



CAPITULO I

1. LA FORMA DE LA TIERRA

El hombre siempre ha estado interesado por la tierra sobre la cual vive hace muchos siglos. Durante mucho tiempo, este interés estaba limitado naturalmente a visualizar su entorno inmediato. Mas tarde, prolongó su interés por conocer la distancia entre dos localidades de comercio, y finalmente el desarrollo de los medios de transporte, incidió para que la humanidad comenzara a interesarse por el mundo entero. Este interés por el mundo observado desde tiempos remotos, se ha evidenciado por la especulación y teorías acerca del tamaño, forma y composición de la tierra.

Contrario a la creencia popular, Cristóbal Colon no fue el primero en predecir la forma redonda de la tierra. La historia revela que 600 años antes de Cristo, un filósofo griego llamado Pitágoras afirmaba que la tierra no era plana si no redonda. 300 años después, Aristóteles consideró la teoría acerca de la redondez de la tierra y el estudio del movimiento de los planetas. Este filósofo y matemático basó su teoría en las siguientes observaciones:

1. Observación de diferentes estrellas desde puntos distintos.
2. Observación de un barco en el horizonte.
3. Observación de la forma de la luna y los eclipses.
4. Observación de la forma de los planetas y otros astros.

Siglos más tarde, adelantos como el telescopio, las tablas de logaritmos y el método de triangulación, contribuyeron a la ciencia de la geodesia. En efecto, en el siglo XVII el francés Picard, realizó la medida de un arco, la cual fue novedosa en algunos aspectos. Este científico midió una línea de base con la ayuda de astas de madera, usando un telescopio para medir ángulos y el calculo con logaritmos. Cassini mas tarde, continuó utilizando el arco de Picard en el norte, con dirección Dunquerque y para el sur divisando hacia España. Cassini dividió el arco medido en dos partes, una de Paris hacia el norte y otra hacia el sur (Burkard, 1974).

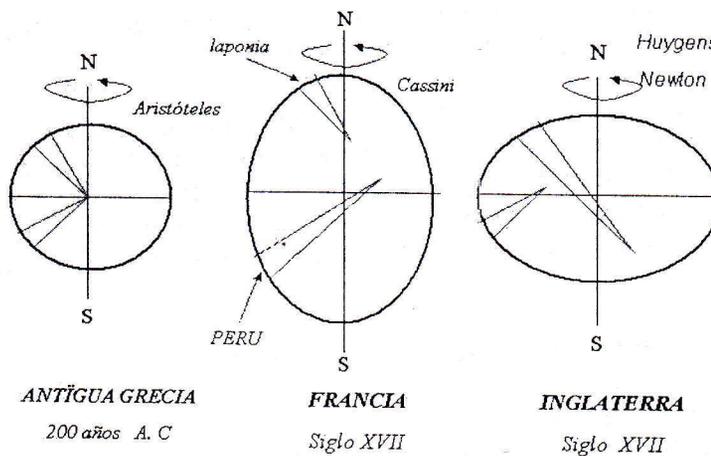
Cuando Cassini calculó el comportamiento de un grado en ambas partes, encontró que el comportamiento de un grado en la parte norte el arco era más corto que en la parte sur. Este resultado inesperado había sido causado solamente por un formato de huevo muy distinto a uno esférico de la tierra, o quizá por errores involucrados en las observaciones.

Estos descubrimientos dieron inicio de inmediato a una controversia entre científicos ingleses y franceses. Los ingleses afirmaban por su parte que la tierra debería ser achatada hacia los polos, con base en las demostraciones teóricas de una de las teorías de Newton relacionadas con el movimiento de rotación terrestre y la fuerza centrífuga, las cuales recapituló y calculó Huygens, mientras que los franceses defendían sus propias mediciones y estaban inclinados a considerar la tierra con una forma o formato parecido al de un huevo girando en su máximo eje (en sentido vertical).



Para resolver esta controversia de una vez por todas, la Academia Francesa de Ciencias envió una expedición geodésica al Perú en 1735, con el objeto de medir el comportamiento de un grado de meridiano próximo al paralelo del Ecuador, y otra expedición a Lapónia, próxima al círculo ártico. Una vez se adelantó esta tarea tan gigantesca, las medidas probaron de manera concluyente que la tierra es achatada hacia los polos como Newton lo había predicho, por el hecho que el arco en superficie medido en Laponia fue mucho mayor que aquel que se midió en el Perú. La evolución de la concepción acerca de la forma de la tierra se ilustra en la figura 1.

Figura 1. Evolución de la concepción acerca de la forma de la tierra

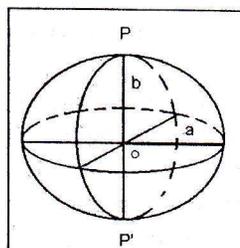


Viendo como todos los cálculos necesarios para un levantamiento geodésico son realizados en términos de una superficie matemática (o elipsoide de referencia), semejante a la forma de la tierra, estas conclusiones fueron muy importantes.

1.1 EL ELIPSOIDE

Como la tierra de hecho es levemente achatada hacia los polos y algo dilatada hacia el Ecuador, para una mayor aproximación de su forma, la figura geométrica usada en geodesia es el elipsoide de revolución. Esta es una figura geométrica generada por la rotación de un disco ovalado o una elipse en torno a su eje más corto. (figura 2).

Figura 2. El Elipsoide de revolución



- a = semieje mayor
- b = semieje menor
- PP' = eje de revolución
- A = achatamiento polar
- $A = a - b / a$



Un elipsoide o esferoide de revolución es definido por la especificación de sus dimensiones. Los geodestas por convención, usan el semieje mayor o de achatamiento designado por la letra **a** y el semieje menor con la letra **b**, el cual hace parte del eje de rotación p-p. La forma del elipsoide está dada por el achatamiento **f**, que indica cuando un elipsoide se aproxima o se aleja de la forma esférica.

El elipsoide se emplea para hacer una aproximación a la forma de la tierra, además es usado como base para la definición de una cuadrícula de coordenadas de acuerdo con una proyección cartográfica.

En el mundo , cada país o sector de un continente ha creado y acomodado un elipsoide de acuerdo a su posición en el globo . Esta superficie de referencia se usa entonces para trabajos geodésicos y topográficos, además de elaborar su cartografía. Es así como existen cerca de 30 figuras diferentes. Algunas de ellas se muestran en la tabla 1.

Además de elegir las dimensiones y forma del elipsoide, es necesario determinar la orientación apropiada del mismo con respecto a la Tierra. En general el eje de rotación se toma paralelo al eje de giro de la Tierra y el centro del elipsoide en coincidencia con el centro de gravedad de la misma.

En 1924 un grupo de países acordó utilizar el llamado Elipsoide Internacional como Elipsoide de referencia, sin embargo a pesar de su aceptación pocos son los países que lo utilizan. La mayor dificultad radica en el gran trabajo requerido para pasar de un sistema a otro(Deagostini, 1979).

Colombia en particular, eligió técnicamente en el año de 1942 a través del Instituto geográfico Agustín Codazzi IGAC, el elipsoide internacional o de Hayford, el cual sirvió como fundamento o armazón geodésico para hacer las mediciones en el territorio nacional y elaborar con ello la cartografía necesaria para su desarrollo. En este sentido, se estructuró dicha figura elipsoidal haciéndola coincidir con la superficie de la ciudad de Bogotá, junto con los parámetros de una red geodésica nacional para generar el *datum* Bogotá.

Tabla 1. Algunos elipsoides de referencia utilizados en el mundo

Elipsoide	año	longitud (metros)		Achatamiento	uso local
		semieje a	semieje b		
WGS 84	1984	6.378.137	6.356.752,3	1/298.257	universal
GRS 80	1980	6.378.137	6.356.752,3	1 / 298.257	U.S. A
WGS 72	1972	6.378.135	6.356.750,5	1 / 298.26	U.S. A
Krasousky	1940	6.378.245	6.356.863,0	1 / 298.30	RUSIA
Internacional	1924	6.378.388	6.356.911,9	1 / 297	Colombia, Europa
Clarke 80	1880	6.378.249	6.356.514, 9	1 / 293,46	Norte América
Clarke 66	1866	6.378.206,4	6.356.514,8	1 / 294,98	África
Bessel	1841	6.377.397,2	6.356.079, 0	1 / 299,15	Japón y Asia

Fuente: Deagostini, 1979



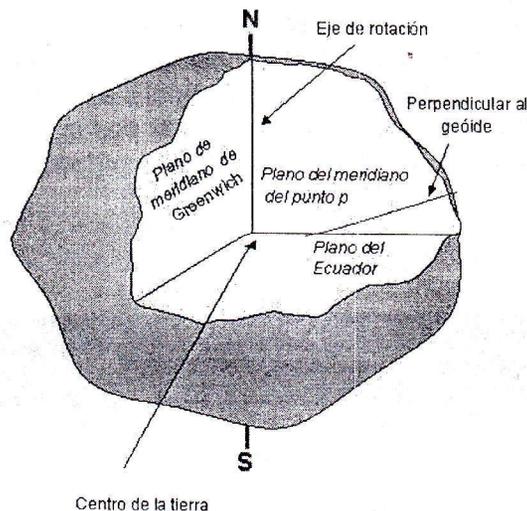
1.2 EL GEOIDE

Las irregularidades que presenta la superficie topográfica real son sumamente pequeñas comparadas con el tamaño y volumen total de la tierra. Sin embargo, esta superficie aparente es de gran importancia para el geodesta, el topógrafo y el hidrólogo, ya que sobre esta superficie realiza sus mediciones, estudios para determinar la influencia de los accidentes del terreno sobre la fuerza de gravedad.

Debido a estos accidentes e irregularidades, la superficie de la Tierra no tiene una forma sencilla de expresar en términos matemáticos, por esta razón las mediciones se hacen sobre la superficie topográfica y los cálculos ejecutados sobre un elipsoide de referencia ya comentado.

Para el caso de los cálculos que tienen que ver con las diferencias de altura en el planeta, los geodestas se dieron a la tarea de crear el geóide. Esta es una figura que coincide con la superficie de los océanos con una prolongación imaginaria a través de los continentes, utilizando una línea equipotencial con respecto a la fuerza de la gravedad. Esta línea a su vez, esta sujeta al efecto combinado de fuerza de atracción de masas y a la fuerza centrífuga debida a la fuerza de rotación de la tierra. Como la densidad de los materiales de los cuales está compuestos los continentes e islas en la tierra es diferente (rocas, petróleo, cavernas, depósitos de agua subterránea entre otros) el geóide generado tiene una superficie más irregular que el elipsoide, pero a la vez mas regular que la superficie topográfica o aparente (ver figura 3).

Figura 3. El geóide



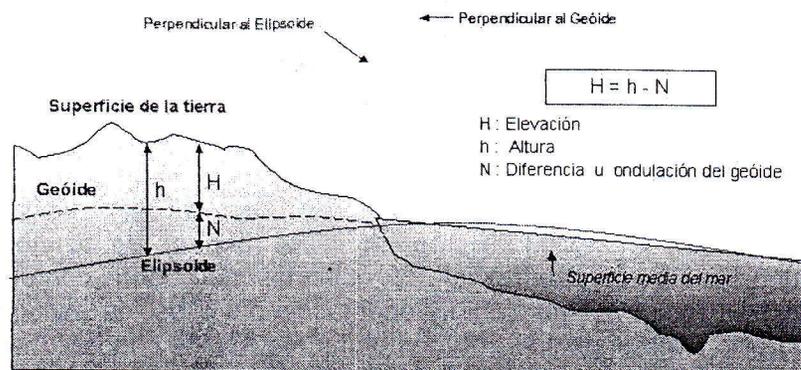
El Geóide es en resumen la forma de una superficie en que el potencial de la gravedad es constante en cada uno de los puntos. Las dos características más importantes del Geóide son:



- El potencial gravimétrico es el mismo en todos los puntos.
- La dirección de la gravedad es perpendicular al Geoide.

Como el elipsoide es una superficie regular y el Geoide una superficie irregular, ambas superficies no coinciden (ver figura 4).

Figura 4. Relación entre el geoide y el elipsoide



El ángulo formado por las normales al Geoide y al Elipsoide en un punto se conoce con el nombre de desviación de la vertical en dicho punto.

La separación entre el Geoide y el Elipsoide se denomina ondulación del Geoide y de acuerdo a diversos autores esta separación puede llegar a ser de 150 metros.

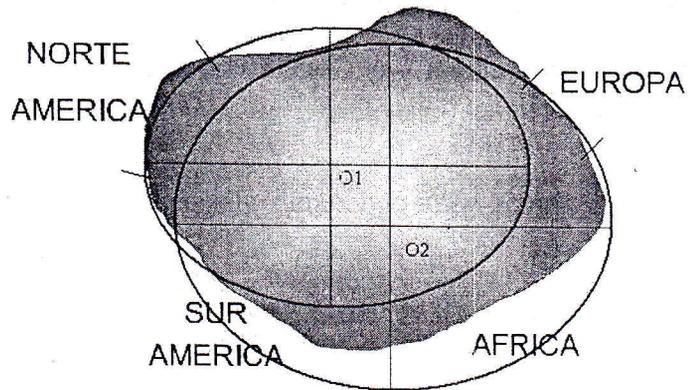
Para la medición de la superficie terrestre, en los trabajos geodésicos, los ángulos, distancias y diferencias de altura medidas sobre la superficie física de la Tierra deben ser proyectados sobre el Geoide a fin de calcular las propiedades del Elipsoide (Deagostini, 1970).

El geoide con sus irregularidades ascendentes y descendentes, hace pensar en una figura parecida a una papa. Ahora bien, para cada país la combinación del elipsoide con el geoide, este último uno solo en realidad, se hace ajustando una figura elipsoidal en cuanto a su tamaño y rotación para hacerla coincidir tangencialmente con el territorio de interés. En la figura 5 se presenta un elipsoide 01 que se ajusta muy bien por ejemplo, en Norte América, pero no necesariamente se ajusta bien en Europa. Por el contrario, el elipsoide 02 se ajusta muy bien a Europa, pero no a Norte América y África. Esto hecho, explica en parte el porque se han adoptado varios elipsoides de referencia en el mundo.

Para mediar esta variedad de opciones, fue diseñado por los Estados Unidos el elipsoide WGS84 para unificar este criterio en un solo elipsoide global, en el cual coincide, el centro de esta figura con el centro de atracción de masas.



Figura 5. El geoide y dos elipsoides de referencia



1.3 DÁTUM

El dátum consiste en la latitud y longitud de un punto inicial (origen); del azimut de una línea (dirección); de una serie de parámetros que conectan las mediciones con el sistema de referencia tales como : radio, achatamiento y orientación del elipsoide escogido para los cálculos; y la separación con el geoide. Para entender mejor este concepto, se puede emplear una expresión mediante la ecuación:

$$\text{DATUM} = \text{Elipsoide de referencia} + \text{red geodésica}$$

El primer elemento de la formula es el tamaño y forma del elipsoide de referencia, el cual hace una aproximación simple de la forma de la tierra, usado como base para dibujar la grilla en la proyección de un mapa. De otro lado La red de control o red geodésica es local, y se compone de una serie de puntos de control o marcas terrestres cuyas coordenadas: latitud, longitud y altura se determinan de forma muy precisa. esto permite finalmente ajustarse mejor a la superficie a cartografiar.

Para el caso colombiano la expresión sería así:

$$\text{Datum Bogotá} = \text{Elipsoide Internacional} + \text{ARENA}$$

La sigla ARENA traduce: antigua red geodésica nacional.

Los puntos geodésicos están materializados como mojones o placas con características previamente definidas según sean de primero, segundo o tercer orden. Estos sirven como apoyo para determinar la posición en otros puntos de una zona. Si el punto geodésico tiene información solamente acerca de la elevación, este será útil para levantamientos altimétricos pero no para levantamientos planimétricos. Estos puntos de control se han



chequeado, ajustado e integrado en una red geodésica en cada país con su propio sistema de referencia.

Las redes geodésicas se usan para dar una posición geográfica precisa a las vías, viviendas y otros objetos mediante los levantamientos geodésicos y medidos con instrumentos tradicionales o con complicadas lecturas de las estrellas o del sol. Actualmente estos se leen también con GPS obteniendo una mayor precisión.

El primer datum oficial en los Estados Unidos fue el datum de Inglaterra de 1879. De ese tiempo acá, el mejoramiento en las mediciones ha permitido tener ahora mayor precisión de los datum. El datum de Norte América de 1983 (NAD83) es más reciente.

Para el ámbito suramericano se tienen los datum de:

- Canoas, en Venezuela (PSAD 56)
- Chua, Brasil (SAD 69)
- Bogotá, Colombia.
- Campo Inchauspe, Argentina.

Los valores de las coordenadas cambian cuando se cambia el datum. Por ejemplo las coordenadas de un mismo punto geodésico en Redlands en California Estados Unidos, presentan la siguientes variaciones:

NAD 83 : 117° 12' 57".75961 de longitud W y 34° 01' 43".77884 de latitud N

NAD 27: 117° 12' 54".61539 de longitud W y 34° 01' 43".72995 de latitud N

La diferencia de las lecturas es en este caso de : LONGITUD : 3 SEGUNDOS = 92.4 metros y LATITUD: 0.05 SEGUNDOS = 1.54 metros.

El hecho de elegir un datum diferente, hace que las cartografías de países limítrofes no coincidan ni empalmen perfectamente, es así como las coordenadas geográficas de los puntos fronterizos de Colombia con los países vecinos, difieren en 19"5 de longitud y 1"3 de latitud, debido a que Colombia no tomó el datum para Sudamérica (Canoas), y los demás sí lo adoptaron en el levantamiento cartográfico de sus territorios (IGAC, 1991).

En este sentido con la introducción y difusión del GPS, las lecturas no siempre coinciden con la cartografía ya que como en el caso de Colombia, sus cartas y planos análogos hasta el año 2000 se elaboraban teniendo en cuenta el datum Bogota, mientras que el GPS viene calibrado con el datum WGS 84. Ante esta situación, el IGAC a través de la Resolución No. 068 de enero 28 de 2005 emanada de la Dirección General, adoptó como sistema de referencia nacional único el Marco Geocéntrico de Referencia Nacional – MAGNA SIRGAS.

Este sistema es compatible con las tecnologías modernas de posicionamiento (GPS), y facilita el intercambio de información georreferenciada entre los productores y usuarios de la misma en diversos sectores. En este sentido, el IGAC ha producido una serie de



documentos e instructivos, destinados a los usuarios que deseen migrar con ayuda de un SIG coordenadas planas, geográficas y cartesianas desde el antiguo datum Bogota y con el cual se elaboró la cartografía análoga desde el año 1942, al nuevo datum MAGNA SIRGAS. Además de esto, próximamente se dará de manera gratuita el programa MAGNAPRO con el cual se pueden transformar puntos y archivos entre estos dos sistemas de referencia.

En la actualidad, la Red MAGNA – SIRGAS está compuesta por 60 estaciones monumentadas de primer orden de precisión, que deben ser actualizadas cada 3 años para determinar la velocidad de cambio de las coordenadas a causa del movimiento de la placas tectónicas, y por cerca de 10 estaciones permanentes ubicadas en las ciudades capitales que tienen recepción automática y continua de datos, por lo cual no requieren de actualización.

De otro lado, el datum renueva ahora con el avance de la tecnología su importancia, ya que por ejemplo los SIG integran mapas, imágenes, y datos obtenidos de varias fuentes. Es posible que en un proyecto se tenga que trabajar con mapas basados en diferentes proyecciones utilizando también diferentes datum. Es importante entonces hacer un análisis previo de todos los datos, ya que estos deben estar en igual sistema de proyección y en el mismo datum, para que los elementos coincidan con su verdadera posición, de lo contrario se puede llegar al fracaso por errores en exactitud posicional.

En resumen, la nueva expresión que se utilizó anteriormente quedaría de la siguiente manera:

$$\text{Datum MAGNA-SIRGAS} = \text{Elipsoide GRS-80} + \text{MAGNA}$$

El elipsoide GRS-80 tiene las mismas especificaciones que el elipsoide WGS-84 (ver tabla 1) de tal manera que su uso práctico es el mismo. De otro lado, MAGNA traduce: nueva red geodésica nacional.