27	441651.939	10 ° 23 ' 25.81 "	-75 ° 31 ' 58.93 "	-4.57	-4.4455	Sardinell
13	1148601.91	441627.17	1148601.89	441627.219	10 ° 23 ' 24.66 "	-75 ° 31 ' 59.74 "	-4.81	-4.6855	Punta Muelle Solido

Tabla 4.9. Cartera del levantamiento con estación total.



Retro reflector triple: Corresponde a un receptor de tres prismas tienen una altísima precisión, permiten calcular automáticamente las componentes horizontal y vertical del punto de adquisición.

Estación total: Nótese que son diferenciables la pantalla de cristal líquido (LCD) con su teclado de control, telescopio, cabeza, distanciómetro y ocular del colimador.

Figura 4.18. Trabajo de campo con la Estación Total

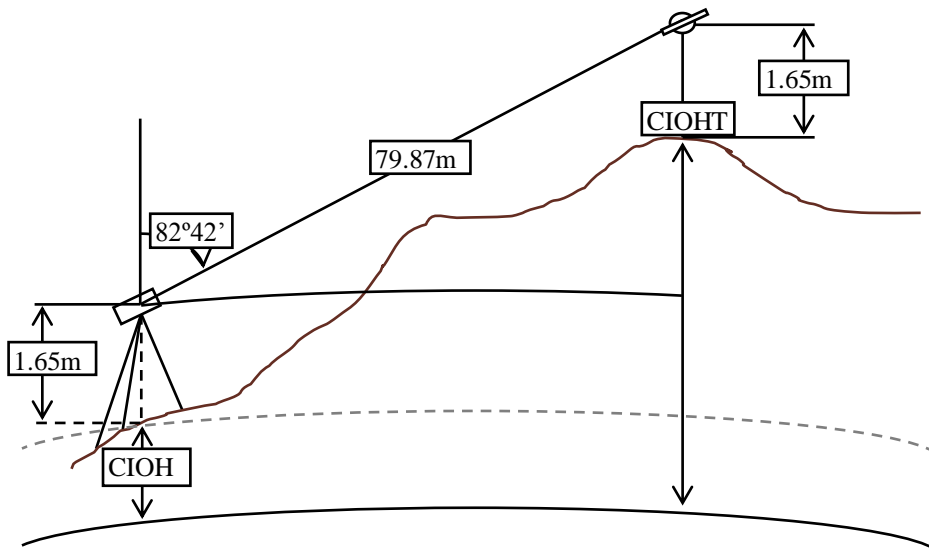
4.13. Ejercicios

- a. Complete el ejercicio de nivelación de la siguiente tabla.

Punto	V. Atrás (V+)		V. Inter (V-)		V. Adel (V-)		HI	Cota por HI	Sube	Baja	Cota por S/B
SIRGAS	M	1.287	M		M		- 3.173	-4.460			
1	M		M	1.245	M						
2	M	1.669	M		M	1.374	- 2.878				
3	M		M	1.648	M						
4	M		M	1.508	M						
5	M		M	1.787	M						
6	M		M	1.804	M						
7	M		M	1.826	M						
8	M	1.283	M		M	1.759	- 3.354				
9	M		M		M			-4.443			

Punto	V. Atrás (V+)		V. Inter(V-)		V. Adel (V-)		HI	Cota por HI	Sube	Baja	Cota por S/B
10	M		M		M			-4.662			
11	M		M		M			-3.963			
LEVT	M		M		M	1.326		-4.680			
12	M		M	1.491	M			-4.845			
13	M	1.616	M		M			-4.680			
14	M		M	1.600	M			-4.664			
15	M		M	1.605	M			-4.669			
16	M	1.262	M		M	1.387	3.189	-4.451			
SIRGAS	M		M		M	1.271					

- b. Realice el cheque de la cartera y la compensación de los puntos obtenidos
- c. Determine la altura del punto CIOHT teniendo en cuenta los datos proporcionados en el gráfico y que la altura del punto CIOH1 es -4.63m.



Capitulo 5. Geodesia Satelital

5.1. Estructura y organización de la Geodesia en el Mundo

El máximo organismo para las Ciencias Exactas es el *Consejo Internacional para la Ciencia* (*International Council for Science* en inglés, ICSU), conocida hasta 1988 como Consejo Internacional de Científicos Unidos, fue fundado en 1931 como una organización internacional no gubernamental abocada a la cooperación internacional para el avance de la ciencia.

El ICSU representa la sucesión de la Asociación Internacional de Academias (*International Association of Academies* IAA, 1899-1914) y el Consejo Internacional de Investigaciones (*International Research Council* IR, 1919-1931). Sus integrantes (ver figura 5.1), son 82 cuerpos científicos nacionales y 29 uniones científicas internacionales, de las cuales las más relacionadas con las ciencias de la tierra son: *Unión Astronómica Internacional* (IAU), *Unión Matemática Internacional* (IMU), *Unión Astronómica Internacional* de Geodesia (UIGG), *Unión Internacional de Ciencias Geológicas* (IUGS) y *Unión Internacional de Química Pura y Aplicada* (IUPAC).

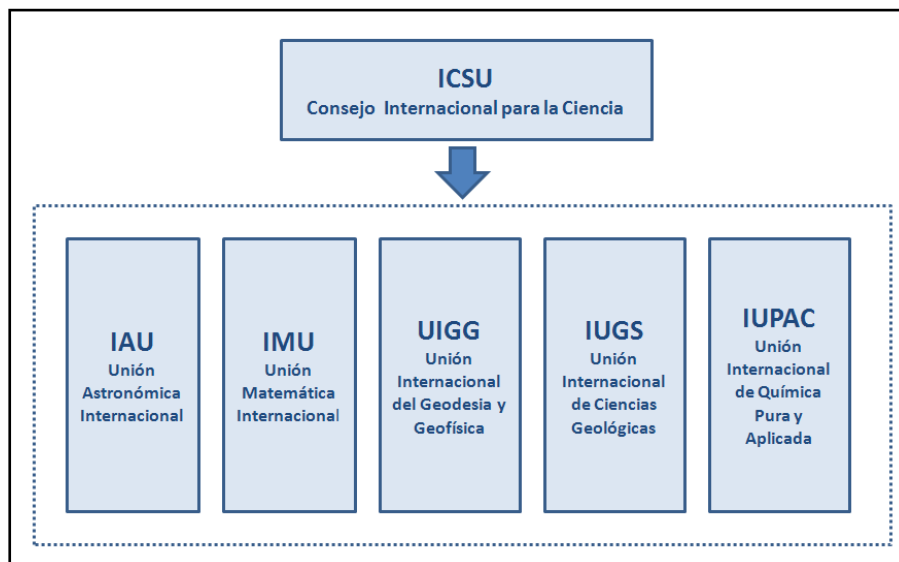


Figura 5.1. Consejo Internacional para la Ciencia

Su misión es *identificar y dirigir temas de importancia para la ciencia y la sociedad, garantizando los recursos para promover la participación de todos los científicos, sin distinción de raza, ciudadanía, lenguaje, tendencia política o género, en un único esfuerzo científico internacional, para facilitar la interacción entre distintas disciplinas y entre científicos de países "en desarrollo" con países "desarrollados"*.

Para los propósitos de estudio de este manual, se enfatiza en La *Unión Internacional de Geodesia y Geofísica* (UIGG - *International Union of Geodesy and Geophysics*), que es la organización dedicada a fomentar, promover y divulgar el conocimiento del sistema de la Tierra, su medio ambiente espacial y la dinámica de los procesos que causan el cambio. Su propósito es garantizar que los datos, información y conocimientos adquiridos sean disponibles para el beneficio de la sociedad mediante el uso responsable de los recursos naturales, la gestión sostenible del medio ambiente, reducción del impacto de los riesgos naturales y conocimiento de la dinámica natural de la Tierra. En la tabla 5.1 se mencionan las diferentes asociaciones que integra la IUGG, que buscan fomentar la investigación científica de las ciencias de la Tierra y especialmente sus aspectos interdisciplinarios.

5.2. Sistemas de Referencia y Marcos de Referencia

Un sistema de referencia corresponde al conjunto de parámetros de un sistema coordinado, que describen completamente un modelo físico que permiten la identificación de la forma, dimensión y geometría de la superficie de la Tierra, así como la determinación de la posición y el movimiento de un objeto sobre el espacio y el tiempo. Es decir un *sistema de referencia*, corresponde a un modelo, una idea o abstracción de elementos matemáticos, que son materializados a través de los *marcos de referencia* que corresponden a las medidas obtenidas mediante los conceptos previamente definidos.

Si el origen de coordenadas (x, y, z) de un sistema de referencia coincide con el centro de masas terrestre, se define como *Sistema Geocéntrico de Referencia*, sí hay un desplazamiento del origen con respecto al centro de masas, debido a las características del lugar, el dátum utilizado y las observaciones realizadas, se define el *Sistema Geodésico Local*.

SIGLA	ASOCIACIÓN INTERNACIONAL	MISIÓN DE INVESTIGACIÓN
IACS	<p><i>International Association of Cryospheric Sciences</i></p> <p><i>Asociación Internacional de Criosfera</i></p>	<p><i>Fomentar la realización de estudios de todos los aspectos y procesos relacionados con Criosfera de la Tierra y del Sistema Solar. La criosfera incluye partes del sistema de la Tierra en donde el agua se encuentra en forma congelada (sólida). Esto incluye: nieve, hielo marino, los icebergs, placas de hielo, glaciares y bloques de hielo. Aproximadamente, tres cuartos del agua dulce del mundo está contenida en la criosfera.</i></p> <p><i>Algunas partes de la criosfera como la nieve y el hielo en los lagos a latitud mediana, sólo están presentes durante los meses de invierno. Otras partes de la criosfera como los glaciares y cascos de hielo, se mantienen congelados durante todo el año y de hecho, pueden permanecer así durante miles e inclusive cientos de años. Algunas de las placas de hielo que cubren la mayoría del continente de la Antártida han permanecido así durante aproximadamente, millones de años.</i></p>
IAG	<p><i>International Association of Geodesy</i></p> <p><i>Asociación Internacional de Geodesia</i></p>	<p><i>Estudiar todos los problemas relacionados con la observación geodésica de la Tierra y el cambio global. Esto comprende el establecimiento de sistemas de referencia, el monitoreo del campo de gravedad y la rotación de la Tierra, la deformación de la superficie de la Tierra de los océanos y el hielo, y el posicionamiento para el uso interdisciplinario. La estructura incluye los siguientes componentes: Marcos de Referencia, campo de gravedad, Rotación de la Tierra y Geodinámica, Posicionamiento y Aplicaciones Comité Interamericano de la comisión sobre la Teoría Sistema Geodésico Mundial de Observación (GGOS), Internacional de Servicios Científicos.</i></p>
IAGA	<p><i>International Association of Geomagnetism and Aeronomy</i></p> <p><i>Asociación Internacional de Geomagnetismo y Aeronomía</i></p>	<p><i>Investigar el magnetismo y Aeronomía de la Tierra y del sistema solar y su interacción con otros organismos. Sus aéreas de interés son: Campo Magnético de la tierra, Fenómenos Aeronómicos, Fenómenos de la magnetosfera, Viento solar y campo interplanetario, Observatorios geomagnéticos, Servicio Internacional de Índices geomagnéticos.</i></p> <p><i>La Aeronomía es la rama de la Geofísica, que estudia la física y la química de la atmósfera media y superior, es decir la mesósfera, la termósfera y la exosfera. El interés por la ionósfera actualmente es corregir las comunicaciones satelitales y mejorar la calidad del posicionamiento que se obtiene a partir del sistema GPS. Además sigue siendo importante continuar el monitoreo de la ionósfera para estudios de Geomagnetismo y los procesos solares y terrestres.</i></p>
IAVCEI	<p><i>Association of Volcanology and Chemistry of the Earth's Interior</i></p> <p><i>Asociación de Vulcanología y Química del interior de la Tierra</i></p>	<p><i>Mitigar los desastres volcánicos mediante la investigación disciplinas estrechamente relacionadas tales como petrología ígnea y geoquímica, geocronología de depósitos minerales y física de la generación y ascenso de magmas en la parte superior del manto y corteza.</i></p>

Tabla 5.1. Tomado y Modificado de Asociación Internacional de Geodesia y Geofísica. Fuente <http://www.iugg.org/>

SIGLA	ASOCIACIÓN INTERNACIONAL	MISIÓN DE INVESTIGACIÓN
IAHS	<p><i>International Association of Hydrological Sciences</i></p> <p><i>Asociación Internacional de Ciencias Hidrológicas</i></p>	<p><i>Estudiar sobre todos los aspectos de la hidrología con el apoyo científico de la comunidad académica internacional. AICH mantiene fuertes conexiones con el Programa Hidrológico Internacional de la UNESCO y con la Hidrología y Recursos Hídricos del Programa de la Organización Meteorológica Mundial (OMM).</i></p> <p><i>Son aéreas de interés en el estudio de la hidrología: Aguas superficiales (CIBS), Aguas subterráneas (ICGW), La erosión continental (ICCE), Hielo y Nieve (ICSIH) Calidad del Agua (ICWQ), Sistemas de Recursos Hídricos (ICWRS) Teleobservación (ICRS), Atmósfera - Suelo - Vegetación Relaciones (ICASVR), Marcadores (TIC).</i></p>
IAMAS	<p><i>International Association of Meteorology and Atmospheric Sciences</i></p> <p><i>Asociación Internacional de Ciencias Atmosféricas y Meteorológicas</i></p>	<p><i>Promover la investigación en todas las ciencias de la atmósfera; tiene alianzas internacionales con la Organización Meteorológica Mundial (OMM), la Corporación Universitaria de Investigación Atmosféricas de los Estados Unidos (UCAR). Sus áreas de interés son: Química atmosférica y la contaminación global (ICACGP), Electricidad Atmosférica (CIEA), Clima (ICCL), Nubes y precipitación (CIPC), Meteorología Dinámica (ICDM), Meteorología del Medio Ambiente (ICMMA), Atmósferas planetarias y su Evolución (ICPAE), Meteorología polar (CIMF), Ozono (CIO), Radiación (IRC).</i></p>
IAPSO	<p><i>International Association for the Physical Sciences of the Oceans</i></p> <p><i>Asociación Internacional de Ciencias Físicas del Océano</i></p>	<p><i>Promover el estudio de las ciencias físicas de los océanos y las interacciones que tienen lugar en el fondo del mar, las costas y fronteras. Proporciona servicios básicos como el Servicio Permanente del Nivel Medio del Mar y la Oficina de Servicio Estándar de agua de mar. La Oficina colabora estrechamente con la UNESCO, la Comisión Oceanográfica Intergubernamental (COI) y el CIUC del Comité Científico de Investigaciones Oceánicas (SCOR).</i></p>
IASPEI	<p><i>International Association of Seismology and Physics of the Earth's Interior</i></p> <p><i>Asociación Internacional de Sismología y Física del Interior de la Tierra</i></p>	<p><i>Promover el estudio de los terremotos y sus fuentes sísmicas, propagación de las ondas sísmicas, la estructura interna de la Tierra, propiedades y procesos. Son áreas de interés: Física y Química de los materiales de la Tierra, Estructura de la Tierra y Geodinámica Fuentes terremoto - Predicción y Modelado Tectonofísico, Riesgos de sismos movimiento de las plataformas oceánica y continental, Observación Sismológica e Interpretación de flujos.</i></p>

Tabla 5.1. Tomado y Modificado de Asociación Internacional de Geodesia y Geofísica. Fuente <http://www.iugg.org/>

Como se mencionó en el capítulo 1, las coordenadas ortogonales (x, y, z) se asocian con las coordenadas elipsoidales o curvilíneas (φ, λ y h) que representan geométricamente el sistema tierra, ya sea mediante *Sistemas Geocéntricos de Referencia como WGS84 y GRS80* o por el Sistema Geodésico Local, dátum Bogotá ya definidos.

Para representar un punto de interés de la superficie de la tierra, además de los sistemas de referencia geocéntricos y geodésico local, también existen otras coordenadas que ya fueron mencionadas:

1. Coordenadas Cartesianas Nortes y Estes, que a nivel nacional utiliza según los requerimientos algunas de las siguientes proyecciones: Gauss Krüger, y/o Mercator y/o UTM.
2. Coordenadas Cartesianas Locales, definidas por el IGAC para las zonas urbanas del país, ambos sistemas de coordenadas pueden ser representadas en Dátum Bogotá o en Dátum WGS84.

5.2.1. Servicio Internacional de Rotación Terrestre (IERS)

Es importante mencionar que los sistemas de referencia actualmente se encuentran definidos dentro del *Servicio Internacional de Rotación Terrestre (IERS)*, que será definido en la tabla 5.2 junto con los sistemas de referencia y marcos de referencias celestes y terrestres y cuya estructura organizacional es mostrada en la figura 5.2.

En el caso de los sistemas celestes existen: *El Sistema de Referencia Internacional Celeste (ICRS)*, que se materializa mediante *El Marco de Referencia Internacional Celeste (ICRF)*; por su parte dentro de los sistemas terrestres se encuentran: *El Sistema de Referencia Internacional Terrestre (ITRS)* y *El Marco de Referencia Internacional Terrestre (ITRF)*, este último se densifica para el continente por *SIRGAS*, *El Sistema de Referencia Geocéntrico para las Américas SIRGAS* y en el caso colombiano por *MAGNA*, *Marco Geocéntrico Nacional de Referencia*.

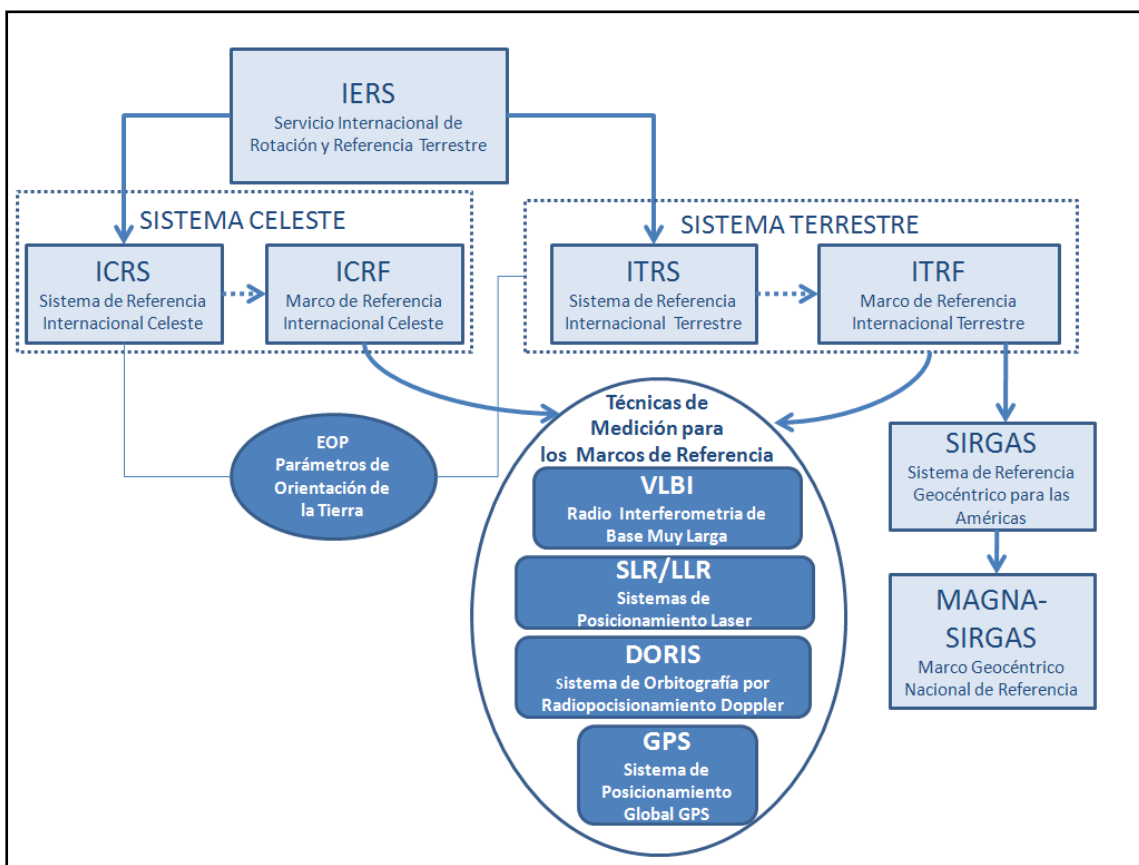


Figura 5.2. Estructura de los Sistemas y Marcos de Referencia a nivel Internacional y local

Servicio	Objetivos y Misión
<p>IERS</p> <p><i>International Earth Rotation and Reference System Service</i></p> <p><i>Servicio Internacional de Rotación de la Tierra y Sistemas de Referencia</i></p>	<p><i>El IERS se estableció como el Servicio Internacional de Rotación de la Tierra en 1987 por la Unión Astronómica Internacional y la Unión Internacional de Geodesia y Geofísica y comenzó a funcionar el 1 de enero de 1988. IERS tiene como responsabilidad mantener y proporcionar los sistemas convencionales de Referencia a través de la cooperación internacional liderada por la Asociación Internacional de Geodesia (AIG).</i></p> <p><i>IERS, proporciona los siguientes servicios para la comunidad de astrónomos, geodestas y geofísicos:</i></p> <ol style="list-style-type: none"> <i>1. Mantiene, proporciona y actualiza el Sistema de Referencia Internacional Celeste (ICRS) y su realización, a través del Marco de Referencia Internacional Celestes (ICRF).</i> <i>2. Mantiene, proporciona y actualiza el Sistema Internacional de Referencia Terrestre (ITRS) y su realización, a través del Marco de Referencia Terrestre Internacional (ITRF).</i> <i>3. Define de forma precisa y periódica los parámetros de orientación terrestre (EOP) de la tierra a través de la conexión entre ICRF y el ITRF.</i> <i>4. Interpretar datos geofísicos de tiempo y espacio de las variaciones en la ICRF, ITRF así como los parámetros de orientación o de la tierra, y el modelo asociado.</i>
<p>ICRS</p> <p><i>Sistema de Referencia Internacional celestes</i></p> <p><i>International Celestial Reference System</i></p>	<p><i>El ICRS, es un sistema convencional de referencia definido por IERS y cumple los requerimientos de la IAU. Es un Sistema de Referencia por lo que debe definir el conjunto de conceptos y convenciones necesarios de la triada de ejes en cualquier momento.</i></p> <p><i>Su origen se encuentra en el baricentro del sistema solar a través de la modelización de observaciones VLBI en el marco de la Relatividad General. ICRS se basa en una colección de direcciones a objetos extragalácticos con coordenadas ecuatoriales para la época juliana J2000 (corresponde a las 12h del tiempo terrestre (TT) del primero de enero del año 2000) establecidas por observaciones VLBI; ésta técnica de observación emplea varios radiotelescopios ubicados a varios kilómetros de distancia para determinar la ubicación de un mismo punto u objeto. La colección de direcciones no es variable, es decir, no cambian con el tiempo y permanecen fijas en el espacio. El ICRS es accesible por medio de coordenadas de referencia de fuentes radio extragalácticas del Marco de Referencia Internacional celestes (ICRF). El ICRS esta relacionado con Sistema Internacional de Referencia Terrestre (ITRF) por el uso de los Parámetros de Orientación de la Tierra (EOP).</i></p>
<p>ICRF</p> <p><i>Marco de Referencia Internacional celestes</i></p> <p><i>International Celestial Frame System</i></p>	<p><i>ICRF determina las coordenadas precisas del ICRS, es decir determina con altísima precisión las coordenadas ecuatoriales de 608 fuentes de radio extragalácticas (VLBI) que fueron seleccionadas del catálogo Hipparcos que incluye todas las estrellas.</i></p> <p><i>A partir del ICRS y ICRF se determina la orientación del eje de rotación terrestre en el espacio, cuyos parámetros son básicos para definir el sistema de referencia terrestre ITRS y los parámetros de orientación terrestre EOP.</i></p>

Tabla 5.2 Sistemas de Referencia y Marcos de referencia.

Tomada y adaptada de: <http://www.iers.org/>, <http://www.sirgas.org/> y <http://www.igac.gov.co/>

Servicio	Objetivos y Misión
<p>ITRS</p> <p>Sistema de referencia Internacional Terrestre International Terrestrial Reference System</p>	<p><i>ITRS es un de un Sistema de Referencia Terrestre Convencional (CTRS) y constituye un modelo que define el origen, la escala, la orientación y la evolución temporal, así:</i></p> <p><i>Origen: El centro de masa se define para toda la tierra, incluso de los océanos y la atmósfera.</i></p> <p><i>Escala: La unidad de longitud es el metro (SI).</i></p> <p><i>Orientación: Al principio dado por la orientación en BIH 1984,0</i></p> <p><i>Tiempo evolución: La evolución temporal de la orientación está asegurada por medio de una-red-de rotación con respecto a la condición tectónica movimientos horizontales sobre toda la tierra.</i></p> <p><i>El ITRS se puede conectar a la Internacional de Sistema de Referencia Celeste (ICRS) por el uso de los Parámetros de Orientación de la Tierra IERS (EOP).</i></p>
<p>ITRF</p> <p>Marco de referencia Internacional Terrestre</p> <p>International Terrestrial System Frame</p>	<p><i>Corresponde a la materialización de ITRS, y corresponde a un conjunto de puntos en tres coordenadas geocéntricas (x, y, z) y las velocidades (Vx, Vy, Vz) del conjunto de estaciones observadas por VLBI, LLR, GPS, SLR y DORIS.</i></p> <p><i>Son versiones del ITRF: ITRF89, ITRF90, ITRF91, ITRF92, ITRF93, ITRF94, ITRF95, ITRF96, ITRF97, ITRF2000, ITRF2005</i></p>
<p>SIRGAS</p> <p>Sistema de Referencia Geocéntrico para las Américas</p>	<p><i>SIRGAS fue definido en correspondencia con IERS, mediante ITRS y materializado por ITRF, se ocupa de la definición y realización de un sistema vertical de referencia basado en alturas elipsoidales como componente geométrica y en números geopotenciales (referidos a un valor W_0 global convencional) como componente física.</i></p> <p><i>El nombre inicial de SIRGAS (Sistema de Referencia Geocéntrico para América del Sur) fue cambiado en febrero de 2001 a Sistema de Referencia Geocéntrico para las Américas, dada la extensión del marco de referencia (SIRGAS2000) y la recomendación de la Organización de las Naciones Unidas en su Séptima Conferencia Cartográfica de las Américas (Nueva York, enero 22 al 26 de 2001) sobre la adopción de SIRGAS como sistema de referencia oficial en todos los países de las Américas.</i></p> <p><i>SIRGAS es la base para el desarrollo de proyectos comprometidos con la generación y utilización de información georreferenciada en la región, tanto a nivel nacional como internacional. Además de proveer las coordenadas de referencia para aplicaciones prácticas como proyectos de ingeniería, administración digital de información geográfica, infraestructuras de datos espaciales. SIRGAS es la plataforma para una variedad amplia de aplicaciones científicas como observación de deformaciones de la corteza terrestre, movimientos verticales, variación del nivel del mar y estudios atmosféricos.</i></p>
<p>MAGNA</p> <p>Marco Geocéntrico Nacional de Referencia</p>	<p><i>MAGNA, es la densificación SIRGAS, es decir del ITRF, fue definido por el Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC) y se llama comúnmente MAGNA-SIRGAS, se halla conformada por 60 estaciones GPS de cubrimiento nacional, 8 vértices de SIRGAS, 16 corresponde a la Red Geodinámica CASA (Central and South American Geodynamics Network). Su propósito es obtener posiciones geodésicas referidas al ITRF vigente y con los parámetros de WGS84 y GRS80.</i></p>

Tabla 5.2. Sistemas de Referencia y Marcos de referencia.

Tomada y adaptada de: <http://www.iers.org/> , <http://www.sirgas.org/> y <http://www.igac.gov.co/>

5.2.2. Técnicas de Medición y Posicionamiento de ICRF y ITRF

Como se mencionó en la tabla 5.2, la forma de medir *El Marco de Referencia Internacional Terrestre (ITRF)*, es mediante las técnicas *VLBI (Radio Interferometría de Base Muy Larga)*, *LLR (Láser Lunar)*, *LSR (Láser Satelital)*, *GPS (Sistemas de Posicionamiento Global)*, y *DORIS (Sistema de Orbitografía por Radioposicionamiento Doppler)*.

VLBI (Interferometría de Base muy larga)

La técnica de la interferometría de base muy larga (VLBI Very Long Baseline Radio Interferometry) consiste en la observación de un objeto celeste simultáneamente con un conjunto de radiotelescopios, que pueden estar situados en lugares muy distantes entre sí. Las señales de radio del objeto extragaláctico es recibida en instantes ligeramente diferentes en cada telescopio, según su posición sobre la Tierra. La creación de un patrón de interferencia (denominado franjas) permite a esta red de telescopios comportarse como un único instrumento que tiene como tamaño equivalente las distancias entre los radiotelescopios participantes en la observación.

La técnica se practica al menos con dos radiotelescopios, los cuales se orientan hacia un objeto celeste, la señal recibida es referida a un patrón atómico local y registrada digitalmente en soporte magnético. Ambos registros se correlacionan, determinándose en cada momento el retardo entre la llegada del frente plano de la señal a un radiotelescopio y otro. Este retardo permite establecer la componente del vector que une ambas estaciones. Realizando múltiples determinaciones entre distintas estaciones fijas puede calcularse las posiciones absolutas y relativas de las estaciones con alta precisión. Cuando se incrementa la precisión del posicionamiento hasta márgenes de intervalo muy pequeño, los puntos de referencia en que se apoyan los diversos sistemas comienzan a presentar indeterminaciones. En este contexto se hace necesario un marco de referencia lo más lejano y estable posible, utilizándose entonces *cuásares*: astros muy lejanos que emiten energía radioeléctrica con intensidades superiores 100 veces a la propia de una galaxia media.

Lo que permite realizar determinaciones de rotación de la tierra y variaciones de las coordenadas terrestres y de objetos celestes, con una precisión estimada de alrededor de $\pm 0,2$ milésimas de segundo. El sistema VLBI utiliza la banda S, que va desde los 2 a los 4 gigahercios, y la X, entre los 8 y los 12 gigahercios.



Figura 5.3. Esquema del funcionamiento de VLBI
Tomada de: <http://www.iers.org/>

El IVS (International VLBI Service for Geodesy and Astrometry) Servicio Internacional VLBI para Geodesia y Astrometría, es una colaboración internacional de organizaciones que operan VLBI y prestan un servicio de apoyo a centros geodésicos, geofísicos, y astrométricos de investigación y ofrece datos y productos para la comunidad científica, de vital importancia para el ITRF, ICRF y EOP. En la figura 5.4, se muestra la distribución espacial de las estaciones VLBI, de las cuales la mayoría se encuentra en Norte América y Europa.

En la figura 5.5, se muestra una fotografía de la única antena ubicada en el polo norte por el Instituto Geodésico Autoridad Noruega de Cartografía, ubicada en el Observatorio de Geodesia Ny-Ålesund 78.9 N y 11.87 W, cuya longitud es de 20 m, la antena se destina para uso geodésico, y está diseñada para recibir información en las bandas S y X.



Figura 5.4. Estaciones VLBI Tomado de <http://ivscc.gsfc.nasa.gov/stations/ivsnetmap.gif>



Figura 5.5 Ejemplo de una antena VLBI <http://ivscc.gsfc.nasa.gov/publications/ar2003/nsnyal/>

ILRS

El Servicio Internacional de láser (ILRS) por satélite y láser de datos lunares y sus productos relacionados sirven de apoyo a la investigación geodésica y geofísica, liderada por IERS para el mantenimiento de un preciso marco de referencia terrestre internacional (ITRF). ILRS es un servicio espacial geodésico de la Asociación Internacional de Geodesia (IAG).

El ILRS adquiere información de Láser por Satélite (SLR) y Láser Lunar (LLR) la cual tiene una precisión suficiente para satisfacer los objetivos científicos e ingenieriles, teóricos y aplicados. La información suministrada por ILRS, se utiliza en:

- Parámetros de orientación de la Tierra (movimiento polar y duración del día).
- Coordenadas y velocidades de los sistemas de seguimiento ILRS.
- Variables en el tiempo de coordenadas geocéntricas estáticas y variables en el tiempo de los coeficientes de la gravedad de la Tierra sobre el terreno.
- Constantes físicas fundamentales de Efemérides lunares y Parámetros de orientación lunar.
- Soporte en la realización del marco de referencia terrestre internacional (ITRF).
- Vigilancia de las deformaciones en tres dimensiones de la Tierra sólida.
- Vigilancia de la rotación de la Tierra y el movimiento polar.
- Apoyar el seguimiento de las variaciones en la topografía y el volumen de líquido de la Tierra (la circulación de los océanos, el nivel medio del mar, la placa de hielo de espesor y altura del oleaje).

Este servicio también realiza observaciones astrométricas, incluida la determinación de la dinámica equinoccio, la oblicuidad de la eclíptica, la constante de precesión Gravitacional relativista general y estudios con el principio de equivalencia de Einstein.

SLR (Satellite Laser Ranging)

Este sistema se basa en la medición de la distancia existente entre una estación terrestre y un satélite en función del tiempo de tránsito de un haz láser. Los satélites utilizados son pasivos, y consisten en simples esferas recubiertas de prismas de reflexión total, aunque también existen satélites mixtos multifunción. Una estación se compone de: un potente láser pulsante, un reloj atómico, un contador, un detector de luz, la óptica necesaria, un centro de procesamiento de datos y la infraestructura mecánica correspondiente para el estacionamiento y la puntería.

Conocida la orientación y la posición aproximada de la estación, y dispuestas las efemérides del satélite a observar, el ordenador calcula los datos necesarios para el momento de disparo y apunta el sistema óptico que agrupa el láser emisor y el telescopio receptor, controlando así mismo el detector de luz para recibir el retorno del rayo. En el momento del disparo, el láser produce un pulso que es enviado al satélite, a la vez que se empieza a contar el tiempo con el reloj atómico. Al llegar el retorno se detiene la cuenta, y en función del tiempo de tránsito y de la velocidad de la luz, se calcula la distancia.

LLR (Lunar Laser Ranging)

LLR mide los tiempos de viaje de ida y vuelta, entre estaciones de impulsos de luz en la tierra y cuatro retroreflectores en la superficie de la Luna; se utiliza para determinar la oblicuidad de la eclíptica, la orientación de la estructura dinámica del Sistema Solar en el marco de referencia extragaláctico y a largo plazo la nutación y la precesión.

DORIS (Doppler Orbit determination and Radiopositioning Integrated on Satellite)

DORIS traducido al español es el Sistema de Orbitografía por Radioposicionamiento Doppler y corresponde a un sistema de doble frecuencia Doppler, que sirve para determinar la órbita exacta y precisa de ubicación de los satélites, desde la tierra, en el cual participan diversas misiones espaciales: Spot-2, -3, -4, -5, Topex / Poseidon, Jason, Envisat y CryoSat.

A diferencia de los otros tres sistemas del que se utilizan en IERS, DORIS se basa en un dispositivo de enlace ascendente, es decir tiene un receptor a bordo del satélite, mientras que los transmisores se encuentran en el terreno. Esto crea un sistema centralizado, en el que el conjunto completo de observaciones se descarga desde el satélite a la tierra. El sistema comenzó a funcionar en 1990, actualmente incluye 50 estaciones emisoras distribuidas uniformemente en la tierra, incluso hay estaciones en las principales placas tectónicas. Ver figura 5.6.



Figura 5.6 Estaciones DORIS. Tomadas de: <http://ids.cls.fr/>

Los resultados de posicionamiento obtenidos tienen una precisión de 1-2 cm, y el movimiento polar diario tiene una precisión de 1 a 2 milisegundos, de la misma forma el centro de masas de la tierra se calcula con una precisión de 1-2 cm.

DORIS está representado por el Servicio Internacional DORIS (IDS), que proporciona el apoyo a la comunidad de científicos en geodesia y geofísica y otros centros de investigación que lo requieran.

5.3. Sistema de Tiempo

El tiempo juega un rol muy importante en Geodesia, debido al hecho que la mayoría de los métodos de medición utilizan la señal de los tiempos de viaje de las ondas electromagnéticas para el posicionamiento y para el movimiento de satélites artificiales. El sistema de tiempo es requerido para describir el movimiento relativo de la tierra en el espacio inercial y para describir la deformación de la tierra debido a fuerzas externas, de ahí la necesidad de la definición de un buen sistema de tiempo.

5.3.1. Tiempo Atómico

Una escala de tiempo uniforme de alta precisión es realizada por el tiempo atómico internacional (TAI), que corresponde con la definición de un segundo, la cual no está sujeta a un fenómeno astronómico.

“Según la definición del Sistema Internacional de Unidades, un segundo es la duración de 9.192.631.770 oscilaciones de la radiación emitida en la transición entre los dos niveles hiperfinos del estado fundamental del isótopo 133 del átomo de cesio (^{133}Cs), a nivel del mar. Esto implica que se produzcan desfases entre el segundo como unidad de tiempo astronómico y el segundo medido a partir del tiempo atómico, más estable que la rotación de la Tierra.”

La escala de tiempo atómica TAI -Temps Atomique International, que coincide con el tiempo universal (Universal Time -UT) a la media noche del primero de enero de 1958- es medida por una serie de relojes atómicos (más de 200) mantenidos por 60 laboratorios alrededor del mundo, de diferentes agencias nacionales y custodiados por el Servicio Internacional de Rotación de la Tierra (IERS) y el Bureau International de Poids Measures (BIPM). El día de un TAI comprende 86400 segundos y tiene un siglo juliano de 36525 días de TAI.

La navegación, la aviación y el transporte actuales se rigen por el Tiempo Atómico. El Sistema de Posicionamiento Global - GPS (*Global Position System*) requiere la precisión y estabilidad de los relojes atómicos para localizar posiciones en la Tierra. Cada satélite GPS lleva cuatro relojes atómicos con los cuales puede apreciar pequeñísimas diferencias de tiempo en las señales emitidas, para poder ubicar la posición mediante triangulación.

Como el tiempo atómico es usado en el tiempo de la señal GPS. El tiempo GPST, trabaja al mismo ritmo del reloj atómico de la estación de control maestro de Colorado Springs. Si el GPST, no está incrementado, hay 19 segundos de diferencia entre TAI y GPST.

$$GPST = 19s + TAI \quad [5.1]$$

5.3.2. Tiempo dinámico

La variable independiente t , de las ecuaciones del movimiento del sistema solar obtenidas mediante la teoría general de la relatividad representa una escala de tiempo que depende del sistema de coordenadas de referencia. El movimiento de cuerpos celestes y satélites artificiales está descrito por una estricta escala de tiempo uniforme (tiempo inercial), que provee el tiempo dinámico, basado en los movimientos de los cuerpos.

Si se tiene un sistema de tiempo inercial, referido al baricentro del sistema solar, se define el Tiempo Dinámico Baricéntrico (Temps Dynamique Barycentrique, TDB); si se refiere al geocentro de la Tierra, se tiene El Tiempo Dinámico Terrestre (Terrestrial Dynamical Time, TDT). El TDT es prácticamente equivalente al TAI y se relación a través de la siguiente ecuación.

$$TDT = TAI + 32.184s \quad [5.2]$$

Teniendo en cuenta el movimiento de la tierra en el campo gravitacional del sol, el reloj mostrará diferencias periódicas de tiempo de alrededor 1.6 milisegundos entre el TDT y el TDB. El tiempo dinámico es utilizado en mecánica celeste con las ecuaciones de movimiento de Newton, como un argumento para las efemérides astronómicas de la luna y el sol.

5.3.3. Tiempo Universal Coordinado

El tiempo universal coordinado (UTC Universal Time Coordinated), también conocido como *tiempo civil*, es el que transmiten la WWV y otras emisoras del mundo, es definido a partir del TAI, esta última escala no se mantiene sincronizada con el día solar, es decir el tiempo universal UT; debido a la rotación de la tierra, y la escala de tiempo TAI tendrá un valor mayor, respecto al UT, que se reajusta periódicamente mediante la intercalación o la supresión de un número entero de segundos a finales de junio o diciembre.

EL UTC, es el sucesor del GMT (*Greenwich Mean Time*: tiempo promedio del Observatorio de Greenwich, en Londres). A diferencia del GMT, el UTC no se define por el sol o las estrellas, sino que se mide por los relojes atómicos, debido a que la rotación de la Tierra es estable pero no constante, UTC se sincroniza con el día y la noche.

5.4. Sistemas GNSS

Sistema mundial de navegación por satélite (GNSS - Global Navigation Satellite System) es el término genérico estándar para sistemas de navegación por satélite que proporcionan cobertura global de posicionamiento de manera autónoma.

Los orígenes del GNSS se sitúan en los años 70 del siglo XX con el desarrollo del sistema militar estadounidense GPS (*Global Positioning System*). Sin embargo sólo hasta mitad de los años noventa esta tecnología comienza a utilizarse con fines civiles. A través de una red de satélites, un receptor de GNSS es capaz de determinar la posición de un punto en cuatro dimensiones (longitud, latitud, altura y tiempo), lo que ha dado lugar a multitud de aplicaciones civiles y militares. GNSS permite que pequeños receptores electrónicos determinen la posición de un lugar con pocos metros de error utilizando las señales de tiempo transmitidas por las constelaciones de satélites.

Se entiende por GNSS, al conjunto de sistemas de navegación por satélite, como son el GPS, GLONASS y Galileo¹⁵. A partir de 2009, los satélites de la constelación NAVSTAR (GPS) de Estados Unidos, son los únicos que están plenamente en operación, mientras el sistema GNSS, de Rusia se encuentra suspendido para obtener su pleno funcionamiento. China ha indicado que ampliará su sistema de navegación regional Beidou y además desarrollará el sistema de navegación mundial COMPASS para el año 2015. La Unión Europea, está desarrollando Galileo y se encuentra en su fase inicial de despliegue y tiene programado que será operacional en 2013. Además de los sistemas regionales de la India IRNSS y Japón QZSS.

Con el segmento espacial (red de satélites) perteneciente de manera exclusiva a los EEUU, el resto de países, como Japón, Australia, y el continente europeo, se centran en el desarrollo del segmento de tierra, es decir, de los centros de control y recepción de las señales GPS, y de elaborar sistemas de aumento para dicha tecnología, que les permitan obtener un posicionamiento más preciso.

5.4.1. Condiciones de los actuales sistemas GNSS

A continuación en la tabla 5.3, se mencionan las condiciones básicas de la estructura de un sistema global de navegación por satélite, para el sistema GNSS.

Condición	Característica
Cobertura	<i>GNSS debe tener una cobertura mundial, es decir, una constelación de satélites que sea suficiente como para garantizar el funcionamiento del sistema en cualquier parte del planeta. Por lo menos se requiere de un mínimo de cuatro satélites para calcular las coordenadas espaciales y temporales.</i>
Disponibilidad	<i>El sistema debe garantizar su normal funcionamiento durante la mayor parte del tiempo de ocupación, por encima del 95%. Esto se logra con la redundancia de satélites mayor de cuatro para el cálculo correcto de una posición.</i>
Precisión	<i>El sistema debe proporcionar un posicionamiento espacial y temporal preciso. El rango de precisión depende del tipo de receptor y la técnica utilizada para el posicionamiento</i>
Integridad	<i>La integridad es un concepto fundamental en la navegación y hace referencia a la calidad y fiabilidad de los datos que se utilizan para seguir una determinada ruta o realizar una operación. Para cuantificar la integridad, se suele expresar el riesgo de pérdida de integridad como la probabilidad de un fallo no detectado. Es decir los satélites deben transmitir información fiable y no errónea.</i>
Continuidad de servicio	<i>Concepto que se refiere sobre todo al servicio prestado por el GPS.</i>

Tabla 5.3. Condiciones de un sistema GNSS

¹⁵ De los sistemas GNSS. No se explicarán los sistemas GLONASS y GALILEO, porque actualmente no son operativos con fines de posicionamiento civil, será énfasis en GPS que es el único sistema que tiene su segmento espacial en funcionamiento

5.4.2. Funcionamiento de un sistema GNSS1

El funcionamiento de un Sistema de Navegación por Satélite involucra tres segmentos, que serán explicados para el caso de GPS de manera detallada.

Segmento espacial: envía la señal que se recibe en los segmentos de control y usuario.

Segmento de control: recibe la señal del segmento de espacio, monitoriza y actualiza información enviando correcciones a los satélites si es preciso.

Segmento de usuario: recibe información procedente del segmento espacial y calcula su posición.

5.4.3. Aplicaciones de los sistemas GNSS

En la tabla 5.4, aparecen las aplicaciones de los sistemas GNSS.

Aplicación	Característica
Militar Aeronáutico	<i>Cálculo de rutas, aproximación al aterrizaje, reconocimiento y localización de objetivos.</i>
Militar para Infantería	<i>Supervivencia, emplazamiento de la artillería, reconocimiento y localización de objetivos, recuperación de equipos, puntos de encuentro, evacuaciones.</i>
Militar para la Marina	<i>Navegación, operaciones anfibia, patrulla costera, posicionamiento de submarinos</i>
Automotriz	<i>Los sistemas de navegación de automóviles basados en GPS, para la localización mediante sistemas de información geográfica, para análisis de ruta.</i>
Ferrocarriles	<i>Apoyo al control del tráfico, la gestión de recursos ferroviarios, control de trenes.</i>
Aviación	<i>Los sistemas GPS integrados en las actuales cabinas sirven para guiar el piloto automático a través de planificación de rutas. Mayor precisión en ruta utilizan sistemas de aumento como WAAS o LAAS.</i>
Navegación marítima	<i>GPS es utilizado en la actualidad por multitud de barcos para navegar por mares oceános e incluso lagos. Estos sistemas tienen software, como el MOB, que permite el rescate marítimo de personas en el mar de manera mucho más sencilla.</i>
Agricultura	<i>DGPS ha supuesto también una revolución en la tecnología agrícola facilitando multitud de procesos: optimizando el uso de recursos, agricultura de precisión, el trazado de linderos, la gestión forestal.</i>
Cartografía	<i>Sistemas de Información Geográfica (SIG) y Cartografía, mapas temáticos, planificación y gestión de recursos naturales.</i>
Sincronización de equipos	<i>GPS es utilizado en la actualidad para la sincronización de distintos tipos de equipos por ser una fuente de tiempo muy precisa. Se usa por ejemplo en la toma de datos geofísicos, geodésicos y sismológicos.</i>
Telefonía móvil:	<i>Algunos teléfonos móviles pueden vincularse a un receptor GPS diseñado a tal efecto. Suelen ser módulos independientes del teléfono que le proporcionan los datos de posicionamiento, los cuales son interpretados por un programa de navegación.</i>
Servicios de localización y emergencia	<i>Son servicios basados en el GPS integrado en un dispositivo móvil, que envía la información de la posición de éste a través de una red. Pueden tener distintas aplicaciones, como servicios de emergencia (localización de personas), o publicidad (localización de lugares). El uso del GPS para los deportes que requieren localización como: caminatas, ciclismo, escalada, montañismo.</i>
Transporte multimodal:	<i>GNSS permite la localización y gestión de flotas de transporte (tierra, mar o aire), permitiendo mejores tiempos de entrega y el reducción de costos.</i>
Redes de comunicaciones	<i>Sincronización de redes de comunicación como Internet, UMTS, GSM se puede realizar a través de los GNSS lo que permite ofrecer una mayor calidad de servicio a menor precio, incrementando la capacidad la red. Un ejemplo de integración de los Sistemas de Navegación con distintas redes de telecomunicaciones se da con los servicios basados en localización (LBS).</i>

Tabla 5.4. Aplicaciones de los sistemas GNSS

5.4.4. GNSS-1

Como se muestra en la figura 5.7, GNSS-1 es la primera generación y es la combinación de los actuales sistemas de navegación por satélite (GPS y GLONASS), con sistemas de aumento de la base de satélites (SBAS), los sistemas de aumentación basado en tierra (GBAS) y los sistemas de aumento basado en aeronaves (ABAS).

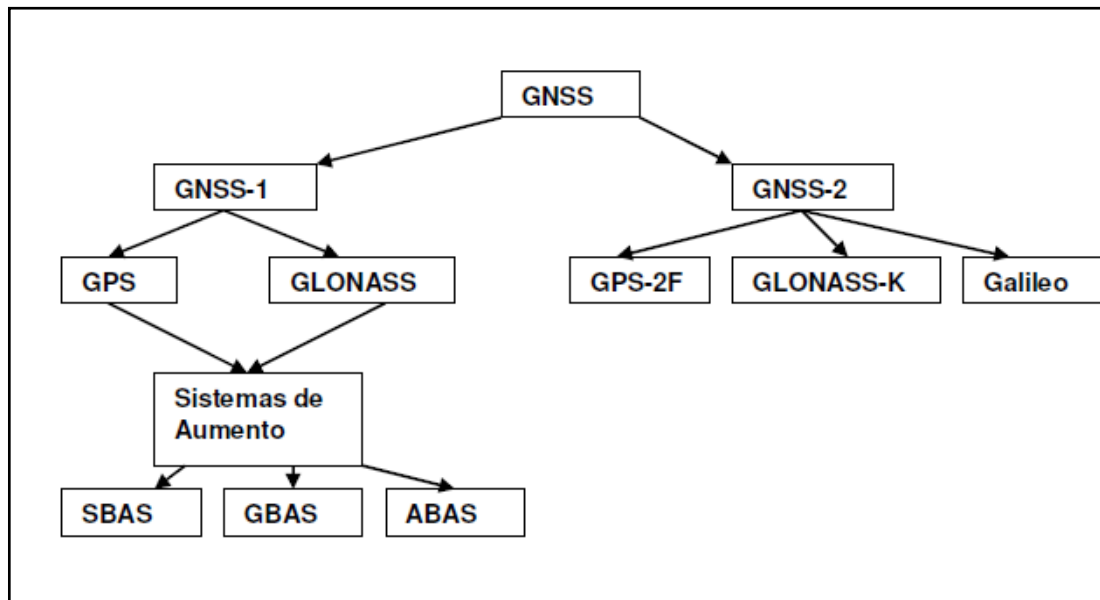


Figura 5.7. Cronograma organizativo de GNSS. Tomado de García 2008

Sistema de aumento basado en aeronaves (ABAS): Son sistemas que emplean más de 4 satélites para calcular la posición, de esta forma son capaces de detectar fallos en el envío de información.

En la actualidad se emplean dos sistemas:

- **Sistema Monitor de Integridad Autónoma del Receptor (RAIM):** por un lado detecta fallos calculando su posición con la combinación de 4 satélites sobre 5 o 6 visibles, así se sabe cuál es el satélite defectuoso. Por otro, la aeronave puede ahora actuar como otro satélite debido a su altitud ya que conoce su posición.
- **Sistema de Identificación y Exclusión de Fallas (FDE):** esta funcionalidad permite descartar el satélite defectuoso para seguir empleando el GNSS de forma normal. Se encuentra en la mayoría de las aeronaves que se desarrollan en la actualidad.

Sistema de aumento basado en tierra (GBAS): Tiene como propósito dotar de mayor precisión al GPS y GLONASS para el tráfico aéreo. Los sistemas GBAS se diferencian de los SBAS en que ellos no dependen de los satélites Geostacionarios (GEO), debido a que el GBAS no está diseñado para brindar su servicio sobre amplias regiones geográficas, se emplea en distancias cortas, por lo que es un LAAS, que es el nombre que le ha dado la FAA11 a su GBAS.

Sistema de aumento basado en satélites (SBAS): Se conoce como SBAS al conjunto de sistemas de aumento desarrollados por distintos países que se basan en el uso de satélites geostacionarios y por lo tanto mejoran en esas zonas el servicio GPS y GLONASS.

En la Figura 5.8, se puede observar la distribución geográfica de los SBAS que existen en la actualidad. En los Estados Unidos, el satélite es el componente WASS (Wide Area

Augmentation System); en Canadá es similar a Estados Unidos, es decir, CWASS (Canadian Wide Area Augmentation System); en Europa es EGNOS (European Geostationary Navigation Overlay Service); en Japón, MAS (Multi-funcional Satellite Augmentation System), en la India GAGAN (Indian GPS And GEO Augmented Navigation); SNAS (Chinese Satellite Navigation and And GEO Augmented Navigation). La aumentación basada en tierra es proporcionada por sistemas como el sistema de aumentación de área local (LAAS).

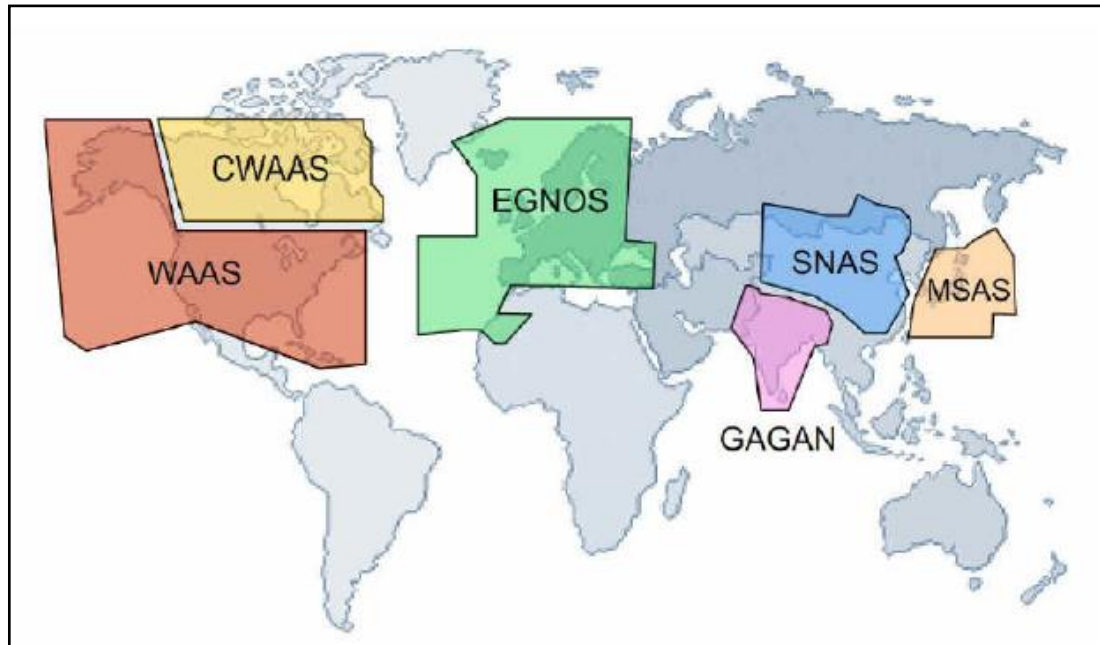


Figura 5.8. Sistemas de Aumento Basados en Satélites. Tomado de García 2008

Entre las funciones de mejora que ofrecen dichos sistemas se encuentran:

- Aumentar la precisión de GPS y GLONASS: mientras que estos sistemas tienen una precisión de unos 20-70 metros, los SBAS ofrecen una precisión de entre 1 y 10 metros, variando de un sistema a otro
- Incrementar la integridad del sistema informando de posibles fallos en satélites con mayor rapidez. Mientras que el GPS puede tardar 15 minutos para aplicaciones críticas, los actuales sistemas civiles requieren entre 6 y 30 segundos de retardo para informar de un fallo. Los SBAS alcanzan este requisito, siendo así imprescindibles para aplicaciones geodésicas.
- Incrementar la disponibilidad. Actualmente el GPS tiene una disponibilidad del 95-98%, mientras que sistemas como el EGNOS tienen una disponibilidad de hasta el 99.97%.

5.4.5. GNSS-2

GNSS-2 es la segunda generación de sistemas de forma independiente que tendrá un completo sistema de navegación civil por satélite, que incluye GPS-2F, GLONASS-K y Galileo. Estos sistemas permitirán mayor exactitud e integridad de vigilancia necesarios para la navegación civil. Este sistema tiene además de las frecuencias L1 y L2 para uso civil, la frecuencia L5 que proporciona la integridad del sistema.

Además de los sistemas actuales de navegación por satélite: GPS, GLONASS y Galileo, se incrementarán los sistemas de aumento de satélite (SBAS), tales como Omnistar y Starfire. SBAS regional incluyendo WAAS (EE.UU.), EGNOS (UE), MSAS (Japón) y GAGAN (India) y los sistemas Regionales de navegación por Satélite tal QZSS (Japón), IRNSS (India)

y Beidou (China). Lo mismo ocurrirá para los sistemas de aumentación basado en tierra (GBAS) de tipo continental, por ejemplo, el GRAS de Australia y otros sistemas como (DGPS) del Departamento de Transporte Nacional de Estados Unidos, que se utiliza para PS diferencial. Redes de escala regional como GBAS CORS y redes locales GBAS caracterizado por una única estación de referencia GPS de funcionamiento cinemático para correcciones en tiempo real (RTK).

5.5. GPS

5.5.1. Conceptos básicos del GPS

Un receptor GPS calcula su posición con precisión por las señales electromagnéticas que viajan a la velocidad de la luz que son enviadas de la constelación de satélites. Cada satélite transmite continuamente señales que contienen la información precisa de su órbita (efemérides) y del sistema general de altitud (el almanaque).

El receptor mide el tiempo de tránsito de cada mensaje a través de las fases de retardo de las señales de radio transmitidas desde la constelación de satélites GPS y calcula la distancia a la que se encuentra cada satélite, esto lo realiza con trilateración geométrica (medida de las distancias entre los satélites y el receptor) que permite determinar ubicación del receptor.

El cálculo de la posición lo realiza a través de las coordenadas geocéntricas (x,y,z) de WGS84, las cuales a través de la solución de un problema inverso se convierten en coordenadas geodésicas. Podría pensarse que son suficientes tres satélites para resolver de la posición, puesto que el espacio tiene tres dimensiones. Sin embargo, un error de tiempo muy pequeño multiplicado por la velocidad de la luz puede redundar en un gran error posicional, del orden de varios metros en especial en alturas elipsoidales. El receptor utiliza un cuarto satélite para resolver las coordenadas (x, y, z, t) , de las cuales el tiempo se utiliza para corregir el reloj del receptor.

5.5.2. Segmentos

Segmento Espacial

El segmento espacial (SS), está comprendido por satélites, también llamados vehículos espaciales SV (Space Vehicles), que son satélites no geoestacionarios pertenecientes a la constelación NAVSTAR (Navigation Satellite Timing and Ranging). Estos satélites envían señales de radio desde su posición en el espacio hacia la Tierra. Hay 24 satélites principales que se encuentran orbitando en 6 planos, A, B, C, D, E y F, cada uno con 4 satélites. Cada plano orbital, está separado por 60° con respecto a orbitas adyacentes y forman un ángulo de 55° de inclinación con respecto al plano ecuatorial de la tierra. Ver figuras 5.9 y 5.10.

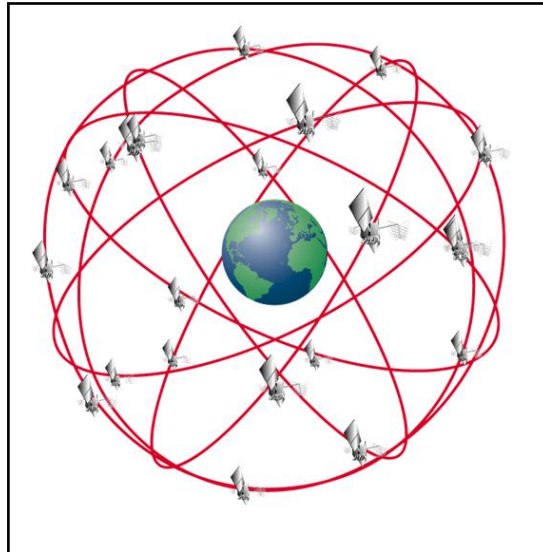


Figura 5.9. Constelación NAVSTAR

Fuente http://concurso.cnice.mec.es/cnice2006/material121/unidad3/medios/red_gps.jpg

Cada plano se encuentra a 20.200 kilómetros sobre la Tierra y con un período orbital de 12 h, realizando dos órbitas completas en un día sideral. Estos 24 satélites pertenecen a diferentes grupos, según la fecha de lanzamiento.

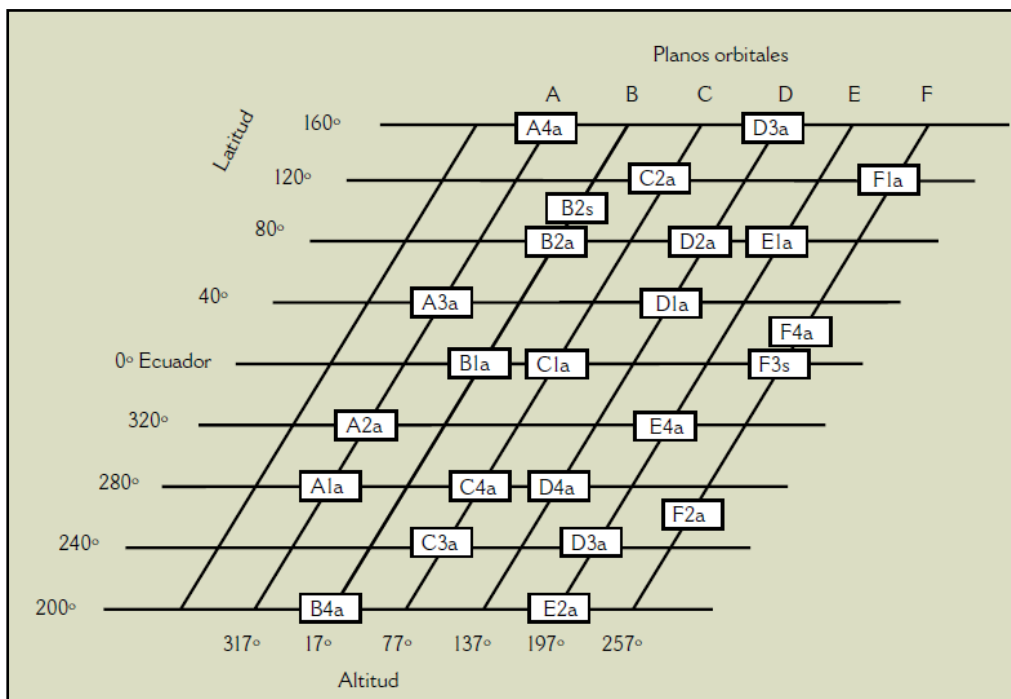


Figura 5.10. Representación Simplificada de la Constelación GPS.
Fuente Domínguez Juan. Sistemas de Posicionamiento GPS. 1999

Bloque I de satélites GPS

El primer bloque de satélites GPS está compuesto por los once primeros satélites que se lanzaron al espacio, adjudicados a Rockwell International y corresponden a los satélites 1 al 11 lanzados entre los años 1978 y 1985. Estos satélites sirvieron para validar el proyecto y estaban distribuidos a una altitud de 20.200 kilómetros con un ángulo de inclinación de 63° de los cuales ya todos fueron sustituidos.

Bloque II de satélites GPS

El segundo bloque de satélites que se lanzaron al espacio está compuesto por los satélites lanzados de 1989 a 2006. Los satélites diseñados entre estas fechas se conocen como BLOCK

II, BLOCK IIA, BLOCK IIR y BLOCK IIR-M. Se conoce como BLOCK II a los satélites lanzados en 1989 y 1990. Fueron desarrollados también por Rockwell International y actualmente ninguno de ellos presta servicio. El BLOCK IIA es el conjunto de satélites lanzados entre 1990 y 1997. El tiempo medio de vida de BLOCK II y BLOCK IIA es de 7.3 años. En la actualidad 5 de los satélites BLOCK IIA han dejado de prestar servicio. Estos satélites fueron construidos con el fin de disminuir la precisión y limitar el acceso al código P.

Bloque IIR de satélites GPS

El último conjunto de satélites lanzados al espacio es el BLOCK IIR que se lanzaron a partir de 1997, desarrollados por la Lockheed Martin. Son más avanzados que los anteriores y pueden permanecer sin comunicarse con el segmento de control 14 días y 180 navegando en modo autónomo sin sufrir perturbación alguna en su órbita. Esto es posible gracias a un sistema de comunicación entre los satélites BLOCK IIR que les permite estimar los parámetros y alinearse sin contactar con el segmento de control. Su vida media es más larga, unos 7.8 años y son los que prestan servicio en la actualidad junto a los BLOCK IIA. Los satélites BLOCK IIR-M son los tres últimos satélites lanzados al espacio en 2005 y 2006, y aunque se consideran del BLOCK IIR, tienen nuevas prestaciones como el código L2C en la banda de frecuencias L2. En la actualidad hay un total de 30 satélites en el segmento espacial del GPS, distribuidos no uniformemente y que garantizan unas mejores prestaciones en cuanto a disponibilidad e integridad que la constelación de 24, al presentar mediciones redundantes y evitar errores de posición en el caso de que múltiples satélites fallen. Cada satélite de esta constelación, cuenta con cuatro relojes atómicos, 2 de cesio y 2 de rubidio, el de cesio, permite estabilidad en cortos periodos de tiempo, mientras que el de rubidio, es más estable en condiciones de largos periodos de tiempo.

Segmento de Control

Los objetivos del segmento de control incluyen el seguimiento continuo a los satélites y procesamiento de los datos para el cálculo de las efemérides (espacio-tiempo), revisión del estado de sincronización de los relojes satelitales y corrección de órbitas de cada satélite. Este segmento, está comprendido por una red de estaciones de seguimiento permanentes distribuidas en toda la Tierra. Existen 5 estaciones principales, una de control central y las cuatro restantes corresponden a estaciones secundarias. Ver figura 5.11.

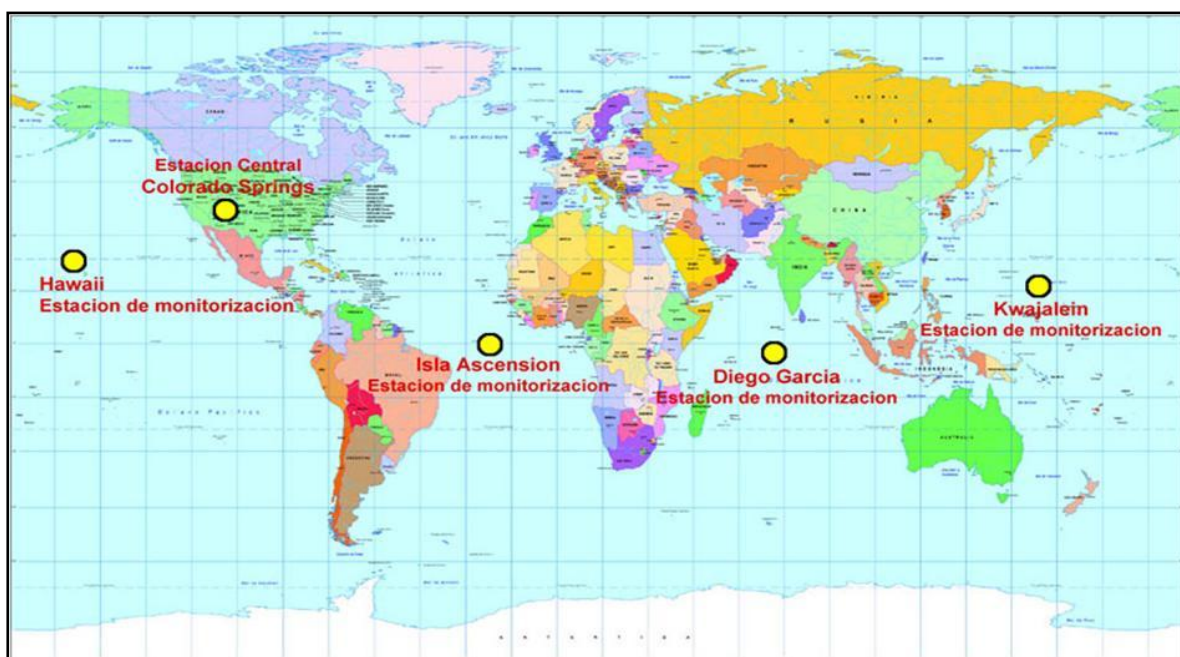


Figura 5.11. Distribución de estaciones de seguimiento, segmento de control.
Fuente www.uv.es/montanan/redes/trabajos/NAVSTAR-GPS.ppt.

La estación de control maestra (MCS) está situada en Colorado en la Base Falcon de la Fuerza Aérea de los Estados Unidos, Isla Ascensión (Océano Atlántico), Diego García (Océano Índico) y Kwajalein (Océano Pacífico), son las cuatro estaciones secundarias, las cuales, están localizadas cerca al Ecuador y regularmente espaciadas en longitud. Se conoce de manera muy precisa la posición de cada una de estas estaciones de acuerdo con las mediciones realizadas por WGS84. De ésta forma se puede conocer la precisión del GPS, ya que al calcular la posición de la estación por triangulación a partir de la información que envían los satélites GPS, se calcula la desviación sobre la posición exacta de la estación. Como la posición de cada estación y las coordenadas temporales se conocen (cada estación está equipada con un reloj atómico de cesio), se pueden combinar las medidas obtenidas por varias estaciones para crear un sistema de navegación inverso que determine la localización espacial y temporal del satélite para aplicar así las correcciones oportunas de los parámetros de navegación del mismo.

Las estaciones secundarias, suministran continuamente observaciones GPS a la estación principal en Colorado, estas observaciones permiten determinar las órbitas de estos satélites y calcular nuevas órbitas para todos los satélites GPS. Esta órbita, es transmitida a tres estaciones de enlace ascendente (“Uplink Stations”) Diego García, Isla Ascensión y Kwajalein, donde los modelos orbitales se actualizan. Los datos orbitales, son transmitidos en dos tipos de exactitud: almanaque y efemérides, dichas correcciones se transmiten por las estaciones de control que poseen antenas de tierra, que a su vez pueden aplicar correcciones de reloj, comandos de telemetría y otros mensajes, siendo una función exclusiva de la MCS la corrección de la órbita de los satélites. La transmisión de correcciones se realiza tres veces al día. En caso de fallo de la MCS, las dos estaciones de reserva estarían listas para funcionar de forma inmediata sin que se alterara el normal funcionamiento del sistema en ningún momento.

Segmento de Usuario

Este segmento, incluye los receptores utilizados por la gran cantidad de usuarios GPS en todo el mundo. Estos equipos son dispositivos pasivos, pues recibe información de los satélites a partir de una señal, la cual es procesada y transformada en posición, velocidad y tiempo. Para obtener posición en cuatro dimensiones (x, y, z, t), es necesario contar mínimo con cuatro satélites disponibles en el horizonte.

El GPS, comprende dos niveles de usuarios: Servicio de Posicionamiento Estándar SPS y Servicio de Posicionamiento Preciso PPS (Standard Positioning Service – Precise Positioning Service), la diferencia conseguida entre estos dos niveles de usuario es la precisión; éste último usuario, es reservado para uso exclusivo militar, mientras que el SPS es empleado por los demás usuarios.

El receptor, posee los siguientes elementos: una antena para recibir la señal enviada por el satélite, un radio receptor, el cual procesa la señal, y por último, la interfaz de usuario, la cual permite la comunicación entre el dispositivo y el usuario final y un reloj muy estable (a menudo un oscilador de cristal). También pueden incluir una pantalla para facilitar la ubicación y velocidad de la información para el usuario. De acuerdo a sus características de precisión se pueden clasificar los diferentes receptores GPS.

5.6. Estructura de la Señal (CÓDIGOS C/A, P)

El grupo de satélites GPS, tiene cuatro osciladores a bordo, uno de ellos es seleccionado para suministrar la “frecuencia fundamental” $f_0 = 10.23$ MHz, este oscilador, permite definir cinco unidades:

1. L1 portadora: la señal original es multiplicada por el factor 154, resultando una señal con la frecuencia portadora $f_1 = 154 \cdot f_0 = 1575.42$ MHz ($10.23\text{MHz} \cdot 154$). Esta frecuencia, transmite los códigos C/A y P.

2. L2 portadora: la señal original es multiplicada por el factor 120. Resultando una señal con la frecuencia portadora $f_2 = 120, f_0 = 1227.60$ MHz (10.23 MHz*120). Transmite únicamente el código P, de uso exclusivo para uso militar.

Sobre las frecuencias portadoras L1 y L2, se emiten a su vez, los códigos C/A y P.

3. Código generador C/A: este código (Course/Acquisition) o también llamado S, es un módulo electrónico que genera una señal rectangular tal que 10 longitudes de onda completas de la frecuencia fundamental f_0 ajusten dentro de un rectángulo. El código C/A es el de menor frecuencia, resultante de la relación entre la frecuencia fundamental y 10, igual a 1.023 MHz; ofrece menores precisiones, de acuerdo al nivel de PPS, para uso civil. EL código C/A, se transmite a través de la frecuencia L1.

4. Código generador P: (Precise) corresponde al código generador C/A de manera que también genera una señal rectangular. Sin embargo, para el código P, un rectángulo contiene una longitud de onda completa de la frecuencia fundamental f_0 . Este código, a diferencia del C/A, ofrece una mayor precisión, de acuerdo al nivel de usuario PPS, equivalente a la frecuencia fundamental 10.23 MHz; éste se transmite en la frecuencia L2 y es para uso militar exclusivo.

5. Código generador D: el código D, genera una señal rectangular con una relación relativamente baja. El estado puede ser +1 o -1, y se representa por los dígitos binarios 1 y 0, respectivamente.

Los satélites del Bloque I, no tienen la capacidad de encriptar el código P, por otro lado, todos los satélites de los Bloques II y IIA, tienen la capacidad de cambiar del código P al código encriptado Y. Este código, tiene características similares a las del P, pero es clasificado. El mensaje de navegación es transmitido en L1 y L2, contiene las efemérides de los satélites (elementos keplerianos, tiempos y corrección de la órbita), la corrección del reloj con respecto al tiempo GPS, el modelo de los coeficientes de la refracción ionosférica y la información del estatus del sistema GPS. (Ver figura 5.12).

L5 (1176,45 MHz): Propuesta para el uso civil. Esta frecuencia cae en un rango de protección internacional para la navegación aeronáutica, garantizando poca interferencia en la señal y será utilizada en GNSS-2.

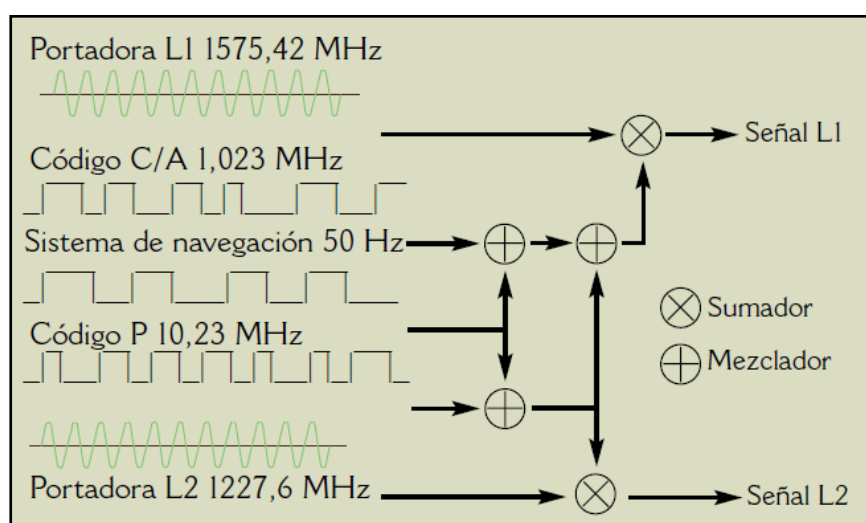


Figura 5.12. Señales del sistema GPS.

Fuente Domínguez Juan. Sistemas de Posicionamiento GPS. 1999

El mensaje de navegación modula la señal L1 C/A, que es una señal de 50 Hz que consiste en una serie de datos que describen la órbita del satélite, las correcciones del reloj y otros

parámetros del sistema. El mensaje de navegación enviado por el sistema GPS consiste en una serie de datos donde viene marcado el momento de transmisión de cada subtrama y el momento en que son transmitidos por el SV. Cada trama consta de 1.500 bits (divididos en 5 subtramas de 300 bits) y se transmite cada 30 segundos. Las correcciones del reloj se envían en la subtrama uno, y los datos de la órbita (efemérides) en las subtramas dos y tres. Las subtramas cuatro y cinco se usan para transmitir los diferentes datos del sistema. Ver gráfica 5.13.

En 25 tramas (125 subtramas) se envía el mensaje completo, que lleva un tiempo de 12,5 minutos. Hay dos tipos de datos que lleva el SV para describir la órbita y otros parámetros del sistema: La efeméride describe la órbita de un SV para secciones pequeñas de la órbita del satélite. Normalmente un receptor GPS recibe nuevas efemérides cada hora, pero puede usar sus datos almacenados hasta cuatro horas sin demasiado error. El almanaque son datos aproximados de la órbita para todos los SV. Estos datos describen la órbita para largos períodos de tiempo (a veces para algunos meses) y se envían a los receptores en un período de tiempo de 12,5 minutos. Los datos del almanaque incluyen un modelo de la ionosfera que el receptor usa para aproximar el retraso de la señal a través de la ionosfera.

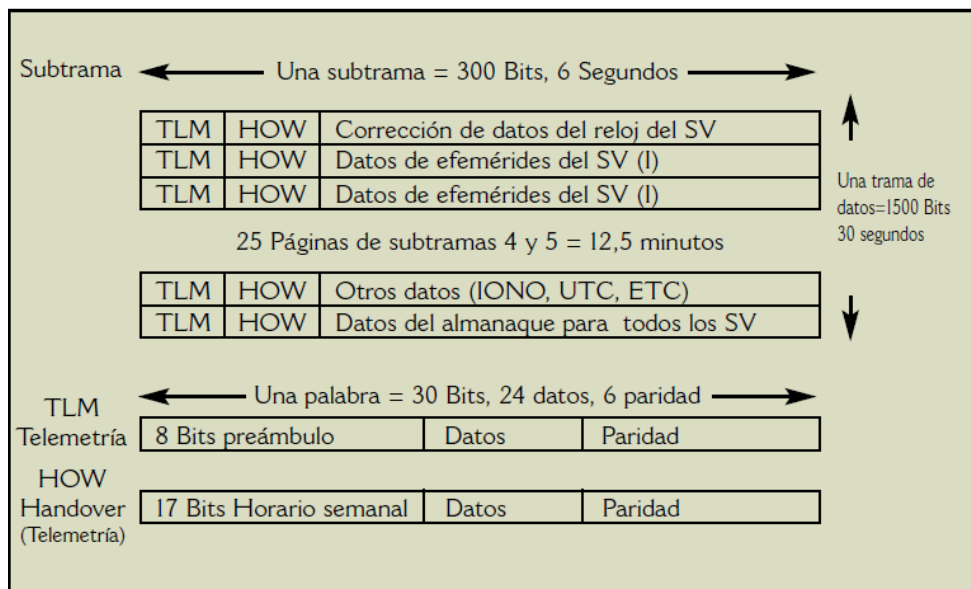


Figura 5.13. Señales del sistema GPS.
Fuente Domínguez Juan. Sistemas de Posicionamiento GPS. 1999

5.7. Cálculo de la posición de un satélite

La base del funcionamiento del GPS es la triangulación desde los satélites. Para triangular, un receptor de GPS debe medir la distancia usando el tiempo de propagación de señales de radio. Para medir el tiempo de propagación, el GPS necesita conocer la referencia horaria con gran precisión. Se necesita saber exactamente donde están los satélites en cada momento y finalmente se deben corregir los retrasos de la señal cuando viaja a través de la atmósfera.

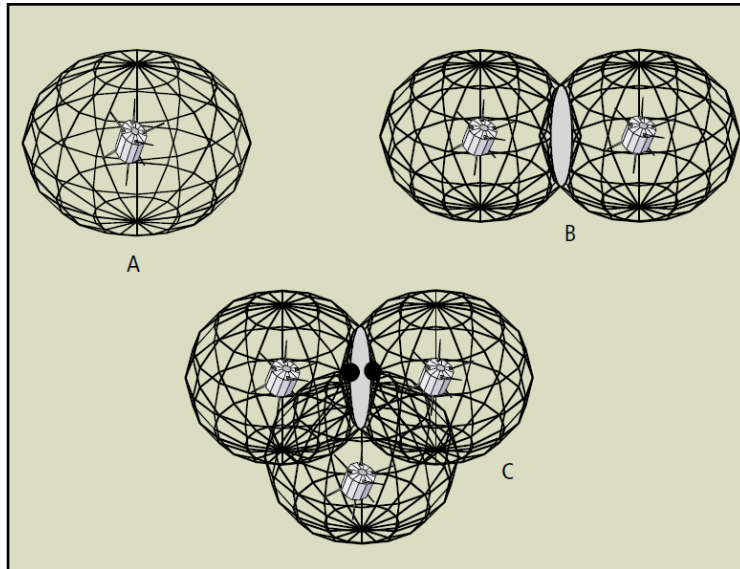


Figura 5.14. Intersección de las señales GPS
Fuente Domínguez Juan. Sistemas de Posicionamiento GPS. 1999

Se requiere utilizar cuatro satélites cuyas posiciones geocéntricas son designadas como por un sistema coordenado $[x_i, y_i, z_i, t_i]$, en donde i corresponde a cada satélite, es decir $i=1,2,3,4$. Conociendo la hora indicada en la cual se recibió el mensaje t_{ri} , el receptor GPS puede calcular el tiempo de tránsito $(t_{ri} - t_i)$ del mensaje. Asumiendo que el mensaje viaja a la velocidad de la luz, c , la distancia recorrida puede ser calculada como $\psi_i = (t_{ri} - t_i)c$. Conociendo la distancia entre el receptor GPS a un satélite y la posición de un satélite significa que el receptor GPS se encuentra en la superficie de una esfera centrada en la posición de un satélite. Ver figura 5.14. La superficie de dos esferas se cortan en un círculo. Mientras que la superficies de tres esferas se cortan en dos puntos, también podrían no interceptarse o interceptarse en un solo punto. Sin embargo para obtener una posición correcta del receptor es indispensable una cuarta esfera, es decir con eso se define la necesidad de tener un cuarto satélite.

Ahora bien, considerando los errores del GPS, se tiene la posición del receptor con cuatro incógnitas, los tres componentes de la posición de receptor GPS y el error del reloj dT , lo que implica definir la ecuación.

$$(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2 + (z - z_i)^2 = [(t_{ri} + dT - t_i)c]^2 \quad [5.3]$$

Otra forma de ver esta ecuación en términos de la pseudodistancia o pseudorange, que son aquellas distancias incorrectas debidas a la falta de sincronismo entre los relojes del satélite y del receptor, se puede entender en términos de la siguiente ecuación¹⁶

$$\psi_i = \sqrt{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2 + (z - z_i)^2} - cdT \quad [5.4]$$

Donde,

- ψ_i Seudorange obtenido para cada satélite
- x, y, z : Coordenadas GPS, Coordenadas ECEF (Earth Centred Earth Fixes)
- x_i, y_i, z_i Coordenadas de la antena o receptor en tierra
- c : Velocidad de la luz en el vacío
- dT : Tiempo de retardo de la señal al receptor (error por reloj)

¹⁶ Entre otros métodos para resolver estas ecuaciones se encuentran Newton-Rapson Multidimensional, soluciones algebraicas, técnicas de linealización y filtros Kalman. Revisarlos en la Bibliografía.

Se denomina pseudorango a la medida de la distancia basada en la correlación entre el código transmitido por el satélite y el código generado localmente en el receptor, que no ha sido corregido de los errores debidos a la sincronización entre los relojes del emisor y receptor. Se denominan pseudorangos ya que no son distancias verdaderas debido a que necesitan corrección de los errores del reloj del satélite, y de la velocidad de la luz debido a los efectos de la ionosfera y troposfera.

Una tarea fundamental del receptor estándar es determinar esta medida. Esto se logra por la correlación de códigos; en este proceso, el código generado C/A dentro del receptor es retrasado hasta que se iguale con el código correspondiente de la señal satelital, que viene vía antena. La permanencia de la ambigüedad puede ser fácilmente resuelta por información adicional. Para simplificar, se asume que el satélite GPS y el receptor GPS materializan el mismo marco de tiempo.

Dicho de otra manera, el receptor remoto aplica en tiempo real, las correcciones a las mediciones del pseudorango y luego calcula la posición correcta, mejorando la exactitud de las coordenadas. Dentro de la reducción del pseudorango, se debe incorporar las reducciones por ionosfera y rotación de la tierra.

5.8. Correcciones y reducciones

Entre las fuentes de error y las correcciones que se realizan se encuentran: Efecto de rotación de la tierra, efecto relativista, refracción troposférica, refracción ionosférica, dilución de la precisión, efecto multipath y disponibilidad selectiva. En la tabla 5.5, se observan los rangos equivalentes de errores para el usuario (UERE).

<i>Fuente</i>	<i>Efecto</i>
<i>Código C/A</i>	$\pm 3 m$
<i>Código P(Y)</i>	$\pm 0.3 m$
<i>Efectos ionosféricos</i>	$\pm 5 m$
<i>Errores de las Efemérides</i>	$\pm 2.5 m$
<i>Errores del reloj del satélite</i>	$\pm 2 m$
<i>Distorsión Multipath</i>	$\pm 1 m$
<i>Efectos Troposféricos</i>	$\pm 0.5 m$

Tabla 5.5. Rangos equivalentes de errores para el usuario (UERE)

5.8.1. Efecto rotación de la Tierra

Durante el tiempo de viaje de la señal desde el satélite hasta el receptor GPS en tierra, el alcance inclinado entre el satélite y el receptor cambia debido a la rotación de la Tierra. La corrección por efecto de rotación, está señalada por la ecuación:

$$d_{rot} = \frac{\Omega_e}{c} (X(Y - y) - Y(X - x)) \quad [5.5]$$

Donde,

- Ω_e rango de rotación de la tierra = $7.2921151467 \times 10^{-5}$ rad/s
- c velocidad de la luz en el vacío
- X, Y, Z coordenadas GPS
- x, y, z estación del observador

5.8.2. Efecto Relativista

En el proceso de observaciones GPS existen 3 ejes o marcos de tiempo importantes:

- Tiempo del sistema GPS
- Tiempo del satélite
- Tiempo del receptor

Estos ejes de tiempo son materializados por relojes los cuales se están desplazando con respecto al otro en espacio y tiempo con diferentes efectos gravitacionales. El efecto relativista causa un aparente cambio en la frecuencia fundamental f_0 . Los efectos residuales son reducidos cuando el GPS es usado en posicionamiento relativo (GPS diferencial-DGPS).

5.8.3. Refracción Troposférica (Refracción atmosférica, refracción troposférica, ionosférica)

La Troposfera es la última zona o capa de la atmósfera (hasta unos 80 Km, pero sólo en los últimos 40 se producen retardos significativos), donde se produce retardo y donde las temperaturas decrecen con el incremento de altura. El espesor de la Troposfera no es el mismo en todas las zonas. La presencia de átomos y moléculas neutros en la Troposfera afecta a las señales de propagación electromagnética. El índice de refracción para un área parcial es función de su temperatura, de la presión de los gases secos y del vapor de agua. Esta atmósfera neutra es un medio no disperso con respecto a las ondas de radio de frecuencias superiores a 15 GHz, por lo tanto, la propagación es independiente de la frecuencia. Consecuentemente, no es necesario distinguir entre medidas de código y fase sobre las portadoras L1 y L2. La desventaja está en que no es posible eliminar la refracción troposférica con medidas en las dos frecuencias. El retardo troposférico experimentado por una señal que va desde un satélite a un punto en la superficie, puede ser expresado en primera aproximación por una integral a lo largo del camino recorrido por la señal.

La refracción troposférica es función de la temperatura, la presión de los gases secos y del vapor de agua e independiente de la frecuencia de onda. Dentro de este error, se incluye la humedad, pues la señal se puede retrasar aproximadamente 3 minutos. Los satélites que se encuentran bajos en el horizonte transmiten señales a través de la superficie de la tierra con la tropósfera; mientras que aquellas directamente en lo alto transmiten a través de mucho menos de la tropósfera. Los fabricantes moldean el retraso troposférico en un software; las pruebas han demostrado que estos modelos troposféricos funcionan razonablemente bien.

5.8.4. Refracción Ionosférica

En la ionósfera se encuentra una gran cantidad de de electrones libres, que dependen de la energía solar y el campo geomagnético. Los electrones afectan la velocidad de las señales de radio que pasan a través de la ionosfera. Esta región de la atmósfera es un medio disperso para ondas de radio, por lo tanto su índice de refracción es función de la frecuencia de la onda, de la densidad de electrones y de la intensidad del campo magnético de la tierra.

El error ionosférico varía según la posición del punto (latitud, longitud y altura) y según el momento de la observación. Este retardo depende del ángulo de elevación del satélite, siendo

menor en el cenit, y mayor cuando disminuye el ángulo de elevación. En observaciones nocturnas, los niveles de electrones son menores que durante el día, por lo que en las horas del día se pueden encontrar errores hasta de 30 metros y en la noche hasta de 6 metros.

Esta refracción es asumida como la misma tanto en el receptor de referencia como en el de la nave. Las correcciones de la refracción ionosférica son aplicadas para aquellos GPS receptores de frecuencia dual, mediante la siguiente fórmula:

$$dP_{ion} = \left(\frac{f_2^2}{f_2^2 - f_1^2} \right) \left((L_1 N_1 - L_2 N_2) - (\phi_1 - \phi_2) \right) \quad [5.6]$$

Sin embargo, dicha refracción, se puede eliminar mediante el uso del DGPS.

5.8.5. Dilución de la precisión (Geometría de los Satélites)

En el momento de hacer la medición en un punto, es importante tener en cuenta la geometría de los satélites que se encuentran visibles en ese instante con el fin de obtener altas precisiones en el posicionamiento de tal punto. Hay que tener en cuenta que a medida que avanza el tiempo, las condiciones geométricas varían, como consecuencia del movimiento orbital de los satélites. La variable que mide esta geometría es conocida como el factor de dilución de la precisión (Dilution of Precision), **DOP**. Este valor, se considera como el volumen de un cuerpo que se genera entre los satélites y el receptor, cuanto mayor sea el volumen, mejor su geometría y menor será el DOP, es decir el DOP es inversamente proporcional al volumen del cuerpo sólido formado por los satélites y el punto donde se encuentra ubicado el receptor, lo ideal es que el DOP sea igual a 1.

El factor principal que afecta el DOP es la cantidad de satélites que se pueden observar y la posición de estos en el cielo, así pues, a medida que avanza el tiempo, las condiciones geométricas varían, como consecuencia del movimiento orbital de los satélites. De tal manera que un valor alto de DOP, indica que los satélites se encuentran muy cerca entre sí, obteniendo una precisión baja; por el contrario, si el valor de DOP es bajo, los satélites están distantes entre sí, brindando una alta precisión en la medición del punto, en otras palabras, un mayor ángulo entre los satélites proporciona una mayor precisión, es decir un DOP bajo. Ver tabla 5.6 y figuras 5.16 y 5.17.

<i>CALIDAD</i>	<i>DOP</i>
<i>Muy buena</i>	<i>1-3</i>
<i>Buena</i>	<i>4-5</i>
<i>Moderada</i>	<i>6</i>
<i>Deficiente</i>	<i>>6</i>

Tabla 5.6. Valores DOP

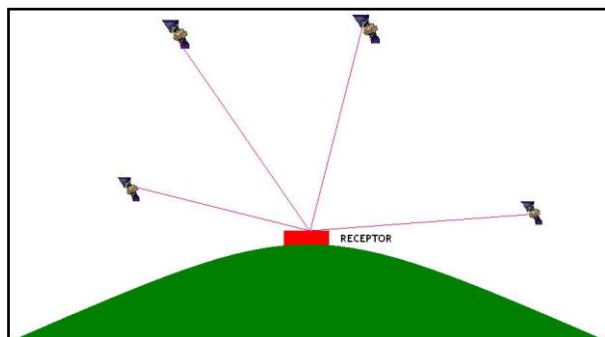


Figura 5.16. DOP bajo; buena geometría de satélites.

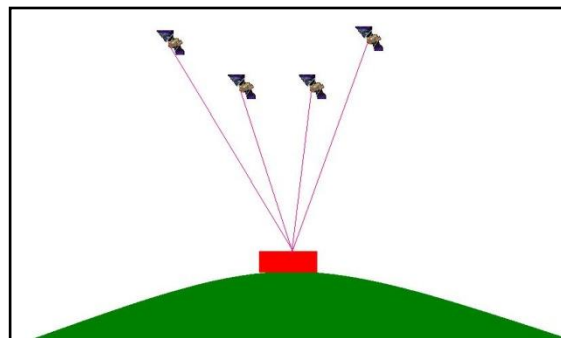


Figura 5.17. DOP alto; mala geometría de satélites

Los valores de DOP que se utilizan con mayor frecuencia son los mostrados en la tabla 5.7.

DOP	DESCRIPCIÓN
GDOP	<i>Dilución de la precisión en posición y estado del reloj</i>
PDOP	<i>Dilución de la precisión en posición</i>
TDOP	<i>Dilución de la precisión en el estado del reloj</i>
HDOP	<i>Dilución de precisión en coordenadas cartesianas o geodésicas</i>
VDOP	<i>Dilución de precisión en altimetría</i>
RDOP	<i>Dilución de precisión relativa entre dos puntos</i>

Tabla 5.7. Descripción de valores DOP

5.8.6. Efecto Multipath

Este efecto, es causado por las reflexiones o rebotes de la señal enviadas por el satélite en áreas cercanas al receptor, reemplazando la señal directa del satélite, estas reflexiones son más largas y producen un aumento en el tiempo de llegada de la señal del satélite hacia el receptor, distorsionando la amplitud de la onda. Para reducir la intensidad de de las señales secundarias, con el objetivo de aislar la señal directa, se deben elegir puntos de observación que reduzcan las reflexiones, evitar cercanías a árboles, edificios, afloramiento de rocas, techos de metal y vehículos; el buen diseño y la altura de la antena, también es importante para evitar el efecto multipath.

Factor	Clasificación	Descripción
Sistema de referencia	<i>Absoluto</i>	<i>Se calcula la posición de un punto con un solo receptor.</i>
	<i>Relativo o diferencial</i>	<i>Se calcula al menos con dos equipos simultáneamente. Se determina la diferencia de posición entre las antenas de los receptores.</i>
Movimiento del receptor	<i>Estático</i>	<i>Se determina solo un punto con coordenadas XYZ o $\Delta X \Delta Y \Delta Z$ si es diferencial, de una antena a partir de un conjunto de observaciones durante un periodo de tiempo en el que no hay desplazamientos superiores a la precisión del sistema. Redundancia en la observación.</i>
	<i>Cinemático</i>	<i>Se determina el conjunto de coordenadas XYZ o $\Delta X \Delta Y \Delta Z$ si es diferencial, en función del tiempo y de la antena receptora, la cual estará en movimientos por encima de la precisión del sistema. No hay redundancia en las coordenadas.</i>
Observable utilizado	<i>Medida de código</i>	<i>La posición se determina a partir de pseudodistancias entre el satélite y el receptor, mediante el uso del código de la portadora. Se pueden medir los códigos C/A y L2.</i>
	<i>Medida de fase de la portadora</i>	<i>Para la determinación de la pseudodistancia, se utiliza la fase portadora, para lo cual se debe trabajar en modo relativo o diferencial.</i>
Momento de la obtención de coordenadas	<i>Tiempo real (RT)</i>	<i>La posición del receptor, móvil o estático, se obtienen en tiempo real, en el mismo instante de la observación.</i>
	<i>Pos proceso</i>	<i>La posición del receptor, móvil o estático, son obtenidas una vez finalizadas las observaciones.</i>

Tabla 5.8. Clasificación métodos de posicionamiento

5.8.7. Disponibilidad Selectiva

La disponibilidad selectiva (S/A) constituye la mayor fuente de error, es introducida por el equipo militar de los Estados Unidos. La S/A es el reflejo de una variación de la frecuencia del código C/A, lo que genera una diferencia de las distancias (seudodistancia) entre la antena del receptor y el satélite, lo cual se ve manifestado en la precisión de la coordenada estimada por el receptor. Ver tabla 5.8.

Este error, también puede ser causado en las efemérides, así pues, el satélite envía la información de su posición con un error, causando así en las mediciones efectuadas unas coordenadas con una precisión reducida.

5.9. Métodos de Posicionamiento

Los métodos de medición, se pueden clasificar en diferentes tipos, teniendo en cuenta distintos factores: sistema de referencia, movimiento del receptor, observable utilizado, momento de la obtención de coordenadas.

Como combinación de estos métodos, da paso a otras técnicas de posicionamiento, dentro de las cuales describen una metodología que consiste en medir una línea base, desde un punto fijo con coordenadas conocidas a punto desconocido donde se encuentra la estación rover; y por otro lado, aquella metodología que únicamente trabaja con un receptor, conocida como método de posicionamiento absoluto.

5.9.1. Absoluto

El desarrollo de este método consiste en un único receptor, en el que la solución es una intersección directa entre el satélite y el receptor sobre el lugar de observación en un periodo de tiempo dado; el receptor, recibe las señales que provienen de los satélites en coordenadas absolutas, para determinar una posición con el método absoluto, es necesario tener en el horizonte al menos cuatro satélites, puesto que cada uno de ellos suministra una ecuación, cuatro ecuaciones cuatro incógnitas: XYZ y estado del reloj.

Aunque el posicionamiento absoluto tiene la ventaja de trabajar con un solo receptor, el sistema tiene varias desventajas, entre las cuales se encuentran errores producidos por efecto atmosférico: ionosfera y troposfera, la exactitud en la posición no es la óptima, pues de estar trabajando con la constelación NAVSTAR, la disponibilidad selectiva siempre está presente y no se pueden eliminar errores por efecto multipath. La “precisión” de este método de medición alcanza los 100 metros, es decir, esta técnica funciona para aquellos usuarios que no requieran una exactitud en la posición como por ejemplo un usuario de vehículo. La solución, puede ser en tiempo real o por el análisis de mínimos cuadrados.

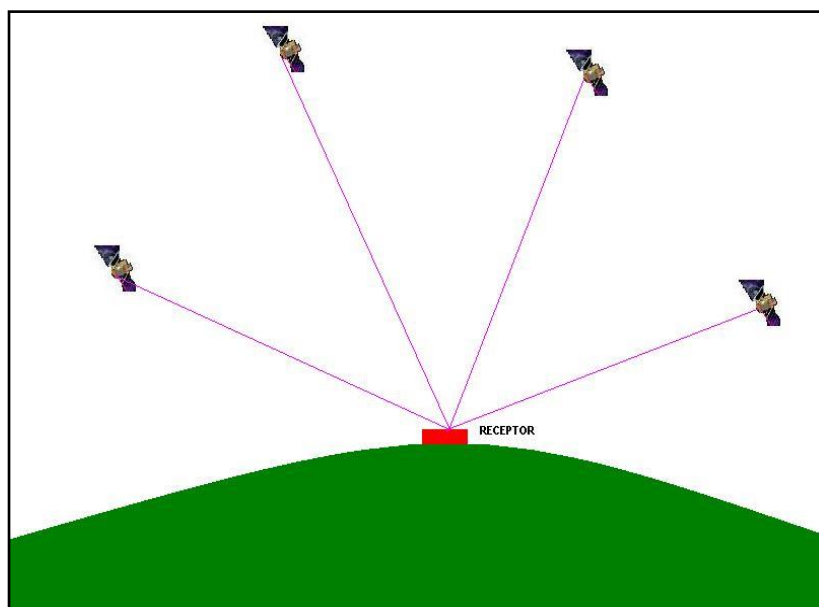


Figura 5.18. Posicionamiento Absoluto

5.9.2. Diferencial

El método diferencial, proporciona a los receptores GPS correcciones a los datos recibidos de los satélites con el fin de proporcionar una mayor precisión en la posición calculada, el cual, por medio de un receptor fijo, ubicado en un punto de coordenadas previamente establecidas y conocidas, corrige la posición obtenida por el receptor móvil, formando una línea base. Este método permite eliminar los errores causados por la pseudodistancia, la troposfera, la ionosfera; la técnica diferencial se desarrolló principalmente para eliminar el error introducido por el cuerpo militar de Estados Unidos en la disponibilidad selectiva.

La obtención de la línea base se obtiene de forma indirecta, pues las observaciones se realizan sobre los satélites y no entre los puntos. Si se conocen las coordenadas de la estación base, el problema se reduce a las coordenadas del punto móvil, y una vez determinadas dicho trío de coordenadas, se determina la línea base. De tal manera que las incógnitas son los diferenciales (dX , dY , dZ) que se debe sumar a las coordenadas absolutas de cada punto (X_0 , Y_0 , Z_0).

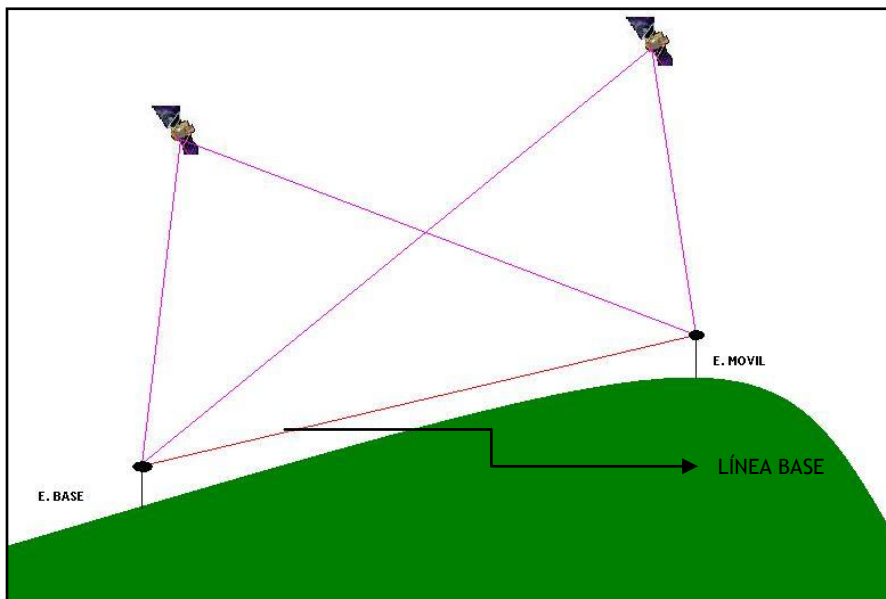


Figura 5.19. Posicionamiento Diferencial

Según el tipo de receptores, las observaciones realizadas y del software utilizado, el método diferencial brinda las siguientes técnicas:

5.9.3. Estático

Durante la fase de observación, los receptores no cambian su posición. El punto de referencia puede ser cualquiera de los dos puntos y la precisión reside en el tiempo de observación, la geometría y el equipo utilizado. El método estático rápido, esta técnica permite reducir el tiempo de observación y de cálculo gracias a la inclusión de algoritmos que permiten el tratamiento de la señal, de tal forma que con equipos de una frecuencia el tiempo mínimo de observación es de 10 minutos y el óptimo de 20 y con equipos de doble frecuencia el tiempo mínimo es de 1 minuto y el óptimo de 10. Sin embargo, para distancias mayores a 500 metros, se debe pensar en aumentar el tiempo de observación para eliminar los errores atmosféricos.

Con base en lo anterior, se puede decir que este método es el que mayor precisión tiene debido al tiempo de observación. El método estático diferencial es utilizado para el diseño de redes

que funcionan como apoyo a trabajos de cartografía y fotogrametría y puntos de control fotogramétrico.

5.9.4. Reocupación o pseudoestático

Corresponde al método estático de posicionamiento, pero que por problemas de observación el GDOP tiene un valor mayor a 8 o por disponibilidad de satélites en el horizonte de observación, hay menos de cuatro satélites visibles. La metodología a seguir es repetir la observación al cabo de un tiempo, con el fin de conseguir información de satélites diferentes a los de la primera observación; así pues, el software combina los datos de las dos observaciones para encontrar una única solución, como si se hubiera tomado una observación. El objetivo, es solucionar ciertos problemas que se pueden presentar en la observación por medio de la reocupación del mismo punto y una medición estática.

5.9.5. Cinemático

Este método permite reducir el tiempo de observación que requiere el método estático. Se tiene una estación fija con coordenadas conocidas y otra estación móvil que se va desplazando a los puntos que sean requeridos. Pero, como primer paso, es necesario una inicialización que permita conocer los parámetros de la línea base que une estos dos puntos, esto permite que el número de incógnitas se reduzca a tres (X, Y, Z) del receptor móvil. Por ejemplo, tras la inicialización se encuentra la información de seis satélites visibles, brinda cinco ecuaciones y tres incógnitas en un primer periodo de tiempo “época”; si se toman tres épocas, se tiene más redundancia, por lo tanto más precisión en la posición y si tal época es de 3 segundos, el problema queda resuelto solo en nueve segundos. La resolución del problema puede ser en tiempo real o en pos proceso, dependiendo del equipo utilizado en la medición. Este método tiene la ventaja de obtener excelentes resultados con buena precisión en una cantidad de tiempo reducida, sin embargo, en ocasiones presenta pérdidas en la señal, lo que dificulta la medición en la observación, de manera que si esto se presenta, las ambigüedades establecidas en la primera inicialización no serían adecuadas, por lo que habría que repetir el proceso en el lugar donde se presentó el error en la señal.

5.9.6. Stop & Go

Una vez hecha la inicialización, se procede a posicionar un punto con el receptor móvil, se hace la observación durante un tiempo y luego se procede al siguiente punto de la misma manera, hasta completar el circuito. Este método es práctico para el levantamiento de puntos cercanos entre sí.

5.9.7. Continuo

En el método continuo, no se efectúa ninguna parada porque no les es posible, esta técnica es utilizada en vehículos en movimiento como aviones, trenes y barcos, entre otros. Aquí, basta con indicar el tiempo que ha transcurrido entre una grabación y otra con el fin de posicionar el receptor que se encuentra en movimiento continuo.

5.9.8. DGPS

Estas siglas traducen GPS diferencial, y está definido para aquellos trabajos en los que solo intervienen medidas de código. Para garantizar una buena precisión en la observación, se debe permanecer en el punto de 15 a 30 minutos, para lograr la redundancia adecuada. Las correcciones conseguidas por el método Diferencial, se pueden obtener por radio, internet o por sistema de satélites (WASS de Estados Unidos, EGNOS de Europa, MSAS de Japón).

Se cuenta con tres tipos de medición diferencial: RTCM DGPS, RTK y GcGPS.

- **RTCM:** el receptor fijo, el cual genera las correcciones, es una estación base con coordenadas conocidas, con el fin de corregir la posición con una precisión menor a 5 metros. Para este método diferencial, la estación receptora (coordenadas desconocidas), compara las distancias observadas con las distancias calculadas para cada satélite. La estación base (coordenadas conocidas) es la que se encarga de transmitir aquellas posiciones calculadas de los satélites, a través de un enlace de telemetría a la unidad receptora; dichas correcciones se conocen como RCTM. Así pues, la unidad receptora móvil hace las respectivas correcciones de las distancias observadas de cada satélite para obtener una posición más precisa.
- **RTK:** (Real Time Kinematic – Cinemático en tiempo real) al igual que el RCTM, se cuenta con una estación base ubicada en un punto con coordenadas conocidas y una estación móvil o rover, la cual consta de una antena y un receptor, las cuales deben ser maniobradas por el usuario. La diferencia entre el RTCM y el RTK, radica en el post - procesamiento de los datos, pues mientras que se están tomando las mediciones, las correcciones están siendo aplicadas de forma instantánea. La precisión que puede alcanzar este sistema, está en el orden de 5 a 10 centímetros.
- **GcGPS:** este método utiliza un sistema diferencial de satélites geostacionarios sobre la antena GPS, mediante el uso de WASS y RTG.

RTG (Real Time Gipsy) estima la corrección de la posición, mediante un desarrollo que modela las fuentes de error en los sistemas satelitales. Así pues, el RTG usa datos de la red mundial de estaciones de referencia que forma parte del ITRF Network recibidos en tiempo real vía internet.

Los usuarios reciben 2 tipos de correcciones. La corrección del reloj para cada satélite GPS, basada en las mediciones corregidas de la refracción, el cual es calculado en cuestión de segundos; la corrección de órbita, para la cual se usan las mediciones del ITRF Network. WASS: red de satélites destinada a corregir la posición; es un servicio de la fuerza armada americana, compuesto por 25 estaciones distribuidas en el territorio estadounidense y 2 estaciones correspondientes a las estaciones maestras ubicadas en cada costa, las cuales reciben las señales de las estaciones de referencia y tienen la tarea de enviar los mensajes al GPS con las correcciones para la posición.

5.10. Adquisición de datos GPS

5.10.1. Conceptos Generales

Las mediciones GPS, contienen información tanto horizontal como vertical, es una medida tridimensional, dentro de las cuales se encuentran el ángulo horizontal, distancia y elevación. Dichas mediciones, se clasifican teniendo en cuenta dos variables: según la precisión y según la longitud del circuito. Según la precisión, se clasifican en cinco categorías ver tabla 5.9.

<i>Ítem/Categ.</i>	<i>Categoría A</i>	<i>Categoría B</i>	<i>Categoría C</i>	<i>Categoría D</i>	<i>Categoría E</i>
<i>Tolerancia</i>	<i>< 1 cm</i>	<i>Entre 1 y 10 cm</i>	<i>Entre 10 cm y 1 m</i>	<i>Entre 1 y 10 m</i>	<i>Entre 10 y 100 m</i>
<i>Error estándar</i>	<i>< 4 mm</i>	<i>Entre 0.4 cm y 4 cm</i>	<i>Entre 4 cm y 40 cm</i>	<i>Entre 40 cm y 4 m</i>	<i>Entre 4 m y 40 m</i>

Tabla 5.9. Categorías según la precisión

Según la longitud del circuito, se clasifican en cuatro categorías:

<i>Ítem/Categoría</i>	<i>Categoría 0</i>	<i>Categoría 1</i>	<i>Categoría 2</i>	<i>Categoría 3</i>
<i>Distancia entre puntos</i>	<i>Entre 100 y 1000 km</i>	<i>Entre 10 y 100 km</i>	<i>Entre 1 y 10 km</i>	<i>Entre 100 m y 1 km</i>

Tabla 5.10. Categorías según la longitud del circuito

5.10.2. Receptores Geodésicos de 1 y 2 frecuencias

Los receptores de equipos geodésicos se pueden dividir en ocho categorías teniendo en cuenta las observables y su uso, ver tabla 5.11.

Receptor	Descripción	
R1	Navegador simple	Receptor de código C/A, de tamaño pequeño. Coordenadas geográficas en WGS 84; posibilidad de coordenadas en sistemas locales. Su precisión no es muy buena: ± 25 a 30 m con buen DOP; ± 100 m con S/A.
R2	Receptor C/A-DGPS	Las mismas características de receptores R1. Almacena en memoria los datos observados, para su posterior procesamiento, mediante algún algoritmo diferencial. Precisión de ± 1 a 5 m.
R3	Receptor C/A	Características similares a las de receptores R1 y R2. Los osciladores tienen menor estabilidad. La resolución de ambigüedades no es la mejor. Precisiones submétricas en distancias de hasta 5 o 10 km.
R4	Medición fase L1	Actúa la onda portadora L1. Cálculo de vectores, para el ajuste de redes. Precisiones centimétricas para distancias entre 25 y 30 Km; precisiones submétricas para distancias hasta 50 km.
R5	Doble frecuencia	Las mismas características de los anteriores receptores. Medición de la fase portadora L2. Disminución de errores ionosféricos. Precisiones subcentimétricas en distancias de hasta 10 km; precisiones centimétricas en distancias de hasta 200 km.
R6	Doble frecuencia y doble código	Las mismas características de todos los receptores anteriores. Resuelve ambigüedades con gran agilidad.
R7	Diferencial preciso	En la unidad móvil se encuentran tres o más equipos del tipo R6. Obtiene en tiempo real precisiones subcentimétricas y centimétricas.

Tabla 5.11. Clasificación de receptores

5.10.3. Adquisición y procesamiento de datos

Tanto la adquisición como el procesamiento de datos GPS, dependen del equipo y el software que este posee. Para el caso puntual de este ejercicio, Leica proporciona un software de procesamiento llamado **LEICA GEO OFFICE (LGO)**, el cual permite importar, visualizar y editar los datos obtenidos en tiempo real, exportar coordenadas a un archivo ASCII; importar y procesar datos crudos y exportar datos a formatos GIS/CAD, entre otras funciones. Este software, procesa datos de manera independiente o por combinación de datos, incluyendo postprocesamiento y mediciones de tiempo real.

Sin embargo, los datos crudos obtenidos de un equipo, fácilmente pueden ser importados y procesados por otro, mediante el formato RINEX (Receiver Independent Exchange Format). Este formato, permite el intercambio, gestión y almacenamiento de las medidas generadas por los diferentes tipos de receptor que existen en el mercado. Ahora bien, existen programas independientes que brindan la posibilidad de servir como puente entre los formatos de casas comerciales y el formato RINEX.

5.11. Trabajo de campo de Nivelación con GPS

5.11.1. Diseño del Ejercicio de aplicación

Como se mencionó en el capítulo 4, este es el tercer ejercicio de aplicación. Su objetivo es nivelar el terreno y obras civiles del edificio del CIOH y sus alrededores, realizando un control geodésico en algunos puntos, que incluso son coincidentes con los ya mencionados.

El levantamiento en campo corresponde con una poligonal, donde se parte y se llega a un vértice geodésico. Para el ejercicio, la línea base se constituyó entre el vértice geodésico

SIRGAS y el punto de nivelación LEV. Este levantamiento, tiene con fin verificar y corroborar los datos obtenidos en los levantamientos anteriores desde un punto de vista académico y no de control geodésico, debido a las diferencias en el tipo de nivelación utilizada, aunque recorrido desarrollado sea el mismo que en la nivelación geométrica.

Es decir, algunos puntos que fueron tomados en la nivelación geométrica, no fueron nivelados con GPS, puesto que, al momento de tomar la medición de estos puntos la señal era deficiente, por la presencia de algunos obstáculos. Y como fue mencionado, una de las fuentes de error es causada por la presencia de construcciones civiles en especial edificios y además por la presencia de árboles que circundan cada punto, lo cual obstruye y desvía el paso de la señal enviada hacia el receptor, generando error por multipath.

Trabajo de campo con GPS

Se utilizó la técnica de nivelación geodésica propuesta por el Instituto Geográfico Agustín Codazzi –IGAC- (ver figura 5.20), que plantea la nivelación con GPS para tres diferentes situaciones: nivelación de un punto, nivelación de un perfil y nivelación de una superficie. Para el caso del ejercicio desarrollado, se utilizó una nivelación de un perfil. Cuya metodología de trabajo en campo, es la siguiente:

1. Tomar como base de referencia un punto geodésico, que para el caso, es un punto de la red geodésica, este punto es conocido como SIRGAS.
2. Seleccionar un punto de nivelación al cual se traslada el control horizontal a partir del punto de referencia seleccionado en el paso anterior, determinando los valores de latitud, longitud y altura: ortométrica y elipsoidal y, por último, la ondulación geoidal, que se puede obtener en la fase de oficina. Este punto de nivelación se convierten la nueva base para el rastreo del perfil.
3. Se debe tener en cuenta, que para el desarrollo de un perfil las distancias no deben exceder los 20 kilómetros, de tal forma, que cada 20 kilómetros se convierten en un circuito. Cuando se llega a esta distancia, se debe definir un nuevo punto base, la cual es el último punto del circuito terminado.
4. Repetir los pasos 2 y 3 hasta finalizar el circuito.

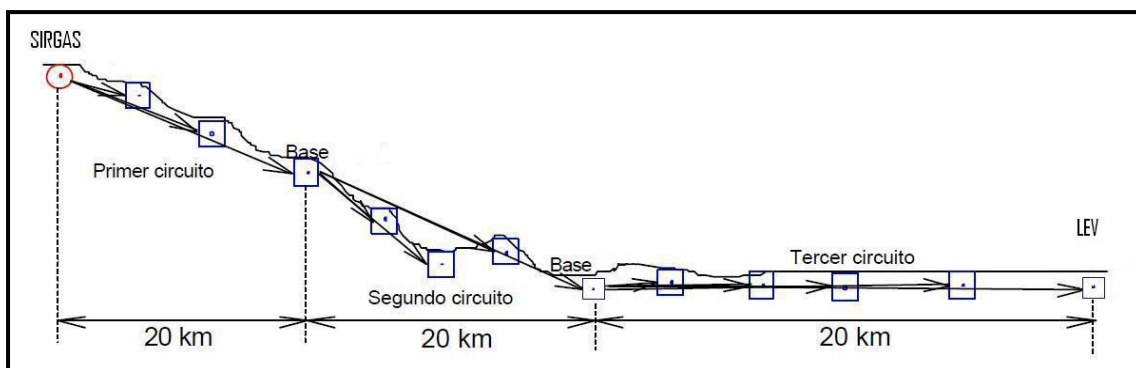


Figura 5.20. Nivelación de un circuito. Tomado de IGAC.

Equipo Utilizado en el Trabajo de GPS

El equipo GPS utilizado en el ejercicio de aplicación corresponde a un GPS Leica 1230, cuyas especificaciones técnicas son las siguientes y que además se muestran en la figuras 5.21 y 5.22.

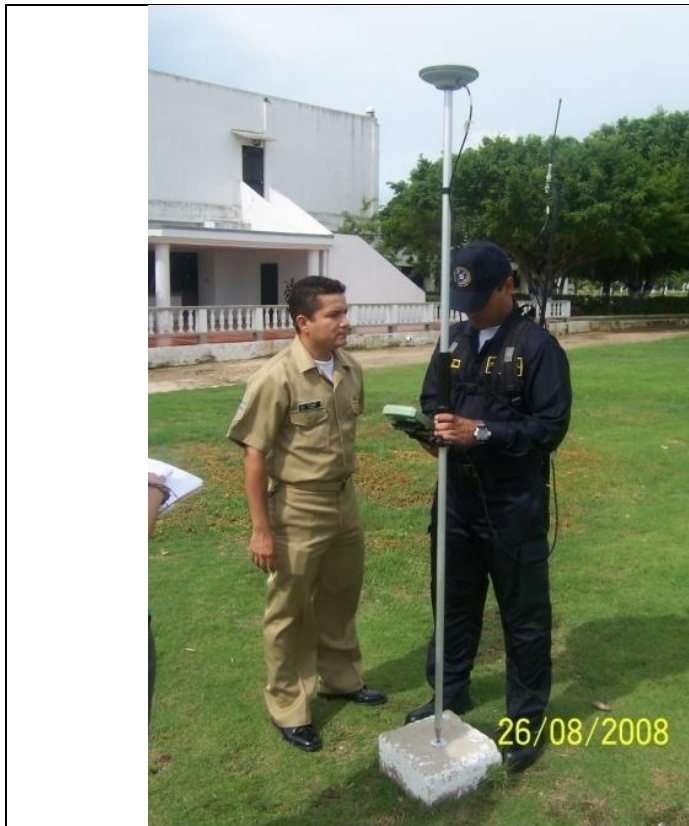
ÍTEM	GPS LEICA 1230
Tipo de receptor	Receptor geodésico de doble frecuencia GNSS para Cinemático en tiempo

	<i>real.</i>
<i>Tipo</i>	<i>Doble frecuencia</i>
<i>Tecnología del receptor</i>	<i>Mitigación de multipath en código y fase. Tecnología SmartTrack.</i>
<i>Medida L1</i>	<i>Fase portadora de onda completa.</i>
<i>Medida L2</i>	<i>Fase portadora de onda completa con AS desactivado o en código C/A</i>
<i>Voltaje</i>	<i>Nominal 12V DC</i>
<i>Consumo</i>	<i>5.2 W receptor+controladora+antena</i>
<i>Alimentación</i>	<i>Mini baterías (2) Ion -15 horas-</i>
<i>Almacenamiento de datos</i>	<i>Tarjetas Compact Flash 32 y 256 MB. Memoria interna 32 y 256 MB</i>

Tabla 5.11. Equipo utilizado en el trabajo de campo



Figura 5.21. Especificaciones técnicas del GPS Leica



Antena Receptora y equipo Leica 1230: Como se muestra en la figura un operario puede realizar la adquisición si tiene un Equipo Adecuado.



Equipo Leica 1230, completo; antena y accesorios.

Figura 5.22. Trabajo de campo con GPS Leica 1230



Levantamiento Diferencial



Captura de datos con el Equipo Leica 1230

Figura 5.22. Trabajo de campo con GPS leica 1230

En la Tabla 5.12 se indican las coordenadas Nortes y Estas en Proyección UTM, las coordenadas Geodésicas en WGS84 y las alturas elipsoidales obtenidas por los tres métodos, que corresponden a algunos de los puntos que son comunes en los tres métodos utilizados y se muestran en el plano.

ID	N	E	φ (N)	λ (W)	NIVELACIÓN GEOMETRICA	NIVELACIÓN GPS	NIVELACIÓN TRIGONOMETRICA
2	1148637,27	441651,939	10°23'25,807799"	75°31'58,931115"	-4,418	-4,4306	-4,4455
8	1148697,03	441650,889	10°23'27,755112"	75°31'58,97169"	-4,503	-4,4838	-4,5155
22	1148636,191	441583,263	10°23'25,771901"	75°32'01,190224"	-4,678	-4,6631	-4,6854
24	1148671,511	441586,843	10°23'26,921367"	75°32'01,074215"	-4,443	-4,4388	-4,4554
26	1148681,07	441587,689	10°23'27,239832"	75°32'01,036638"	-4,704	-4,6832	-4,7155
27	1148678,27	441605,769	10°23'27,142346"	75°32'00,451168"	-4,662	-4,6726	-4,6655
29	1148691,92	441620,469	10°23'27,587493"	75°31'59,969405"	-3,963	-3,9659	-3,9755
30	1148696,71	441627,409	10°23'27,745078"	75°31'59,740355"	-4,535	-4,5368	-4,5455
32	1148720,59	441595,849	10°23'28,519607"	75°32'00,78023"	-4,839	-4,8498	-4,8455

Tabla 5.12. Alturas elipsoidales, resultado de la nivelación con los tres métodos utilizados:
Nivelación Geométrica, Trigonométrica y GPS.

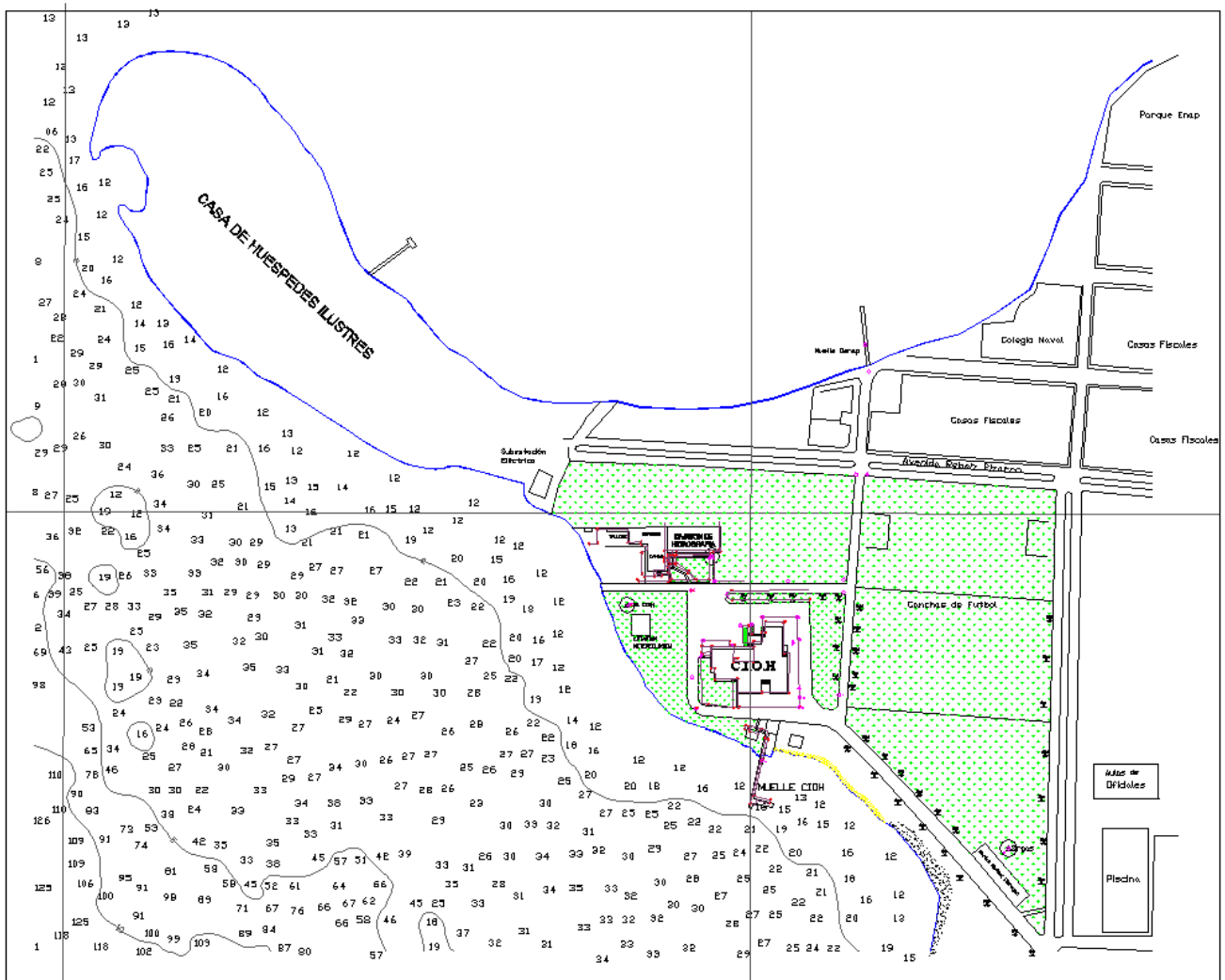


Figura 5.23. Plano del CIOH.

BIBLIOGRAFÍA

1. Díaz de Argandoña Javier. Departamento de Física Aplicada. Geofísica. Campo Gravitatorio Terrestre. 2004.
2. DMA (Defense Mapping Agency) Technical Manual 8358.1. Datums, Ellipsoids, Grids, And Grid Reference Systems. USA. 1986.
3. Domínguez Sánchez Juan José. Sistemas de Posicionamiento GPS
4. DMA (Defense Mapping Agency) Technical Manual 8358.2. The Universal Grids: Universal Transverse Mercator Grid. USA. 1989.
5. Duque Escobar Gonzalo. Guía Astronómica. Universidad Nacional de Colombia. Manizales, 1992 ANEXO 6°. La Astronomía en Colombia Perfil Histórico
6. Egge Dr Ing Delf. International Maritime Academy Trieste. Hamburg –Germany. University of Applied Sciences. 2002.
7. Fallas Jorge. 2003. Proyecciones Cartográficas y datum. ¿Que son y para qué sirven?. Costa Rica: Telemig, Universidad Nacional.
8. Farjas Mercedes. Nivelación Geométrica y Nivelación Trigonométrica. Temas 3 y 4. Universidad Politécnica de Madrid
9. Fernández – Coppel, Ignacio Alonso, Las Coordenadas Geográficas y La Proyección UTM El Datum, Universidad de Valladolid
10. Fernandez Benjamin. Geodesia para Ingenieros. Notas de Clase. Universidad Distrital Francisco José de Caldas. 2002.
11. Froment Benoit. Especificaciones Técnicas Para Levantamientos Topográficos con Estación Total. Modulo. CNR – El Salvador
12. Gunter Seeber, Satellite Geodesy. Foundations, Methods, and Applications. New York 1993
13. Hofman – Wellenhof B, Kienast und Lichtenegger. GPS in der Praxis. Springer-Verlag Wien New York 1994.
14. IGAC, Aspectos Prácticos de la Adopción del Marco de Referencia MAGNA – SIRGAS como datum oficial de Colombia, División de Geodesia, Subdirección de Geografía y Cartografía 2004.

15. Ipbüker¹ Cengizhan, Bildirici² I.Öztug..2002. A general algorithm for the inverse transformation of map projections using jacobian matrices. Turquía.
16. Jones Andrew. 1999. Where in the world are we?. Australia.
17. Keller Wolfgang. 2001. Geodetic Coordinate Systems en *Map Coordinates*, USA: University Stuttgart.
18. Kennedy Melita and Koop Steve. Understanding Map Projections. ESRI. 2000.
19. Martin Asin, Fernando Geodesia y cartografía matemática. 1990
20. Mena Berrios Juan Bautista. Geodesia Superior. J.B. Mena (2008). Vol. 2: Proyecciones cartográficas y Geodesia espacial. (500 páginas) Publicado por el Centro Nacional de Información Geográfica (CNIG). Instituto Geográfico Nacional (IGN). Ministerio de Fomento. Madrid. España. 2008
21. OpenCourseWare – Universidad Politécnica de Madrid
22. Organización Hidrográfica Internacional. Manual de Hidrografía. Publicación M-13. Publicado por El Bureau Hidrográfico Internacional. Mónaco. 1^{ra} Edición. Mayo de 2005.
23. Rapp Richard. Geodesia Volumen 1, Principios Básicos. Agencia Cartografica de Defensa. Servicio Geodésico Interamericano Junio de 1.991
24. Ruiz Morales Mario. Ingeniería Cartográfica, Geodesia y Fotogrametría. Universidad de Granada, España. 1984
25. Sánchez Laura. Determinación de la Superficie Vertical de Referencia Para Colombia. Universidad Técnica de Dresden, Alemania. Junio 2003
26. Telford W. M. Geldart L.P y Sheriff R.E. Applied Geophysics. Second Edition. Cambrige University Press. 1990.
27. Topcon. Estación Total por Pulsos. Serie GPT – 3000
28. Torres Alvaro. Topografía. Cuarta Edición. Escuela Colombiana de Ingeniería. Colombia. 2001.
29. Udias Vallina A, Mezcuca Rodríguez J. Fundamentos de Geofísica. Editorial Alhambra S.A. Mexico. 1986.

30. Vanicek Peter & krakiwsky Edward, Geodesy: The Concepts University of New Brusswick. Canada. 1986, Second edition.
31. Wolf Paul y Brinker Rusell, Topografía. Editorial Alfaomega. 2001. Novena Edición.
32. Wolfgang Torge, Geodesy. Berlin – Neva Cork 2001.
33. Wöppelmann Guy et al. Zéro hydrographique : vers une détermination globale.

GLOSARIO

Aplanamiento: parámetro del elipsoide que está en función de la longitud de los semiejes mayor y menor en una elipse o elipsoide.

Banco de nivel: objeto natural o artificial relativamente permanente, que tiene un punto fijo marcado, cuya elevación arriba o debajo de un plano de referencia adoptado se conoce o se supone.

Biunívoca: Es simplemente una correspondencia unívoca cuya correspondencia inversa también es unívoca. Es decir la relación de cada elemento imagen con su elemento origen

Cartografía Matemática: La cartografía matemática, estudia la base matemática indispensable para la elaboración de un mapa. Involucra el concepto y la definición de escala y de proyección cartográfica, o sistema de representación de la superficie terrestre en una superficie plana. La cartografía matemática es una herramienta de Conceptualización que a partir de la definición matemática de la forma de la tierra (geodesia geométrica) permite obtener las proyecciones cartográficas de una zona a cartografiar.

Cartografía: Proviene del griego “chartis” que significa mapa y “graphein” que significa escrito. Es una disciplina que integra ciencias que se encargan del estudio y de la elaboración de los mapas.

Convergencia de Meridianos: Es el ángulo que forma la transformada del meridiano que pasa por el punto (con dirección al norte geográfico) con la dirección del norte de la cuadrícula o de la red UTM (paralela al meridiano central del huso).

Coordenadas curvilíneas: Es la forma más general de parametrizar o etiquetar los puntos de un espacio localmente euclídeo o variedad diferenciable.

Cota: Cota se denomina a la distancia vertical medida desde cualquier plano utilizado como referencia hasta el plano que contiene al punto, cuando se toma como referencia el nivel medio del mar la distancia vertical se denomina Altitud.

Curvas de Nivel: Las curvas de nivel son líneas que representan el relieve de un terreno, estas curvas se forman uniendo puntos del terreno que tienen igual cota o altura, la separación entre curvas de nivel representa la distancia horizontal entre ellas y la distancia vertical se deduce por la diferencia entre las cotas tomadas.

Dátum: El término Dátum se aplica en varias áreas de estudio y trabajo específicamente cuando se hace una relación hacia alguna geometría de referencia importante, sea ésta una línea o un plano. Por lo tanto, los dátum pueden ser visibles o teóricos.

Deflexión: Se entiende por deflexión aquella deformación que sufre un elemento por el efecto de las flexiones internas. Para determinar la deflexión se aplican las leyes que relacionan las fuerzas y desplazamientos utilizando dos tipos de métodos de cálculo: los geométricos y los de energía.

Ecuación Canónica: En matemática, indica una igualdad que contiene una o más incógnitas de forma regular conforme a las reglas, natural, que no es arbitrario.

Elipsoide: Sólido cuyas secciones planas son todas elipses o círculos. Figura análoga a la elipse con una dimensión más cuyas coordenadas cartesianas satisfacen una ecuación de segundo grado.

En ingeniería, se puede decir que los Datums generalmente reflejan los planos cartesianos x, y y z, para establecer las superficies críticas desde donde medir y controlar la altura, anchura y grosor de un cuerpo. Los Datums son esenciales para controlar la geometría y tolerancias de fabricación de una variedad de características.

Factor de Escala: Razón o proporción entre medidas comparables.

Geoide: Superficie gravimétrica equipotencial que mas se acerca al nivel promedio del mar y su continuación por debajo de los continentes. Este geoide tiene ondulaciones en su superficie (no confundir con la topografía) y estas se deben a la irregular distribución de las fuerzas gravitacionales en la masa del planeta.

Geopotencial: Se define como el trabajo necesario para elevar una unidad de masa hasta cualquier nivel de presión constante, desde el nivel medio del mar.

Grillas: Líneas verticales y horizontales en un mapa y que sirven para fijar la posición. Sistema que permite trasladar una posición desde algo curvo (la tierra) a un mapa plano.

Isometría: Es una aplicación matemática entre dos espacios métricos que conserva las distancias entre los puntos.

Iteración: Se refiere a la acción de repetir una serie de pasos un cierto número de veces.

La distancia más corta entre dos puntos de la superficie esférica es el arco de círculo máximo comprendido entre los dos puntos (derrota ortodrómica), pero como ese arco salvo en casos del Ecuador o en un meridiano, forma ángulos desiguales con los meridianos que atraviesa, para navegar por círculo máximo, obligaría a constantes cambios de rumbo, incómodo y poco ventajoso en distancias cortas, por lo que generalmente se navega por línea loxodrómica.

Línea de nivel: Línea contenida en una superficie de nivel y que es por tanto curva, debido al comportamiento de las masas en el interior de la tierra

Línea horizontal: Es una línea en un plano horizontal, en topografía es una línea perpendicular a la línea de la plomada

Línea vertical (de la plomada): Es una línea que sigue la dirección de la gravedad indicada por el hilo de una plomada

Líneas Loxodrómicas: La derrota o línea loxodrómica es aquella curva que trazada en la superficie esférica terrestre forma ángulos iguales con los meridianos que atraviesa; es decir, la que recorre un buque sin cambiar de rumbo.

Nivel medio del mar: Altura promedio de la superficie del mar, según todas las etapas de la marea en un período de 19 años. Se determina generalmente en intervalos de una hora. El nivel del mar difiere entre estaciones por las condiciones de influencia local de la marea.

Nivelación: El objetivo de la nivelación es determinar las diferencias de cota entre varios puntos del terreno y depende del tipo de altura de interés.

Ortogonal: En matemáticas, el término ortogonalidad es una generalización de la noción geométrica de perpendicularidad. En el espacio euclídeo convencional el término ortogonal y el término perpendicular son sinónimos. Sin embargo, en espacios de dimensión finita y en geometrías no euclídeas el concepto de ortogonalidad generaliza al de perpendicularidad.

Parámetro: Se llama parámetro a un valor representativo de una población, como la media aritmética, una proporción o su desviación típica.

Plano de referencia con base en las mareas: Son los planos de referencia verticales usados en zonas costeras para fijar límites en las propiedades aledañas a cuerpos de agua sujetos a mareas. Son diversos los planos de referencia con base en las mareas, pero la más común es la relacionada con la *nivel alto medio del agua (MHW)*, otras se relacionan con *el nivel alto máximo del agua (MHHW)*, con *el nivel medio bajo del agua (MLW)* y con *el nivel bajo mínimo medio del agua (MLLW)*.

Plano horizontal: Plano perpendicular a la dirección de la gravedad En topografía plana es un plano perpendicular a la línea de la plomada.

Proyección: La proyección gráfica es una técnica de dibujo empleada para representar un objeto en una superficie. La figura se obtiene utilizando líneas auxiliares proyectantes que partiendo de un punto, denominado foco, reflejan dicho objeto en un plano a modo de sombra. Transformación matemática que nos permite representar una superficie no plana en un plano. Sistema ordenado que traslada desde la superficie curva de la Tierra la red de meridianos y paralelos sobre una superficie plana.

Superficie de Nivel: Aquella que en todos sus puntos es normal a la dirección de la gravedad.

Vértices y Estaciones: Un vértice se forma en la intersección de dos líneas, si en un levantamiento topográfico se ubica un aparato topográfico sobre un vértice, a este punto se le denomina estación; todos los vértices, estaciones y puntos auxiliares necesarios durante el levantamiento deben ser materializados de forma permanente o temporal según la necesidad.

ACRONIMOS

ARENA	Red Geodésica Nacional
BIH	Bureau International de l'Heure
CIOH	Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas
DANE	Departamento Administrativo Nacional de Estadística
DGPS	Differential GPS
DIMAR	División General Marítima
DMA	Defence Mapping Agency (USA)
DORIS	Doppler Orbitography and Radiopositioning Integrated by Satellite
EOP	Earth Orientation Parameter
ENC	Base de Datos
EGM96	Earth Geopotential Model 1996
EOS	Earth Observing System
GIS	Geographic Information System
GLONASS	Global Navigation Satellite System
GMT	Greenwich Mean Time
GNSS	Global Navigation Satellite System
GRS80	Global Reference System
GPS	Global Positioning System
GSFC	Goddard Space Flight Center
IAG	International Association of Geodesy
IAU	International Astronomical Union
ICA	International Cartography Association
ICRF	International Celestial Reference Frame
ICRS	International Celestial Reference System
IERS	International Earth Rotation Service
IGAC	Instituto Geográfico Agustín Codazzi
ITRF	International Terrestrial Reference Frame
ITRS	International Terrestrial Reference System
IUGG	International Union of Geodesy and Geophysics
IVS	International VLBI Service for Geodesy and Astrometry
IOH	International Hydrographic Organization
LLR	Lunar Laser Ranging
MAGNA	Marco Geocentrico Nacional de Referencia
MSL	Mean Sea Level
MLWS	Mean Level Water Springs
NASA	National Aeronautics and Space Administration
NAVNET	Navy VLBI Network
NAVSTAR	Navigation Satellite Timing and Ranging
NIMA	National Imagery and Mapping Agency
OAN	Observatorio Astronómico Nacional
OMI	Organización Marítima Internacional
SIRGAS	Sistema Geocéntrico de Referencia para las Américas
SLR	Satellite Laser Ranging
TAC	Totally Accurate Clock
TAI	International Atomic Time
TFO	TOPEX/Poseidon Follow-ON
T/P	TOPEX/Poseidon
TRF	Terrestrial Reference Frame
USGS	United States Geological Survey

USP	Universal Polar Sterographic
UTM	Universal Transversa de Mercator
VLBI	Very Long Baseline Interferometry
WGS84	World Geodetic System 1984