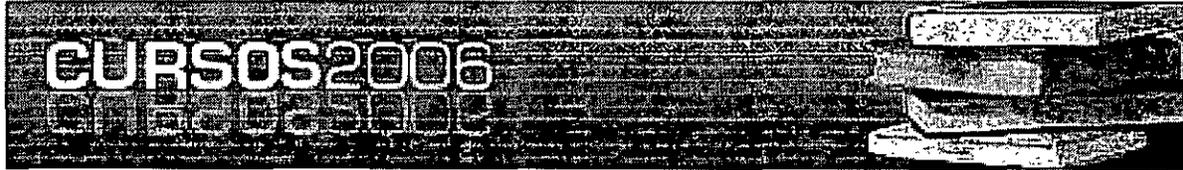


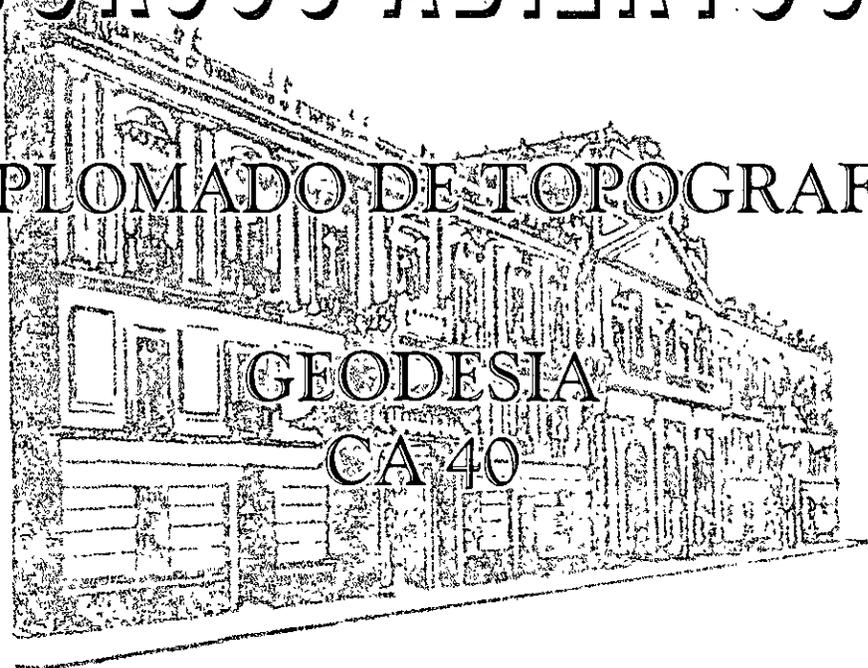


FACULTAD DE INGENIERÍA UNAM
DIVISIÓN DE EDUCACIÓN CONTINUA



CURSOS ABIERTOS

DIPLOMADO DE TOPOGRAFÍA



GEODESIA
CA 40

TEMA

GEODESIA

EXPOSITOR: ING. GERMÁN GARCÍA GONZÁLEZ
DEL 24 AL 28 DE ABRIL DE 2006
PALACIO DE MINERÍA

INDICE

- ANTECEDENTES
- MARCO HISTÓRICO CONTEMPORÁNEO
- LA TIERRA, SU TAMAÑO Y SU FORMA
- FORMA ACTUAL DE LA FIGURA DE LA TIERRA
- EL GEOIDE COMO FIGURA DE LA TIERRA
- EL ELIPSOIDE DE REVOLUCIÓN COMO FIGURA DE LA TIERRA
- OTRAS FIGURAS MATEMÁTICAS COMO FIGURAS DE LA TIERRA
- RELACIÓN GEOIDE-ELIPSOIDE
- APLICACIONES DE LA GEODESIA
- EL POSICIONAMIENTO GEODÉSICO
- DESARROLLO DE LA GEODESIA
- EL SISTEMA DE POSICIONAMIENTO GLOBAL
- SISTEMAS DE REFERENCIA
- SISTEMAS Y MARCOS DE REFERENCIA
- EL SERVICIO INTERNACIONAL DE ROTACIÓN DE LA TIERRA.
- EL MARCO INTERNACIONAL DE REFERENCIA TERRESTRE ITRF2000
- SISTEMA GEODÉSICO MUNDIAL 1984 (WGS84)

ANTECEDENTES

La palabra **Geodesia** proviene de la palabra griega GEO que significa Tierra y DESIA que significa división así que su significado es *división de la Tierra*, y la Geodesia como ciencia estudia la forma, dimensiones de la Tierra y el campo de gravedad asociado.

Webster define la geodesia como "rama de las matemática aplicada que determina por la observación y medida las posiciones exactas de puntos, la forma y tamaño de la Tierra, y las variaciones de gravedad".

GEODESIA: es la ciencia que estudia la figura, dimensiones y superficie de la Tierra, así como las deformaciones que ésta sufre, para lo cual hace uso de métodos precisos de mediciones.

Geodesia: es la disciplina que trata de la medida y representación de la Tierra, incluyendo su campo de gravedad, en un espacio tridimensional variable en el tiempo.

Objetivos de la Geodesia.

- ❖ Determinar la posición absoluta respecto a un sistema de coordenadas, o la posición relativa respecto a otros puntos. Esta determinación requiere de la definición de un espacio geométrico, donde definir los sistemas de coordenadas.
- ❖ Determinación del campo de gravedad Terrestre, necesario si se quieren relacionar las medidas realizadas en el espacio físico, afectadas de gravedad, con el espacio geométrico en que se define el concepto de posición.
- ❖ Estudio de las variaciones temporales, tanto de la posición como del campo de gravedad. Estas variaciones pueden tener su origen en muy diversas causas, tales como mareas, movimientos tectónicos, deformaciones de la corteza terrestre, etc.

La geodesia consiste en el estudio de la figura y cambio gravitacional exterior de la Tierra.

Las dimensiones y formas de una cierta figura típica, la cual represente totalmente a la figura de la Tierra (*elipsoide terrestre*).

La verdadera figura de la Tierra es la superficie física resultante de una serie de fuerzas que actúan sobre su masa total, incluida su atmósfera. Este estudio es muy importante, ya que todas las medidas que se realicen desde la Tierra o desde sus proximidades están influidas por la gravedad. Se considera como figura de la Tierra una figura dinámica denominada *Geoide*.

Dentro del marco de la mecánica celeste, la Tierra es un cuerpo inmenso en el sistema solar, que se encuentra sometido a una rotación diaria y a la atracción del sol y de los demás cuerpos del sistema solar. En estas condiciones la Tierra describe una órbita que compensa en cierto modo tales atracciones, por ello, podemos considerar que un punto sobre la superficie terrestre queda sometido, casi exclusivamente, a la atracción de nuestro planeta y a la fuerza centrífuga derivada de su rotación.

Para poder estudiar estos fenómenos que afecta a la Tierra se toma como figura representativa a la esfera ya que esta es una figura de equilibrio para una masa homogénea en reposo, siendo el único movimiento posible para una masa homogénea que se mueve como un sólido, el de una rotación uniforme alrededor de uno de sus ejes principales de inercia. Ya que una pequeña rotación produce un achatamiento de la forma esférica, nos lleva a considerar que la Tierra tiene una figura de equilibrio dada por un elipsoide de revolución, ligeramente achatado en los polos, que gira alrededor de un eje que pasa aproximadamente por los polos. La Tierra no es un cuerpo rígido y homogéneo. La existencia de mareas tanto oceánicas como terrestres y atmosféricas, todas estas son

debidas a la atracción gravitatoria que ejercen sobre la superficie terrestre, principalmente el Sol por su gran masa y la Luna por su cercanía a la Tierra.

A considerar la superficie de equilibrio o equipotencial, la que determinan los océanos, prescindiendo del efecto perturbador de las mareas. Denominaremos entonces *geoide* a la superficie dada por el nivel medio de los océanos, siendo esta superficie la que utilizaremos como referencia para definir la altitud de un punto sobre la Tierra.

Por lo que encontramos dos superficies fundamentales de referencia, el Elipsoide y el Geoide.

En la práctica, la geodesia usa los principios de matemática, astronomía y físicas, y los aplica dentro de las capacidades de ingeniería moderna y tecnología nueva que ha surgido con el avance en la puesta en orbita de satélites artificiales.

La geodesia consiste en la elaboración de las redes de apoyo astrónomo – geodésico nacional, cósmico – geodésico nacional y de la red nacional de nivelación con el fin de servir de base para los levantamientos topográficos, fotogramétricos y cartográficos.

Elaboración de los métodos más efectivos, aparatos e instrumentos para las mediciones realizadas con fines de elaborar las redes nacionales astrónomo – geodésica, cósmico – geodesia y la red nacional de nivelación.

Elaboración de los métodos más efectivos del procesamiento matemático de los resultados de las mediciones y de la introducción de todo el territorio nacional en un sistema único de coordenadas y alturas.

Elaboración científica de un programa fundamental y de una organización científica de trabajo para la elaboración de las redes nacionales: astrónomo – geodésica, cósmico – geodésica y de nivelación, que satisfagan la posibilidad de dar utilización científica a los planteamientos de los trabajos topográficos y aerofotolevantamientos generales en un sistema único de coordenadas y alturas.

La red nacional astrónomo – geodésica en combinación con la red nacional cósmico – geodésica y la red de nivelación sirven no sólo de base para el levantamiento general y cartografía del país en su totalidad, sino que simultáneamente sirve de base geodésica o contribuye en la elaboración de una base geodésica especial para medidas diversas, las cuales se efectúan en diferentes campos de la economía nacional.

La elaboración de las redes astrónomo – geodésica, cósmico – geodésica y la red de nivelación representa la base para la realización de los levantamientos topográficos y cartográficos del país, y también para mediciones diversas que se ejecutan en las superficie de la Tierra con fines de apoyar tareas de la economía nacional y de la seguridad y defensa del país. Simultáneamente, esta misma red conjuntamente con los resultados de mediciones de alta precisión (geodésicas, astronómicas y gravimétricas) es indispensable para la solución de problemas científicos de la geodesia en el estudio de la figura de la Tierra, en el establecimiento y determinación de su forma y dimensiones, en el estudio de las deformaciones horizontales y verticales de la corteza terrestre.

Es por eso que la geodesia tiene una fuerte conexión con la teoría de las probabilidades, teoría de los mínimos cuadrados, la geodesia además tiene también relación con la técnica de la computación. Con la matemáticas nace del procesamiento científico de las mediciones geodésica general, las cuales se efectúan sobre la complicada superficie física de la Tierra. En la geodesia se trata el problema matemático relacionado con la elección de la superficie única de referencia (elipsoide terrestre), para utilizarla en la realización de todos los cálculos geodésicos en un sistema único de coordenadas.

MARCO HISTÓRICO CONTEMPORÁNEO.

A mediados del siglo XX, tras la Segunda Guerra Mundial, el avance tecnológico y la llegada posterior de los ordenadores abren nuevos horizontes a problemas que eran inimaginables en épocas pasadas, por la gran cantidad de cálculos que implicaban. Durante muchos años se habían preferido

la medida de ángulos por ser más precisa que la de distancia, y más fácilmente obtenibles; con el desarrollo de la medida electromagnética esto ya no es un problema. Pero sin duda el gran paso se dio con la puesta en órbita de los satélites artificiales, que permite por vez primera usar objetos fuera de la Tierra para poder conectar puntos no inter visibles, y así poder crear una red de puntos mundial. Al mismo tiempo los satélites, en baja órbita, se utilizan para el estudio del campo de gravedad, por observación directa del movimiento del satélite en ese campo. La facilidad y la precisión en la obtención de la posición, y el campo de gravedad, abre nuevas aplicaciones a la Geodesia y también nuevos problemas, ya que aspectos antes considerados despreciables hoy deben tenerse en cuenta, al mismo tiempo el uso que se puede hacer de la Geodesia se extiende a otras ciencias tales como Oceanografía, Astronomía, Geofísica. En relación a esta última ciencia es muy destacable el aporte de la Geodesia, que con su alta precisión ha podido medir el movimiento de las placas tectónicas, confirmando así una teoría difícil de probar. Por último mencionar la expansión de la Geodesia al medio marino, la exploración y explotación de los recursos del fondo marino presenta una nueva tarea para la geodesia: dar posición precisa a lugares en el mar, tanto si esto son estacionarios como si están en movimiento.

LA TIERRA, SU TAMAÑO Y SU FORMA

La determinación del tamaño y forma de la Tierra, es uno de los objetivos de la Geodesia. Cuando hablamos de la figura de la Tierra normalmente se toma un modelo de sólido rígido. La variación en el tiempo de esta figura se considera como una perturbación a este modelo y se estudia por separado. En geodesia nos podemos encontrar con cuatro tipos diferentes de superficie:

1. La superficie física o topográfica incluidos los fondos marinos. Es una figura muy complicada para trabajar con ella, es el TERRENO.
2. La superficie como resultado de fuerzas físicas actuando sobre la masa total terrestre, incluida su atmósfera. También complicado trabajar con ella, es el GEOIDE.
3. La figura matemática que más se aproxime y sobre la cuál se pueda definir una geometría. Aquí es más fácil trabajar, es el ELIPSOIDE.
4. Otras superficies matemáticas más complejas útiles para resolver otros problemas geodésicos, el TELUROIDE.

FORMA ACTUAL DE LA FIGURA DE LA TIERRA.

En la actualidad, el 72% de la superficie de la tierra está cubierta de agua. Cuando se habla del terreno habitualmente se hace referencia al 28% de la superficie de la Tierra, pero la Geodesia pretende describir también los fondos marinos, y la superficie de los mares.

Para describir el terreno matemáticamente se pueden elegir un número finito de puntos representativos de él y dar sus posiciones en un sistema de coordenadas. Una red de puntos así es una representación física de la superficie. Tradicionalmente estas redes geodésicas, se construyen y las hay de distintas categorías, dependiendo de cómo se definan los puntos que la forman.

Las redes de puntos definidas sólo con una coordenada; altura sobre el nivel del mar (H), se denominan redes geodésicas altimétricas o verticales. Las definidas con dos coordenadas, latitud y longitud (ϕ, λ), se denominan redes geodésicas horizontales. Esta separación en redes horizontales y verticales se debe a que en el pasado era más fácil determinarlas por separado, pues se requerían distintos tipos de observaciones. Por último las redes tridimensionales definen sus puntos con tres

coordenadas (x, y, z) en un cierto sistema de referencia.

Las redes geodésicas altimétricas, están divididas en diferentes ordenes, según la exactitud con que se han calculado y la distancia entre sus puntos. Esta distancia varía de unos países a otros pero la media es de 1-2 Km. para las de orden superior, llamadas de *primer orden*.

El valor de H para los puntos de la red está dado respecto al nivel medio del mar, o más precisamente respecto al geode, que en este contexto se denomina *datum geodésico vertical*. Las alturas de los millones de puntos de una red altimétrica han sido todas tomadas sobre la superficie de la Tierra, no existe ninguna en los fondos marinos. La precisión general, llamada absoluta, de una red de primer orden está por debajo del metro, aunque para dos puntos adyacentes la precisión sea mayor. La desviación estándar σ en las medidas de H depende de la distancia ya que el error entre dos estaciones se propaga al resto de la red. Una medida de esta desviación viene dada por la siguiente fórmula empírica (NASA 1973):

$$\sigma_H = 1.8 \times 10^{-3} S^{2/3} \text{ dado en metros, donde S es la distancia en Km.}$$

Las redes geodésicas horizontales están formadas por puntos para los que se han determinado coordenadas geodésicas elipsoidales ϕ, λ . Estas coordenadas están referidas a un elipsoide particular que en este contexto se denomina *datum geodésico horizontal*. Esta posición puede darse en cualquier otro sistema de coordenadas de dos dimensiones, tales como las coordenadas sobre un plano, siempre que conozcamos la relación entre el elipsoide y el plano. En Geodesia normalmente se usan proyecciones conformes (conservan los ángulos) del elipsoide al plano. Las H de los puntos de la red horizontal se determinan sólo aproximadamente y no en todos los puntos.

Las redes horizontales también se dividen en redes de diferente orden de acuerdo con la precisión de las observaciones. Este orden varía de unos países a otros. Como en las altimétricas, el orden también se refleja en la distancia entre sus puntos. Las redes de primer orden están formadas por puntos muy alejados ya medida que la densidad de los puntos aumenta el orden de la red disminuye. La limitación en distancia para las redes de primer orden viene dada por la limitación que impone la inter visibilidad de los puntos, siempre que hablemos de técnicas de observaciones terrestres. Esta limitación desaparece con las técnicas de la Geodesia espacial que usa satélites u observaciones a objetos celestes.

Las redes de primer orden tienen una precisión relativa, es decir entre puntos adyacentes, del orden de 10 cm. Para puntos distantes 10 Km., como en las redes los errores de observación se acumulan y propagan, inevitablemente la precisión absoluta siempre es peor que la relativa, y se puede dar como fórmula empírica la siguiente (SIMMONS 1950.EEUU)

$$\sigma_H = 4 \times 10^{-2} S^{2/3} \text{ dado en metros, donde S es la distancia en Km.}$$

Esta fórmula al ser empírica es válida para la red con que se ha calculado pues otras redes observadas y calculadas por otras técnicas pueden usar fórmulas diferentes. Hoy día existen redes más precisas de orden inferior a uno y calculadas con técnicas de Interferometría de muy larga base (VLBI).

Las redes horizontales existentes tienen aún hoy grandes zonas vacías (desiertos y selvas), y están referidas a diferentes elipsoides (cada país usa uno que más se ajuste a su zona), cuya posición mutua es poco conocida. Por eso estas redes tienen poco valor sobre la forma y dimensiones de la Tierra en conjunto.

Ninguno de los dos tipos de redes vistos puede representar por si sola la figura de la Tierra, pero además tienen otro problema, y es que los puntos de unas y otras no son los mismos, pues los puntos convenientes para una red horizontal, puntos elevados, no suelen serlo para una red altimétrica (vías naturales).

Parece natural trabajar entonces con *redes tridimensionales* y esto se puede conseguir de dos formas:

1. Considerando la posición horizontal (ϕ, λ) y la vertical (H), para obtener un sistema de tres coordenadas (ϕ, λ, H) o sus equivalentes (x, y, z) obtenidas mediante alguna

transformación.

2. Uso de técnicas para obtener directamente las coordenadas tridimensionales. Tradicionalmente las redes geodésicas de cualquier tipo han estado limitadas a la superficie emergida de la Tierra, tanto por falta de tecnología como por falta de motivación.

Actualmente la tecnología permite incluir los fondos marinos que por otra parte es necesario conocer para navegación hidrografía, oceanografía, etc.

Esta forma de representar la tierra mediante una colección de puntos, es una forma discreta, para algunos propósitos es necesario considerar la figura de la tierra expresada a través de una fórmula matemática, es decir una representación continua de la superficie de la Tierra. Dada su complejidad es necesario el uso de largas series de funciones que nos permitan aproximarnos poco a poco a la forma real, esto nos llevará hacia los modelos de Tierra y campo de gravedad.

EI GEOIDE COMO FIGURA DE LA TIERRA.

Se denomina **GEOIDE** a un cuerpo geométrico limitado. La superficie del geoide en todos sus puntos está ligada fuertemente con la dirección de la fuerza de gravedad.

El geoide es una superficie definida físicamente, como una superficie equipotencial que sirve para representar la figura de la Tierra. Podemos imaginarlo si la Tierra estuviera toda cubierta de agua, teóricamente la superficie de ese mar podría tener potencial constante, puesto que el agua puede fluir si hubiera diferencia de alturas. En realidad tampoco sería así debido a la variación de la temperatura marina, la salinidad y las corrientes. El geoide describe así la superficie de una Tierra cubierta de agua. Por supuesto la superficie del mar es menos estable que la de la tierra, y está influenciada por fenómenos de mareas; debe considerarse el geoide como la superficie del nivel medio del mar. De la observación del mar se puede deducir que aunque puede variar a lo largo del día del orden de metros, la media mensual lo hace sólo del orden de dm. y la media anual tiene solo una variación de 10 cm. El nivel medio del mar se define entonces como la media de la superficie del mar durante un largo periodo de tiempo. Las estaciones costeras con mareógrafos contribuyen a hacer esta determinación. El centro del geoide coincide con el centro de masas de la Tierra.

De forma similar a lo dicho para la figura real de la Tierra, el Geoide puede obtenerse con una serie discreta de puntos, donde se ha calculado el potencial, o de forma continua en términos de una fórmula matemática. Dada su complejidad sólo una serie de funciones infinita pueden describirlo exactamente.

Sin embargo la figura del geoide relativa a un elipsoide de referencia puede determinarse bastante exactamente (1,2 m) en regiones donde se tienen bastantes medidas como es Europa, Norte América, o Australia.

El geoide es la superficie de referencia para las redes altimétricas. Para las redes horizontales la superficie de referencia debe ser menos compleja que el Geoide, por eso no se usa, aunque existe una versión simplificada del geoide, que consiste en tomar sólo los primeros términos de la fórmula matemática infinita que lo describe. De esta forma se obtienen superficies más simples denominadas esferoides, pero siguen siendo más complejas que el elipsoide.

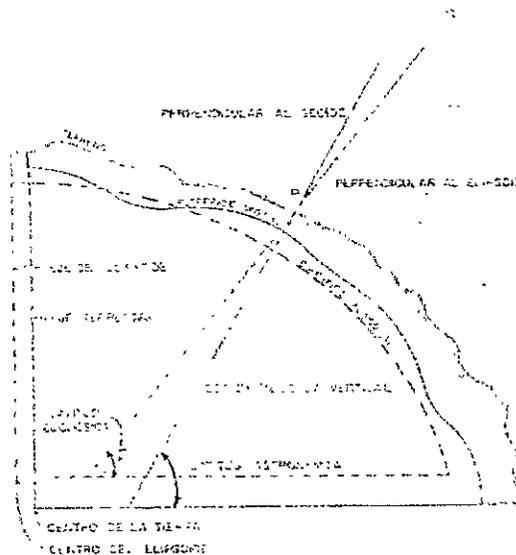
Las mediciones geodésicas se ejecutan sobre una complicada superficie física de la Tierra

Coordenadas de los puntos de la red geodésica, las cuales son referidas a cierta superficie de la tierra determinada matemáticamente (superficie del elipsoide terrestre).

Altura de los puntos referidos a una superficie inicial (cerca de la superficie de los mares y océanos).

La longitud y azimut de las líneas geodésicas entre puntos de la superficie terrestre, los cuales se encuentran en lugares diferentes y mucho muy lejanos unos de otros.

En función de esto, se presenta la necesidad de dar solución al problema del traslado de las mediciones realizadas directamente en la superficie física de la tierra hacia sus coordenadas geodésicas, y la determinación de las alturas de estos puntos, los cuales son calculados en un sistema determinado y sobre una **superficie de referencia** la cual es el resultado de cálculos matemáticos generalizados. El geode es una superficie a lo largo de que el potencial de gravedad está por todas partes igual y a que la dirección de gravedad siempre es perpendicular. El ángulo entre la línea de plomo que es perpendicular al geode (a veces llamó "el vertical") y el perpendicular al elipsoide (a veces llamó "el normal") está definido como la desviación del vertical. La componente norte-sur de la desviación del vertical



es comprensible que para la geodesia y cartografía, tenga gran importancia el concepto del geode en su aspecto geométrico general e íntegro.

Otra superficie próxima al geode y matemáticamente más simple la constituye un elipsoide de tres ejes, tal que el eje menor coincida con el eje de rotación, y los otros ejes en el plano ecuatorial. Usualmente se define con los 4 parámetros siguientes:

- a) Longitud del semieje mayor a
- b) Aplanamiento polar $f = (a-b)/a$
- c) Aplanamiento ecuatorial $f_e = (a-c)/a$
- d) Longitud geográfica del semieje mayor a .

Este elipsoide respecto del elipsoide de dos ejes, dos ejes ecuatoriales iguales, no difiere mucho

pues el aplanamiento ecuatorial es muy pequeño.

EL ELIPSOIDE DE REVOLUCIÓN COMO FIGURA DE LA TIERRA.

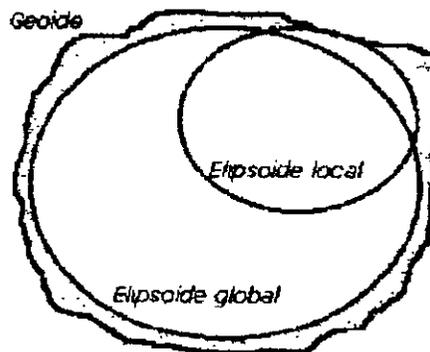
Puesto que los cálculos sobre un elipsoide de tres ejes son más complicados que sobre uno de dos, en la práctica se recurre a esta figura para representar a la tierra. Se considera un elipsoide de revolución entorno al eje de rotación terrestre, de tal forma que las secciones meridianas son elipses y la secciones paralelas circunferencias El problema de encontrar el elipsoide que mejor se ajuste al geode es el problema geodésico clásico, para determinar sus dos parámetros, semieje mayor y aplanamiento (a, f) se han usado distintas técnicas a lo largo de la Historia, en la actualidad el aplanamiento se determina con mucha más exactitud través de las perturbaciones producidas en la órbita de los satélites artificiales que por cualquier método terrestre basado en redes de triangulación. En cuanto al semieje mayor se determina a partir de la medida de distancias en la superficie de la tierra.

Algunos de los elipsoides que aproximan toda la Tierra son los siguientes:

NOMBRE	a Km.	f'	observación
HAYFORD 1924	6378.388	297	Terrestre
IAG 1971	6378.160	298.247	astonomica
WGS84 1984	6378.137	298.257	satélite

Hasta ahora se ha tratado con elipsoides cuyo propósito es que se aproximen lo más posible a la figura de la Tierra, y se ha forzado a que sus ejes fueran coincidentes con los ejes de inercia de la Tierra, por eso se han llamado *elipsoides geocéntricos* pero existen otra familia de elipsoides cuyo propósito no es representar la forma y tamaño dela Tierra sino que sirvan como referencia para datums geodésicos horizontales respecto a los cuales dar coordenadas geodésicas.

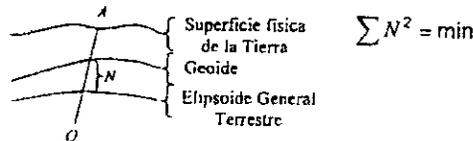
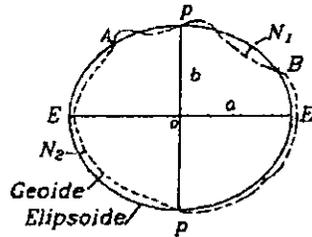
Estos elipsoides de referencia se eligen de forma que aproximen al geode sólo localmente (un continente, un país etc.) y no necesitan ser geocéntricos, pero en esa zona se aproximan mas al geode que un elipsoide geocéntrico, gráficamente seria como se muestra en la figura.



El elipsoide general terrestre se determina como un elipsoide, el cual representa de la mejor manera al geode en una forma integra. La determinación de las dimensiones del elipsoide general terrestre y la orientación de éste en el cuerpo de la tierra deben realizarse bajo las siguientes condiciones:

- ❖ Coincidencia del centro del elipsoide con el centro de gravedad de la tierra, y coincidencia del plano del ecuador del elipsoide con el plano del ecuador terrestre.

- ❖ Igualdad de los volúmenes del elipsoide y geoides.
- ❖ La suma de los cuadrados de la desviación en relación con la altura N de la superficie del geoides con respecto del elipsoide debe ser mínima.

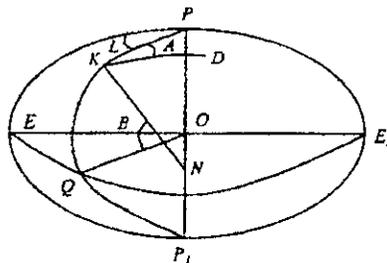


Esta condición establece completamente la cercanía geométrica de la superficie del geoides a la del elipsoide terrestre.

Al elipsoide de dimensiones determinadas y poseedor de una orientación, en el cual sobre su superficie se trasladan los resultados de los trabajos geodésicos y cartográficos de un país o grupo de países, se le denomina elipsoide de referencia.

El elipsoide de referencia debe coincidir lo más posible con el geoides. Por eso en algunas ocasiones cuando el elipsoide, que más se asemeja al geoides de un país se le denomina elipsoide terrestre.

La posición de los puntos de la superficie terrestre sobre la superficie del elipsoide de referencia en la geodesia y en la cartografía se determinan generalmente por las latitudes, longitudes y azimuts geodésicos.



se denomina latitud (φ) del punto K al ángulo agudo B, formado por la normal KN a la superficie del elipsoide de referencia en el punto K y el plano del ecuador EQ_1E_1 .

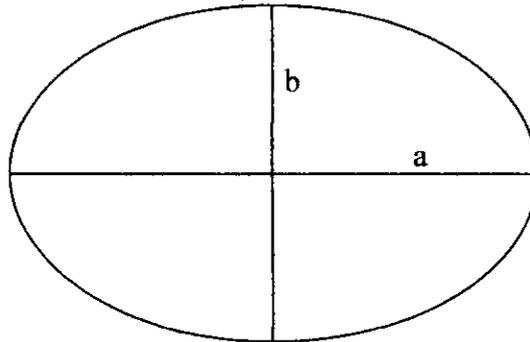
Se denomina longitud geodésica (λ) del punto K al ángulo diedro E_0Q , formado por el plano del meridiano origen Greenwich y el plano del meridiano del punto K.

Se denomina azimut geodésico (α) de la línea que va del punto K a cualquier otro punto D, al ángulo formado por el plano del meridiano geodésico del punto K (PKQP1) con la normal del plano DKN construido en el punto K y obviamente contiene a la normal KN y al punto D.

Se ligan entre sí en un punto dado por medio de la normal al elipsoide de referencia y por medio de los planos normales a este elipsoide.

Evidentemente, que las coordenadas geodésicas se diferencian de las astronómicas como consecuencia de las desviaciones de la superficie del geoide con respecto a la superficie del elipsoide.

Desde que la tierra está de hecho ligeramente chata en los polos y se pandea un poco al ecuador, la figura geométrica usada en la geodesia para aproximar el más casi la forma de la tierra es un elipsoide de revolución. El elipsoide de revolución es la figura que se obtendría girando una elipse sobre su eje más corto.



Un elipsoide de revolución está singularmente definido especificando dos dimensiones.

a = semieje mayor

b = semieje menor

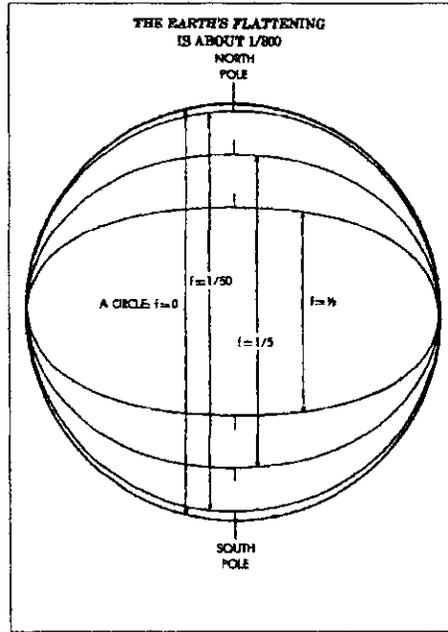


Figure 4

Los elipsoides listados debajo han tenido la utilidad en el trabajo geodésico y muchos todavía están en el uso. Los elipsoides más viejos se nombran para el individuo que derivó los y el año de desarrollo se da. El elipsoide internacional se desarrolló por Hayford en 1910 y adoptó por la Unión Internacional de Geospatial Ciencias División (IUGG) qué lo recomendó para el uso internacional.

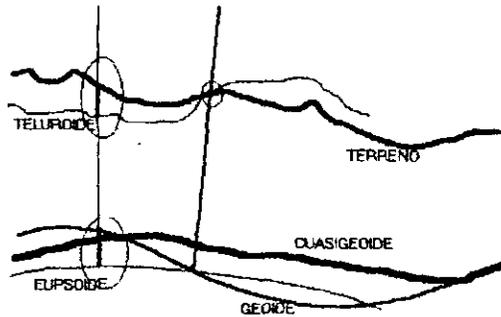
<u>NOMBRE</u>	<u>RADIO ECUATORIAL</u>	<u>ACHATAMIENTO</u>	<u>LUGAR DE USO</u>
Krassowsky (1940)	6,378,245m	1/298.3	La Rusia
Internacional (1924)	6,378,388	1/297	Europa
Clarke (1880)	6,378,249	1/293.46	Francia, Africa,
Clarke (1866)	6,378,206	1/294.98	América del Norte
Bessel (1841)	6,377,397	1/299.15	Japón
Airoso (1830)	6,377,563	1/299.32	El Gran Bretaña
Everest (1830)	6,377,276	1/300.80	India
WGS 66 (1966)	6,378,145	1/298.25	USA
GRS 67 (1967)	6,378,160	1/298.25	Australia, Sud América
WGS 72 (1972)	6,378,135	1/298.26	USA
GRS 80 (1979)	6,378,137	1/298.26	Mundial

Los desarrollos tecnológicos modernos han creado los nuevos y rápidos métodos para la colección de datos y desde el lanzamiento de los primeros sputnik rusos, el datos orbital se ha usado para investigar la teoría de elipticidad.

OTRAS FIGURAS MATEMÁTICAS COMO FIGURA DE LA TIERRA.

La Geodesia moderna utiliza 2 superficies adicionales mas para representar la figura de la Tierra:
TELURODIE: figura diseñada para aproximar al superficie física de la Tierra y se define como aquella superficie cuya altura sobre un elipsoide geocéntrico de referencia es la misma que la altura del terreno sobre el geoide.(Hirnoven 1960)

CUASIGEOIDE: Introducido por Molodenski en 1960, como la solución matemática al geoide. Cuando se calcula el Geoide a través de las alturas sobre el elipsoide, estas alturas se denominan ondulación del Geoide (N), se debe asumir alguna distribución de masas dentro de la Tierra, y esto solo puede modelarse pues no es conocido. El cuasigeoide es la solución obtenida sin ninguna suposición. En este caso la solución encontrada no es N, ondulación del geoide, sino ζ , y se denomina *anomalía de la altitud*, la diferencia entre ambas es que N nunca puede calcularse exactamente y ζ ; es un resultado exacto. El cuasigeoide tiene significado fisico y no es una superficie equipotencial, pero es válido como superficie de referencia para las alturas, de hecho es mas ventajosa que el geoide, dada la dificultad de calcular éste. Por otra parte el cuasigeoide y el geoide coinciden en la superficie del mar donde $N=\zeta$; en general $N-\zeta$; es de pocos metros, pero depende de la superficie del terreno y será mayor en zonas montañosas.

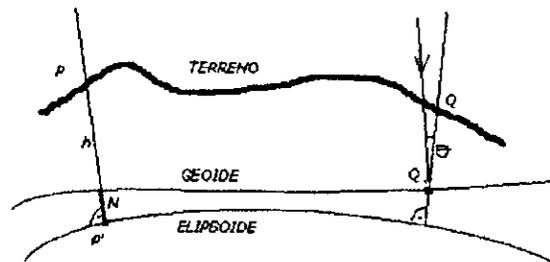


En resumen la diferencia entre todas estas superficies se puede expresar como:

DIFERENCIA		máximo en metros
TERRENO	GEOIDE	10^4
GEOIDE	CUASIGEOIDE	1
GEOIDE	ELIPSOIDE	10^2
TELUROIDE	TERRENO	10^2
ELIPSOIDE 2 EJES	ELIPSOIDE 3 EJES	10^2
ELIPSOIDE	ESFERA	10^4

RELACION GEOIDE y ELIPSOIDE.

La relación entre el elipsoide y el geoide se ilustra en la figura siguiente. La separación a lo largo de la vertical al elipsoide entre el geoide y un elipsoide particular se denomina *ondulación del Geoide* (N). El valor de esta ondulación depende del elipsoide considerado, y para un elipsoide general que aproxime toda la tierra puede llegar a ser de 100 m. La relación geométrica entre la ondulación del Geoide, la altura elipsoidal y la altura ortométrica, es aproximadamente $N+H=h$. El ángulo entre la dirección normal al elipsoide y la dirección de la línea de la plomada, se denomina *desviación de la vertical* (θ), cuando se define un elipsoide para aproximar al figura de la Tierra, este se elige de forma que las desviaciones de la vertical sean mínimas, y así se consigue que el elipsoide se ajuste lo mas posible, si elipsoide y Geoide son tangentes en algún punto en ese punto las desviaciones serán nulas y la ondulación también.



APLICACIONES DE LA GEODESIA

Clásicamente, la Geodesia, sus técnicas y medidas han sido la herramienta para situar los lugares de la Tierra unos con respecto a otros, lo que hoy día llamamos *posicionamiento relativo*. Las redes de puntos así formadas, conocidas como *redes de Triangulación* eran la base para la construcción de mapas. Hoy día las aplicaciones son mucho más variadas:

1. Levantamiento cartográfico de territorios, es decir, representación de la superficie terrestre sobre un plano, tanto las grandes superficies como las pequeñas, rurales o urbanas, necesitan de puntos de control, apropiadamente distribuidos, donde se conozca la posición horizontal y vertical.
2. En los proyectos de Ingeniería en la construcción de grandes edificios, puentes, etc necesitan de sistemas coordenadas de un tipo u otro, y tener acceso a puntos de control. También es necesario a menudo, conocer los movimientos del terreno antes y durante y después de la construcción. Para la construcción de embalses y túneles, el conocimiento de las superficies equipotenciales del campo de gravedad también son necesarias.
3. Demarcación de fronteras, provinciales o estatales, resulta económicamente más rentable si se pueden referir a redes geodésicas de coordenadas conocidas.
4. En Ecología, recientemente comienza a estudiarse el impacto que las acciones humanas tienen en el medio ambiente, uno de estos efectos es el movimiento de tierra causado por la instalación o mantenimiento de instalaciones subterráneas, o depósitos de residuos.
5. El establecimiento de bancos de datos, de utilidad en transportes, usos del suelo, estadísticas poblacionales, basados en localización de zonas delimitadas por coordenadas, también necesitan de las redes geodésicas.
6. En geografía toda la información relativa a posición debe proporcionarla la geodesia, dado su carácter global, aunque a nivel de exactitud requerido no sea alto.
7. Determinación de la forma y campo de gravedad de otros planetas, aunque se conoce

como *Plan etología* no es otra cosa que Geodesia.

Es necesario uniformar los levantamientos geodésicos sean éstos, horizontales, verticales o gravimétricos, con el objeto de incrementar y mantener la red geodésica nacional, y que asimismo sirvan de apoyo a los trabajos cartográficos.

Para que un levantamiento sea considerado como geodésico deberán tomar en cuenta los efectos de curvatura terrestre y ejecutarse con instrumental y procedimientos que permitan una precisión interna.

Levantamientos Geodésicos Horizontal:

Son aquellos que comprenden una serie de medidas efectuadas en el campo, cuyo propósito final consiste en determinar las coordenadas geográficas horizontales de puntos situados sobre la superficie terrestre.

Levantamientos Geodésicos Verticales:

Comprenderán todas aquellas operaciones de campo dirigidas a determinar la distancia vertical que existe entre puntos situados sobre la superficie terrestre y un cierto nivel de referencia.

Levantamientos Gravimétricos:

Aquellos que comprenden la medida de valores absolutos o relativos del valor de la gravedad sobre puntos situados en la superficie terrestre, cuyo propósito consiste fundamentalmente en determinar el campo gravimétrico existente y su relación e influencia con los tipos de levantamientos geodésico horizontal y vertical.

Todo punto perteneciente a un levantamiento geodésico horizontal, deberá estar referido al Datum.

En lo que respecta a las alturas, todo punto perteneciente a un levantamiento geodésico vertical, deberá estar referido a un Datum o nivel de referencia vertical obtenido mediante la realización de una serie de observaciones mareográficas que cubran un período no menor de seis meses en forma continua.

Por lo que se refiere a la gravedad, todo punto perteneciente a un levantamiento gravimétrico de propósitos geodésicos deberá estar referido a la Red Internacional de Estandarización de la Gravedad de 1971.

Se define como Red Geodésica Nacional al conjunto de puntos situados sobre el terreno, dentro del ámbito del territorio nacional, establecidos físicamente mediante monumentos permanentes, sobre los cuales se han hecho medidas directas y de apoyo de parámetros físicos, que permiten su interconexión y la determinación de su posición y altura geográficas así como el campo gravimétrico asociado, con relación a un sistema de referencia dado.

Cuatro técnicas de la topografía tradicionales.

- (1) el posicionamiento astronómico,
- (2) la triangulación,
- (3) el trilateración, y
- (4) la poligonación, se usan en general para determinar las posiciones exactas de puntos en la superficie de la tierra.

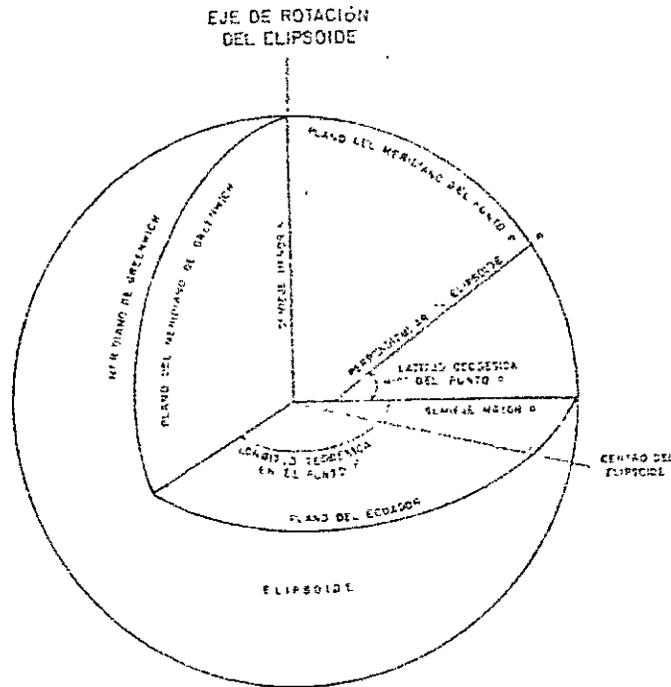
En años recientes, los desarrollos tecnológicos modernos han agregado varios nuevos métodos que utilizan los satélites artificiales terrestres. Otro campo de esfuerzo, fotogramétricos, ha contribuido a la topografía geodésica durante muchos años

El Posicionamiento horizontal

Se define como levantamientos geodésicos horizontal al conjunto de procedimientos y operaciones de campo y gabinete destinado a determinar las coordenadas geodésicas de puntos sobre el terreno convenientemente elegidos y demarcados, con referencia al Datum.

sistema de triángulos interconectados, con base en la medida de algunos lados y de todos los ángulos.

Se entenderá por triangulación el método de levantamiento geodésico horizontal consistente en un conjunto de figuras conformadas por triángulos interconectados y traslapados que forman una cadena o cubren un área específica, en donde se han medido algunos lados y los ángulos en los vértices, con el propósito último de determinar las coordenadas de dichos vértices.



Trilateración

En este método la situación se invierte, para medir directamente los lados y de ahí derivar los valores angulares, excepto que para efectos de control de dirección se requiere la medida de algunos ángulos.

Se entenderá como trilateración al método de levantamiento geodésico horizontal consiste en un conjunto de figuras conformadas por triángulos interconectados en los que se miden las distancias y algunos ángulos formando una cadena o cubriendo un área específica con el propósito último de determinar las coordenadas de los vértices de los triángulos.

Poligonación

Consiste en la medida directa de ángulos y distancias entre puntos consecutivos que forman una línea poligonal continua.

Se define como Poligonación al método de levantamientos geodésicos horizontal consiste en un conjunto de líneas conectadas por sus extremos en forma sucesiva, conformando una línea quebrada

en la que se miden todas las distancias y se observan todos los ángulos con el propósito último de determinar las coordenadas de los puntos que constituyen los extremos de cada línea. El método ofrece las ventajas de una mayor flexibilidad, cubrimiento relativamente rápido y economía, pero su rigidez relativa es menor que la de los levantamientos tratados anteriormente.

Los Sistemas observación

Se han usado dos sistemas básicos por obtener la información geodésica de la tierra artificial satélite-óptico y electrónico. Estos sistemas han hecho posible realizar las muchas medidas geodésicas para relacionar las posiciones conocidas o desconocidas al centro de la tierra, relacionar las posiciones desconocidas a las redes de la triangulación existentes, y para relacionar las redes de la triangulación a nosotros. Los parámetros importantes del campo gravitatorio de la tierra y valores para la tierra dinámica también se han obtenido.

Observación de Satélite Doppler

Este método de levantamiento se basa en la observación del efecto Doppler relacionado con la transmisión radial procedente de Satélites artificiales, para determinar la posición de puntos sobre la superficie terrestre.

Para efectos de definición, se entenderá que la observación de satélites Doppler está conectada con el método de posicionamiento tridimensional que hace uso del efecto Doppler asociado con la transmisión radial de una serie de Satélites Transit situados en órbita polar de modo que mediante el conocimiento de la posición instantánea en el espacio de dichos satélites, es posible determinar las coordenadas de puntos situados sobre la superficie terrestre, en los que se instalan los sistemas de recepción de señales.

Método inercial.

El método se fundamenta en la medida de variaciones de aceleración referidas a tres ejes que estabilizan mediante giroscopios, conjunto montado sobre una plataforma móvil. Las variaciones se traducen en desplazamientos que referidos a una cierta posición de origen, producen las coordenadas geodésicas requeridas. El método ofrece las ventajas de poder determinar además otros parámetros geodésicos, utilización en todo tiempo y ser de alto rendimiento pero habrá que considerar su costo inicial y capacidad real para producir resultados exactos. Debido a esto último y a que el método está todavía en la etapa introductoria, no se darán por ahora normas y especificaciones.

El Posicionamiento vertical

La topografía vertical es el proceso de determinar las altura-elevaciones sobre la superficie del nivel del mar. Esta clase de medidas se harán fundamentalmente en conexión con levantamientos geodésicos verticales y su propósito consiste en determinar la distancia vertical existente entre puntos del terreno y un cierto Datum o nivel de referencia que normalmente es el nivel medio del mar.

Se define como Nivel Medio del Mar (NMM) en un sitio dado al procedimiento aritmético de las alturas horarias de la marea, obtenido del registro de un graficador continuo. Diseñado para tal

propósito que ha operado durante un periodo que según las necesidades varia desde un minuto a seis meses, hasta el termino completo de Saros (19 años aprox.).

Se define como Levantamiento Geodésico Vertical al conjunto de procedimientos y operaciones de campo y gabinete destinados a determinar la elevación de puntos sobre el terreno convenientemente elegidos y demarcados, con referencia a un determinado NMM.

La nivelación geodésica precisa se usa para establecer una red básica de puntos de control vertical.

Hay tres técnica *nivelación diferencial , trigonométrica y barométrico*.

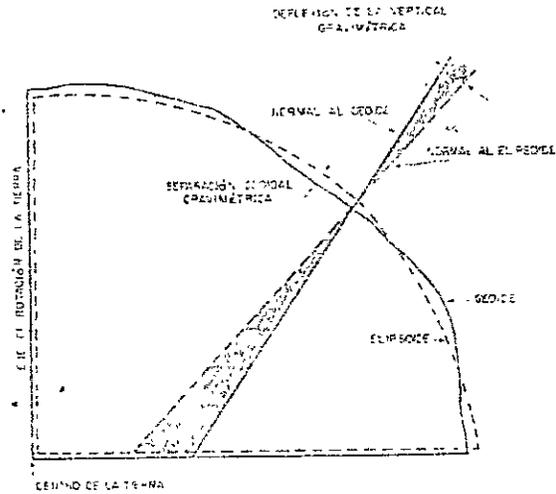
La **nivelación diferencial** constituye el método clásico utilizado para el desarrollo de los levantamientos geodésicos verticales, mediante un procedimiento que determina directamente la diferencia de alturas entre puntos vecinos, por la medida de la distancia vertical existente entre dichos puntos y un plano horizontal local definido a la altura del instrumento que se utilice para hacer dicha medida.

La **nivelación trigonométrica** sigue en orden de importancia a la anterior y consiste en la determinación indirecta de diferencia de alturas entre puntos vecinos mediante la medida de la distancia existente entre ambos y del ángulo vertical que contiene a dicha línea, con respecto al plano horizontal local de cualquiera de los puntos. Por su naturaleza indirecta y por estar más afectado por errores sistemáticos que en el caso de nivelación directa, el método trigonométrico es menos preciso y produce resultados menos exactos.

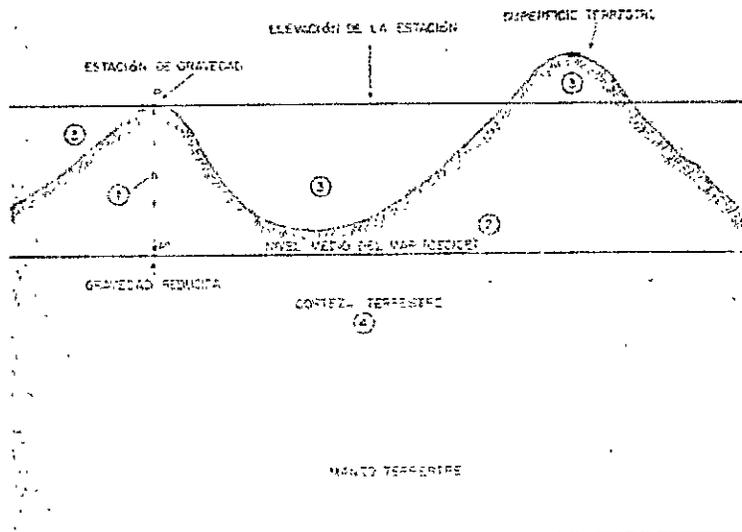
En la **nivelación barométrica**, las diferencias en la altura son determinadas midiendo la diferencia en la presión atmosférica a las varias elevaciones. La presión atmosférica es moderada por volátil o los barómetros aneroides, o un termómetro del punto de ebullición. Aunque el grado de precisión posible con este método no es tan grande como cualquiera del otro dos, es un método que obtiene las alturas relativas muy rápidamente a puntos que están separadamente bastante lejanos. Se usa ampliamente en el reconocimiento y los estudios exploratorios donde se harán las medidas más exigentes más tarde o no se requerirán.

Levantamientos Gravimétricos.

Los levantamientos gravimétricos se harán con el propósito de estructurar la Red Gravimétrica Nacional, para efectos de conocimiento del campo de gravedad terrestre y proporcionar información de apoyo a los levantamientos horizontales y verticales en conexión con estudios de geodesia dinámica y de su relación con los parámetros de posición. Básicamente, deberá orientarse a la determinación de alturas ortométricas conocer los valores de la desviación de la vertical y de las alturas geoidales independientemente de otros usos geodésicos o geofísicos que se les pueda dar.



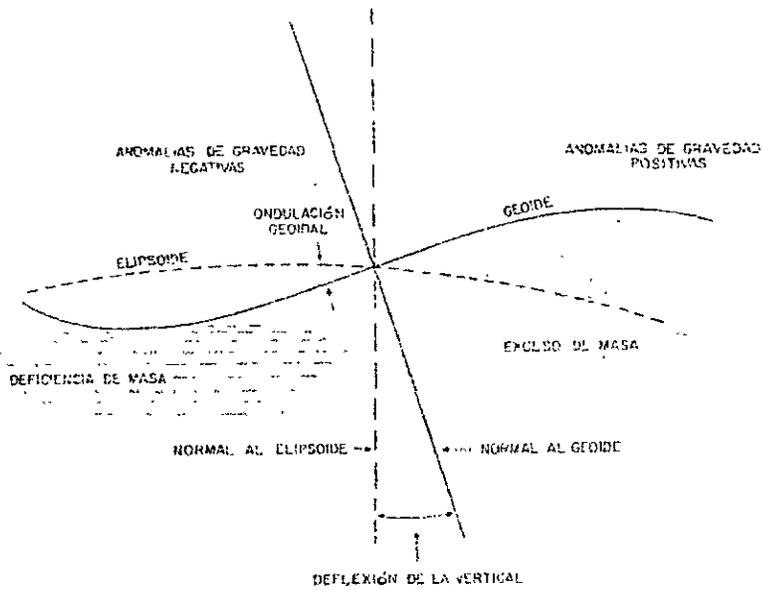
Los levantamientos gravimétricos pueden ser absolutos o relativos. Los primeros comprenden las medidas directas del valor de la gravedad en un punto dado mediante la utilización de péndulos u otros sistemas. En atención a que en geodesia es más práctica y precisa la determinación de diferencias de gravedad entre puntos y a que mediante ligas apropiadas se pueden conocer los valores absolutos (método relativo), las normas que en esta parte se indiquen referirán solamente a las medidas relativas de la gravedad.



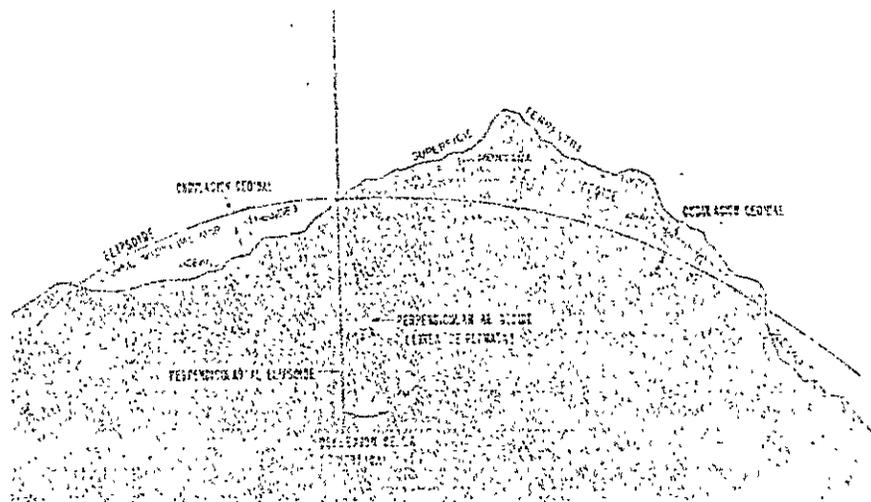
- 1 - ELEVACIÓN, h, DEL PUNTO DE OBSERVACIÓN
- 2 - MASA ENTRE LA ELEVACIÓN DE LA ESTACIÓN Y EL NIVEL DEL MAR
- 3 - EFECTOS DEL TERRENO
- 4 - ESTRUCTURA GENERALIZADA DE LA CORTEZA TERRESTRE

todo levantamiento gravimetrico deberá estar referido a la red de control o sea La Red Gravimetrica Nacional estará integrada por:

1. la red básica de primer orden la cual comprende las estaciones fundamentales de la IGSN-71 las estaciones de base de referencia y auxiliares y las líneas de calibración.
2. Las estaciones de segundo orden pertenecientes a levantamientos regionales



(Señala por la intersección de la normal a la superficie terrestre)



DESARROLLO EN LA GEODESIA

Hasta antes de la era espacial y obviamente precedentes a la aparición de la geodesia satelital, generalmente la RGN se trataban en un sistema de coordenadas esféricas y para fines prácticos en el sistema de coordenadas planas rectangulares UTM.

Sin embargo al utilizar los sistemas globales de posicionamiento (TRANSIT, TSICADA, GPS NAVSTAR y GLONASS), en la construcción de las RGN y de redes geodésicas sencillas, se intensificó la utilización de los sistemas de coordenadas geocéntricas rectangulares espaciales XYZ.

Para fines de obtener coordenadas esféricas a los sistemas de coordenadas espaciales se les refiere a un elipsoide donde el origen de ambos sistemas de coordenadas coincide.

Que las técnicas de medición contemporáneas se inscriben ahora en un entorno dinámico – espacial que permite resultados muy precisos en tiempos relativamente cortos en comparación con los métodos tradicionales, en particular el Sistema de Posicionamiento Global (GPS), que en la década de los noventa ha venido a revolucionar la tecnología de medición geodésica, sustituyendo ventajosamente a los métodos de posicionamiento astronómico, triangulación, poligonación y Doppler, aplicados hasta fechas recientes para conformar la Red Geodésica Nacional.

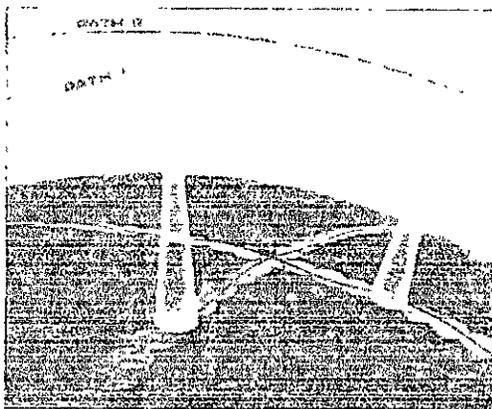


Figure 32
THE MEASUREMENT OF THE GEOID
BY THE SATELLITE ALTIMETER

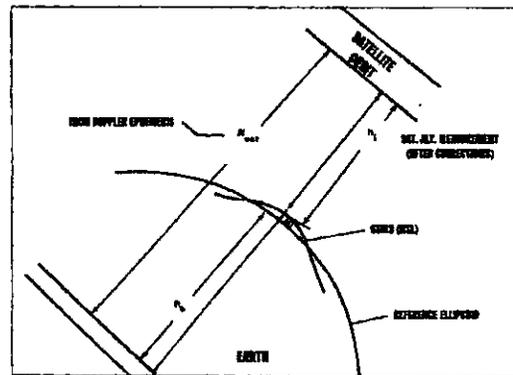
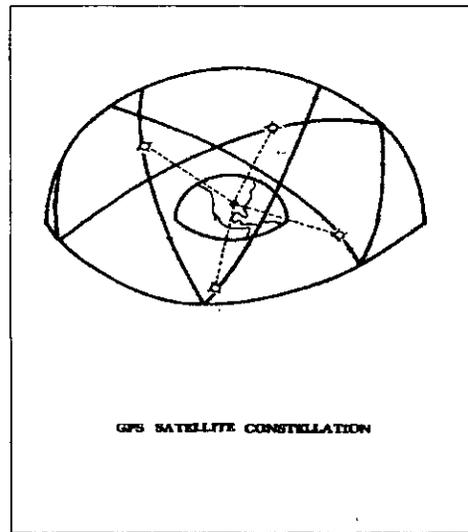


Figure 33

El Sistema de Posicionamiento Global .

El sistema consiste de tres segmentos, un conjunto de estaciones terrenas que rastrean y operan los satélites, una constelación de 24 satélites en órbita que en forma permanente emiten su efemérides en dos frecuencias correlacionadas y los receptores que se ubican en la posición que se quiere determinar (automóvil, punto geodésico, barco, etc.).



El levantamiento con GPS es un sistema de medición tridimensional basado en la observación de señales de radio emitidas por los satélites del Sistema Global de Posicionamiento NAVSTAR. Las observaciones se procesan para determinar la posición de la estación en coordenadas cartesianas (X, Y, Z), que puedan ser convertidas a coordenadas geodésicas (ϕ , λ , h) sobre un elipsoide de referencia. Con ligas adecuadas al sistema geodésico vertical existente y conociendo las ondulaciones geoidales, se puede calcular la altura ortométrica o elevación sobre el nivel del mar de puntos cuya elevación sea desconocida.

Existen dos métodos mediante los cuales pueden derivarse la posición de las estaciones el Posicionamiento Puntual o Absoluto y el Posicionamiento Relativo. En la forma puntual se procesa información de una sola estación para obtener sus coordenadas (X, Y, Z) referidas al WGS84, marco de referencia geocéntrico (Datum).

Para llevar a cabo levantamientos con precisiones de un decímetro o menos, debe hacerse uso de técnicas para el Posicionamiento Relativo. En este caso, dos o mas receptores reciben en forma simultanea señales de los mismos satélites geodésicos. Estas observaciones son procesadas para obtener los componentes de los vectores de la línea base, ó sea diferencias de coordenadas de las estaciones (X, Y, Z). El Posicionamiento Relativo Estático, es decir cuando el receptor/antena se mantiene inmóvil durante el periodo de observación. Este posicionamiento relativo también se encuentra denominado en la literatura como tridimensional o geométrico.



los modernos equipos de medición disponibles en la actualidad, tales como distanciómetros electromagnéticos y de posicionamiento vía satélite, han superado en por lo menos un orden de magnitud la precisión del Datum Norteamericano de 1927 o NAD27, definido en las Normas Técnicas para Levantamientos Geodésicos.

Todo punto perteneciente a un levantamiento geodésico horizontal, deberá estar referido al marco de Referencia Terrestre Internacional (ITRF) del Servicio Internacional de Rotación de la Tierra (IERS) para el año 1992 con datos de la época 1988 y que se denomina ITRF92 época 1988 que es el nuevo Sistema Geodésico de Referencia oficial para México.

Las coordenadas cartesianas ITRF92 se deben transformar a coordenadas geodésicas curvilíneas (latitud, longitud y altura elipsoidal) en el elipsoide del Sistema Geodésico de Referencia 1980 (GRS80) que es definido por los siguientes parámetros:

Semieje Mayor	a	6 378 137 m
Velocidad Angular	ω	$7\ 292\ 115 \times 10^{-11}$ rad/seg
Constante Gravitacional Geocéntrica	GM	$3\ 986\ 005 \times 10^8$ m ³ /seg ²
Factor dinámico de la Tierra	J ₂	$108\ 263 \times 10^{-8}$
Constantes geométricas derivadas		
Semieje menor	b	6 356 752.314 1 m
Excentricidad lineal	E	521 854.009 7 m
Radio polar	c	6 399 593.625 9 m
Primera excentricidad al cuadrado	e ²	0.006 694 360 022 90
Segunda excentricidad al cuadrado	e' ²	0.006 739 496 775 46
Achatamiento	f	0.003 352 810 681 18
Recíproco del achatamiento	f-1	298.257 222 101
Cuadrante meridiano	Q	10 001 965.729 3 m
Radio medio	R ₁	6 371 008.771 4 m
Radio de la esfera de la misma superficie	R ₂	6 371 007.191 0 m
Radio de la esfera del mismo volumen	R ₃	6 371 000 790 0 m

Sistema Inercial de Coordenadas.

El sistema de coordenadas de Greenwich (ITRF92) esta construido en base a un sistema de coordenadas inercial. (inmóvil), el cual lo podemos definir de la siguiente manera: supongamos que el origen 0 del sistema de coordenadas coinciden con el centro de masas de la Tierra el eje Oxo se dirige al punto promedio del equinoccio vernal Yo de cierta época To y, que a su vez, se encuentra sobre el plano ecuatorial de la Tierra, el eje Ozo coincide con el eje medio de rotación de la Tierra y con dirección al norte y el eje Oyo completo un sistema de orientación derecha positiva dirigido al oriente mediante un triedro ortogonal. En geodesia es necesario realizar el traslado del sistema inercial al sistema de coordenadas geocéntrico de Greenwich.

2. Los sistemas de Referencia Terrestres (TRS), que son sistemas ligados a la Tierra, y por tanto giran conjuntamente con la Tierra, y se trasladan. Es decir son sistemas acelerados y por tanto no inerciales. Su definición genérica es un sistema en que el plano fundamental es el Ecuador, el eje Z esta en la dirección del Eje de rotación terrestre, el eje X en la dirección intersección del meridiano de Greenwich con el Ecuador y el eje Y formando triédro directo y origen el centro de masas de la Tierra.

Un *Marco de Referencia* es la materialización de un sistema de Referencia, constituido por un conjunto de coordenadas de objetos celestes, para los sistemas celestes y coordenadas y velocidades de estaciones repartidas por toda la Tierra para los terrestres.

Es muy importante en la definición de los sistemas de referencia el concepto de orientación de la Tierra, ya que es la relación entre ambos tipos de sistemas.

La orientación de la Tierra se define como la variación en términos de rotación entre un sistema Celeste y uno Terrestre, es decir un sistema geocéntrico que rota con la Tierra y uno inercial o cuasi-inercial también geocéntrico que no rota. La rotación entre estos dos sistemas se puede realizar a través de tres ángulos (ángulos de Euler), pero clásicamente se ha estudiado esta variación considerando separadamente el movimiento del eje de rotación sobre la propia Tierra, el movimiento del eje de rotación en el espacio, y la variación en la rotación de la Tierra. Esto da lugar a cinco parámetros de Orientación de la Tierra (EOP) y que son:

- . Tiempo Universal (UTI). Es la variación en tiempo universal en la duración del día ya que la Tierra no gira uniformemente.

- . Las variaciones en el Polo Celeste (dPsi, dEps). El eje de rotación, en el espacio describe dos movimientos; *precesión* y *nutación*. El modelo para estos movimientos no tiene en cuenta factores como variaciones atmosféricas, oceánicas y del interior de la Tierra, y variaciones en general de periodo corto, por tanto surgen estos dos parámetros para mejorar el modelo de precesión y nutación.

- . Coordenadas del Polo Terrestre (x, y). El eje de rotación de la Tierra no está situado siempre en el mismo lugar respecto a la propia Tierra debido a la no rigidez de la Tierra la variación respecto a la dirección del Polo Celeste viene determinada por estos parámetros.

Antes de seguir con la definición de los sistemas de referencia conviene aclarar algunas cuestiones sobre el eje de rotación y sus movimientos en el espacio y sobre la propia Tierra.

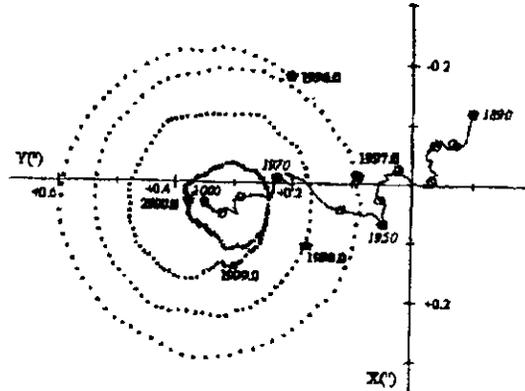
El Polo Celeste se define en Astronomía como la intersección del eje de rotación Terrestre con la Esfera celeste, y el Polo Terrestre como la intersección con la Tierra. El eje de rotación no está fijo en el espacio, y su movimiento queda caracterizado por los fenómenos ya mencionados de Precesión y Nutación. Estos movimientos se deben estudiar por separado. En cada instante la dirección verdadera del eje de rotación en el espacio define el denominado Polo instantáneo, que cortará a la esfera Celeste y a la Terrestre en un Polo Celeste Instantáneo y un Polo Terrestre instantáneo. En cada instante también, se puede definir un polo denominado MEDIO, que solo está afectado de Precesión, (equivaldría a un polo instantáneo que hubiera sido corregido de Nutación). Dado que el conocimiento sobre estos movimientos no es perfecto se definen otros Polos que son los siguientes:

CEP. *Polo celeste de Efemérides*. Es la dirección del Polo instantáneo incluyendo los modelos de Precesión y Nutación sin tener en cuenta las variaciones de corto periodo. (dPsi, dEps).

CIP. *Polo Celeste Intermedio*. Es la dirección del Polo instantáneo, donde se habrán tenido en cuenta algunas correcciones de corto periodo superiores a dos días. Esto no altera la definición de los parámetros de Orientación dPsi, dEps, que seguirán siendo necesarios para otras variaciones. Este polo es de reciente definición y se empezó a utilizar a partir del 1 enero 2003.

CIO-CTP *Origen Convencional Internacional- Polo Terrestre Convencional*. Se refieren a lo mismo aunque a lo largo del tiempo han tomado nombres diferentes. *Es la media de la dirección marcada por un polo medio durante los años 1900..1906*. Una vez definido queda fija tanto su

dirección sobre la Tierra como en el espacio.



La figura anterior muestra las variaciones del CEP y un polo medio, respecto a la propia corteza Terrestre, dado con un intervalo de 5 días (línea discontinua), en un sistema bidimensional con origen el CIO y ejes en las direcciones del meridiano de Greenwich y 90 Este, el polo medio tiene un movimiento irregular en la dirección de 80° W (línea continua).

EL SERVICIO INTERNACIONAL DE ROTACIÓN DE LA TIERRA (IERS)

El IERS fue establecido en 1987 por la Unión astronómica internacional y la Unión internacional de Geodesia y Geofísica y comenzó a funcionar en Enero de 1988. Sus objetivos son proporcionar a la comunidad astronómica, geodésica y geofísica una serie de marcos y sistemas de referencia para sus trabajos. Entre los objetivos prioritarios se encuentran:

1. La definición de un CRS, el Sistema internacional de referencia Celeste (ICRS) y su materialización a través del Marco internacional de referencia celeste (ICRF). (Otras materializaciones del ICRS son los catálogos estelares Hipparcos y FK5)
2. La definición de un TRS, el Sistema internacional de referencia Terrestre (ITRS) y su materialización a través del Marco internacional de referencia terrestre (ITRF). (Otros TRS son el Sistema Geodésico Mundial 84 (WGS84) que es el definido y usado por la constelación GPS y el Parametry Zemli 90 (PZ90) usado y definido por la constelación GLONASS)
3. Determinación de los parámetros de orientación de la Tierra necesarios para el estudio de la variación en la orientación de la Tierra y la transformación entre ICRF e ITRF.
4. Proporcionar datos geofísicos que permitan interpretar las variaciones espacio-temporales en el ICRF el ITRF y en los parámetros de orientación de la Tierra, así como modelos para estas variaciones
5. Establecer convenciones para que la comunidad internacional utilice los mismos modelos y constantes.

EL MARCO INTERNACIONAL DE REFERENCIA TERRESTRE ITRF2000

El ITRF es una materialización del ITRS a través de medidas de posición y velocidad de lugares alrededor de todo el mundo basadas en técnicas espaciales, que por tanto están influenciadas por múltiples factores, podemos citar los siguientes:

- . Relación entre el ICRS fijo en el espacio y el ITRS ligado a la Tierra, que viene dado por la variación en la velocidad de rotación de la Tierra

- . Coordenadas aproximadas de los lugares
- . Modelo usado para el movimiento de las placas continentales, para asignar velocidades
- . Modelo geopotencial adoptado para el campo de la gravedad terrestre.
- . Constante de gravitación utilizada para determinar la masa de la Tierra.
- . Valor usado para la velocidad de la luz.
- . Influencia de las mareas.
- . Influencia de la presión de radiación Solar .
- . Estado y deriva de los relojes en la determinación del tiempo.
- . Variaciones Atmosféricas.
- . Variaciones en las antenas receptoras.

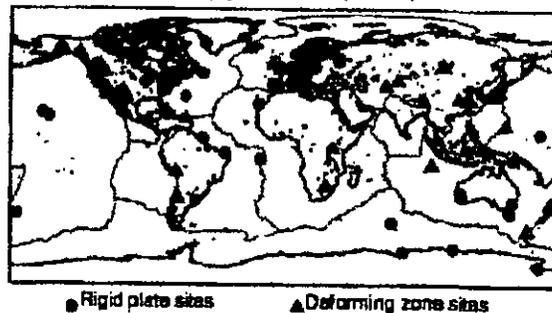
Los criterios generales adoptados para establecer el ITRF2000 son:

- 1) ITRF2000 consiste en una serie de posiciones y velocidades de unas estaciones que conforman una red global en toda la Tierra.
- 2) ITRF2000 Debe incluir todos los puntos reconocidos de utilidad para aplicaciones de Geodesia ,Cartografía y Navegación
- 3) ITRF200 debe incluir una base de puntos primarios que deben ser acordes con la calidad anual de las soluciones obtenidas. Estos puntos deben mejorar las soluciones del ITRF97 al que sustituye.
- 4) Dado que existirán varios niveles de calidad en los puntos individuales los criterios de calidad deben ser cuidadosamente estimados y explicados a los distintos usuarios, y estos deben ser convenientemente publicados

Para determinar el ITRF2000 el Servicio Internacional de Rotación de la Tierra (IERS) recopila soluciones de posición y velocidad aportadas por distintos grupos y organismos dedicados a ello, y obtenidas por distintas técnicas (VLBI, LLR, SLR, GPS, OORIS, técnicas combinadas. etc.). La densificación se realiza en general con técnicas GPS, y hay multitud de grupos que establecen redes de densificación.

De todas las soluciones aportadas por distintos organismos tras su análisis se llegó a las siguientes estaciones seleccionadas 54 (círculos en la figura) y otras 41 (triángulos), estas últimas estaban en zonas que tenían deformaciones y al final se eliminaron. De las 54 restantes Bahrein (en la placa Arábiga) Easter Island (en la placa de Nazca) , Tromsoe (En la placa Euroasiática) and Flin-Flon (en la Placa Norte- Americana) fueron excluidas por tener residuales en velocidad demasiado altos. Por tanto sólo se usaron 50 lugares localizados en placas rígidas para definir el ITRF2000

A continuación se dan la longitud y latitud en grados, código de la estación y placa a la que pertenece, de las dos estaciones españolas incluidas en la definición del marco, estación de Maspalomas (Gran Canaria), y Villafranca (Madrid).



Longitud	Latitud	Codigo	nombre	Placa continental
-15.633	27.764	31303MO02	MASP	AFRC NUBI
-3.952	40.444	13406MO01	VILL	EUR

Este marco de referencia es la última realización de una serie de marcos ITRF que se han ido mejorando desde 1988, las diferencias entre ellos es del orden de cm., y existen parámetros de transformación entre unos y otros. Las coordenadas de las estaciones quedan definidas por tres coordenadas, X, Y, Z, denominadas *coordenadas geocéntricas*, si es necesario utilizar unas coordenadas (φ, λ) denominadas *coordenadas geodésicas* y h *altura sobre el elipsoide*. debe definirse un elipsoide de referencia cuyos ejes y origen coincidan con los del sistema. En este caso se usa el GSSO cuyos parámetros son $a=6378137.0$ m y $e^2=0.00669438003$.

SISTEMA GEODÉSICO MUNDIAL 1984 (WGS84)

Es un Sistema de referencia Terrestre definido como sigue:

Origen: Centro de masas de la Tierra.

Eje Z: Dirección del CIO

Eje X: Sobre el plano del Ecuador en la dirección de la intersección del meridiano de Greenwich.

Eje Y: Sobre el Ecuador formando triedro directo.

Plano fundamental: Ecuador

Tiene asociado un elipsoide de referencia cuyos ejes y origen coinciden con los del sistema. Los parámetros del elipsoide son:

Semieje menor $a=6378137$ m.

Aplanamiento $f=1/298.257223563$

El sistema se define para una Tierra estándar rotando con velocidad constante alrededor de un polo medio, incluye por tanto un modelo de Tierra que queda definido por una serie de parámetros primarios y secundarios

- . Los parámetros primarios son velocidad angular de rotación y la masa del elipsoide, que coincide con la masa de la Tierra incluida su atmósfera.
- . Los parámetros secundarios definen el modelo de gravedad utilizado, y que está formado por los coeficientes de la expresión en armónicos esféricos del potencial gravitatorio terrestre truncados en el orden 180.

El sistema queda materializado por la posición de 5 estaciones, que son las encargadas de controlar los satélites de la constelación GPS, constituyendo así un marco de referencia terrestre.



Global Positioning System (GPS) Master Control and Monitor Station Network

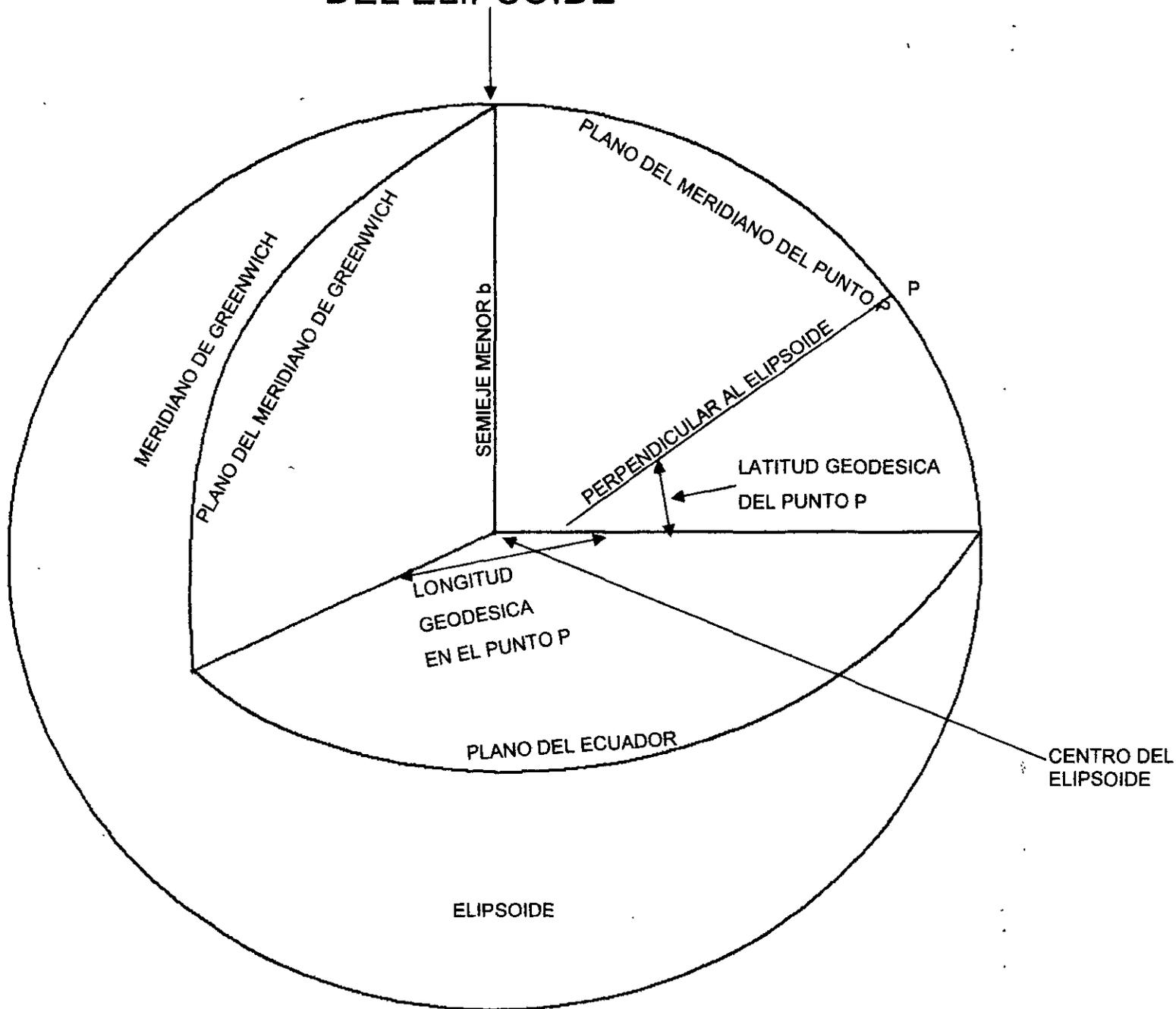
Este marco de referencia es la última realización de una serie de marcos WGS, la diferencia entre ellos es del orden de 2 a 3 metros.

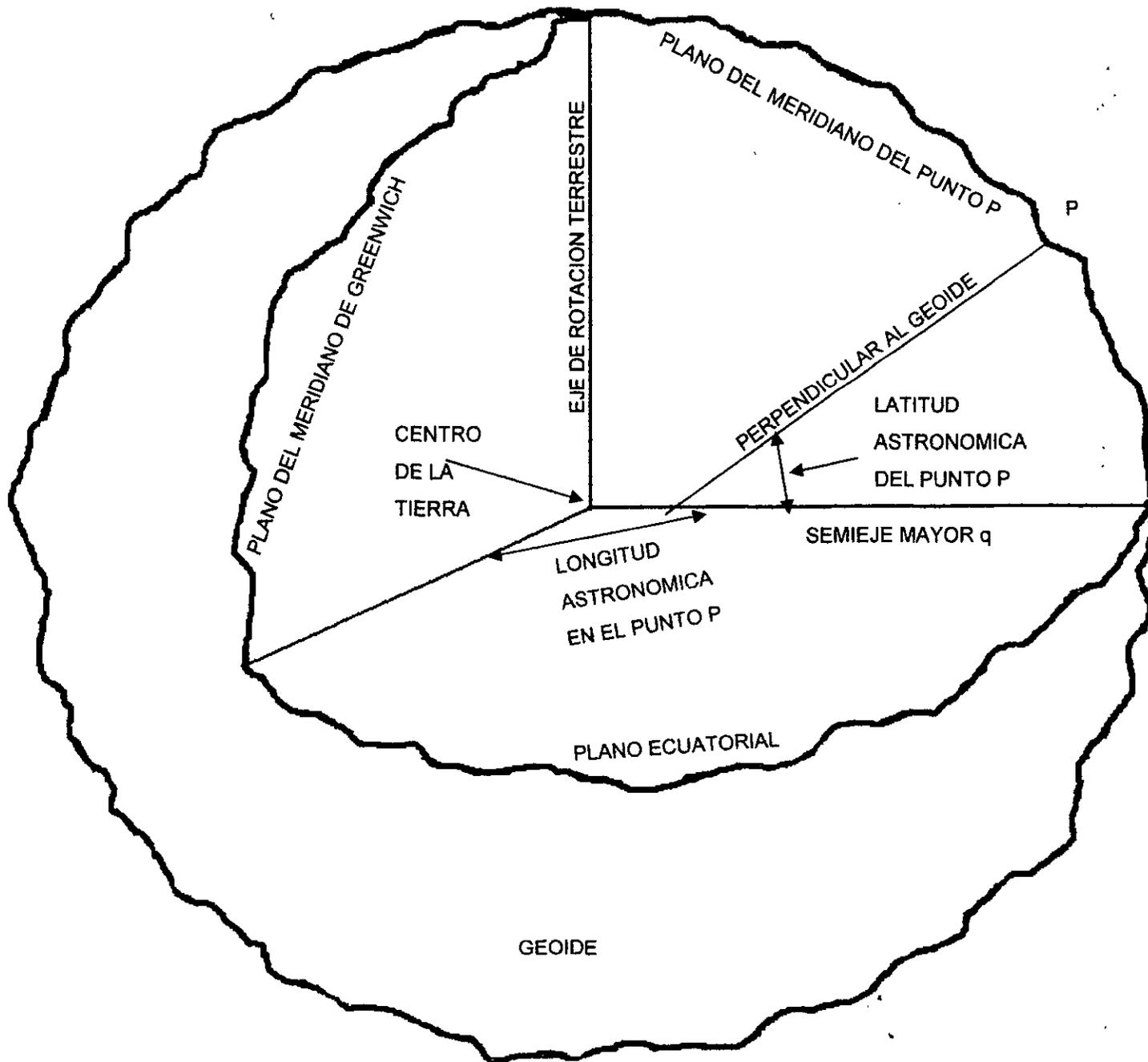
El WGS 84 es consistente con el ITRF2000. Las diferencias entre ellos son de 10 cm.

La posición de un lugar sobre la Tierra en este sistema queda definida por tres coordenadas, X,Y,Z ,

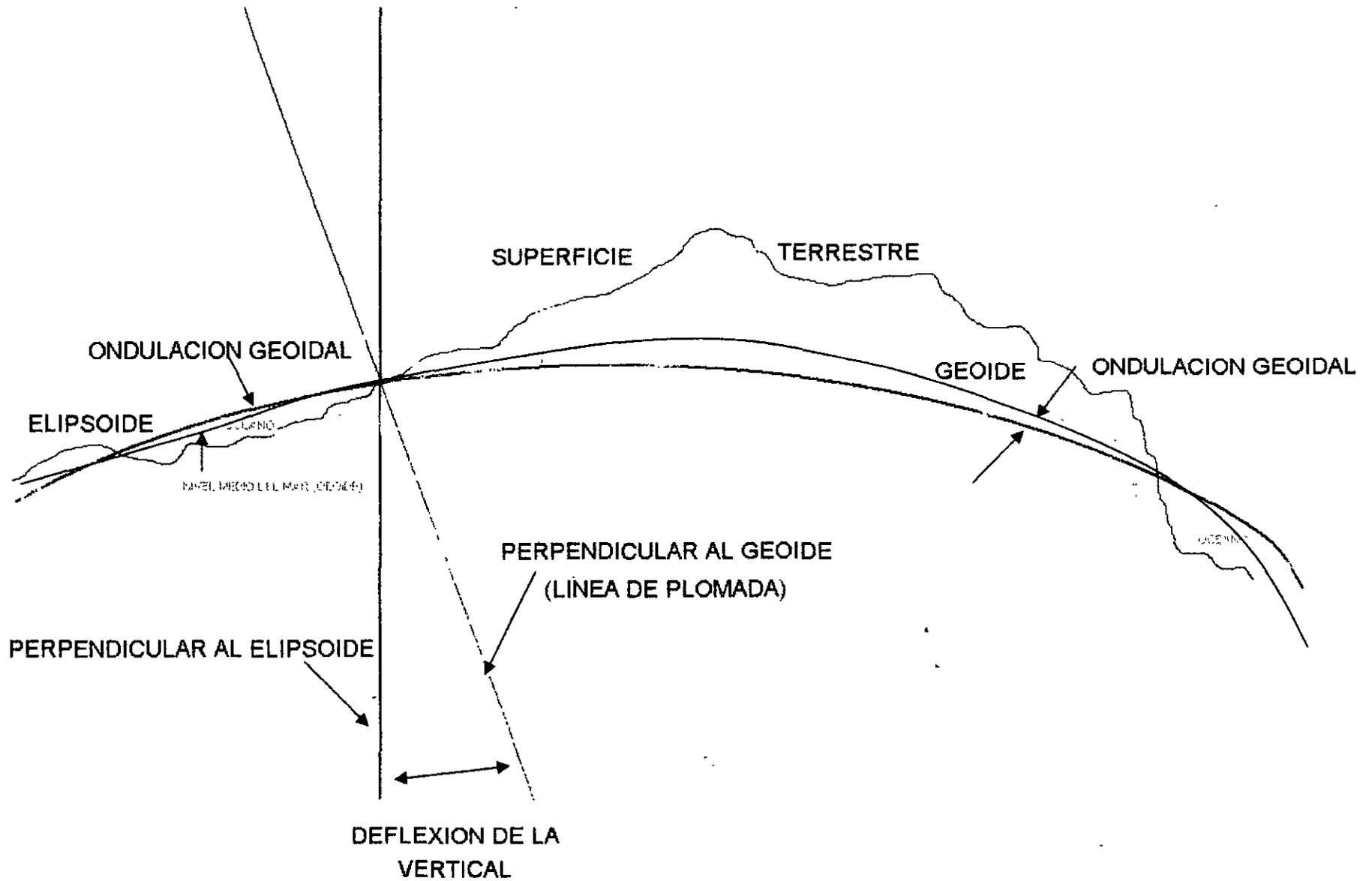
que se denominan coordenadas geocéntricas, o bien por (φ, λ) denominadas *coordenadas geodésicas* y h *altura sobre el elipsoide*.

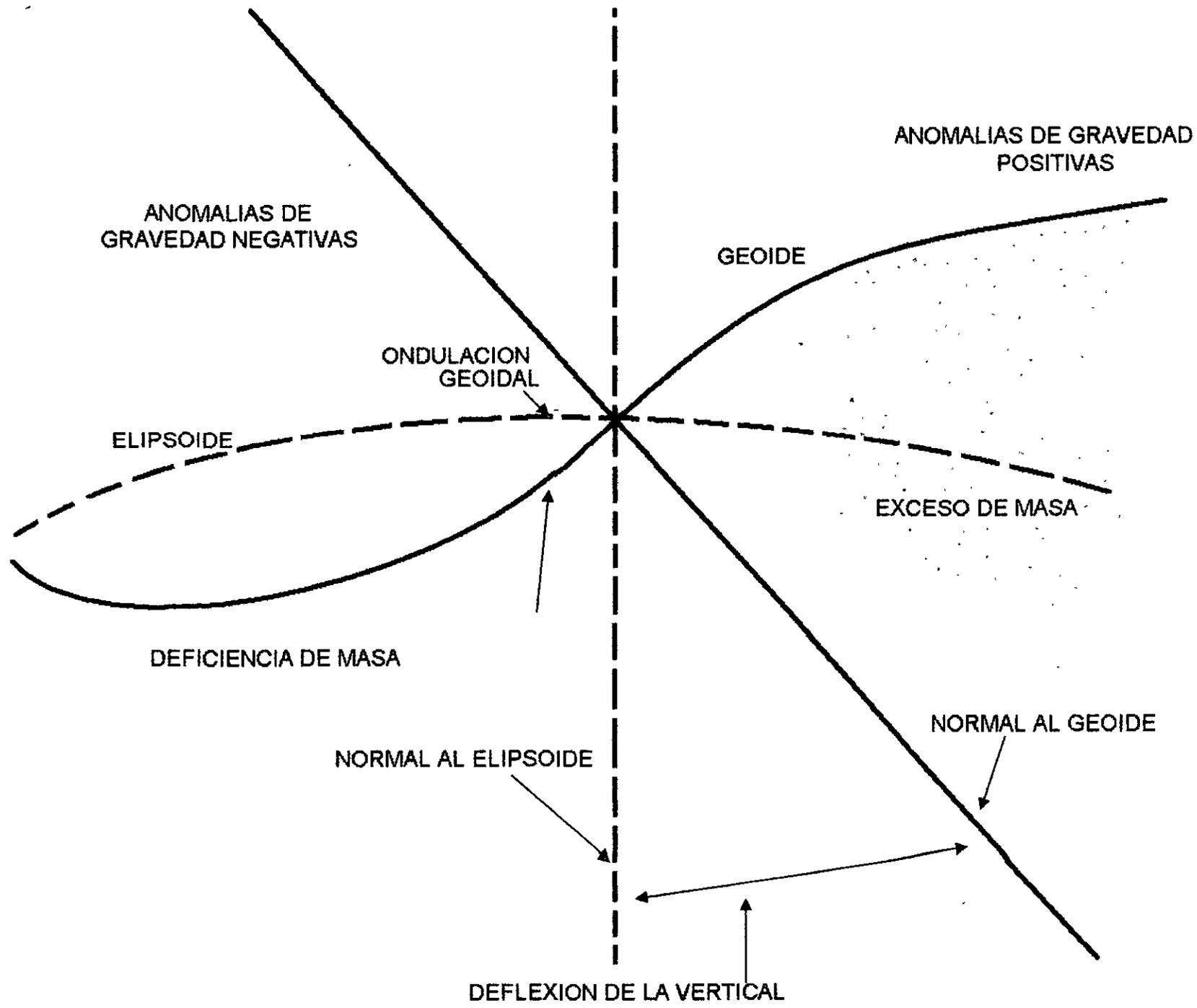
EJE DE ROTACION DEL ELIPSOIDE

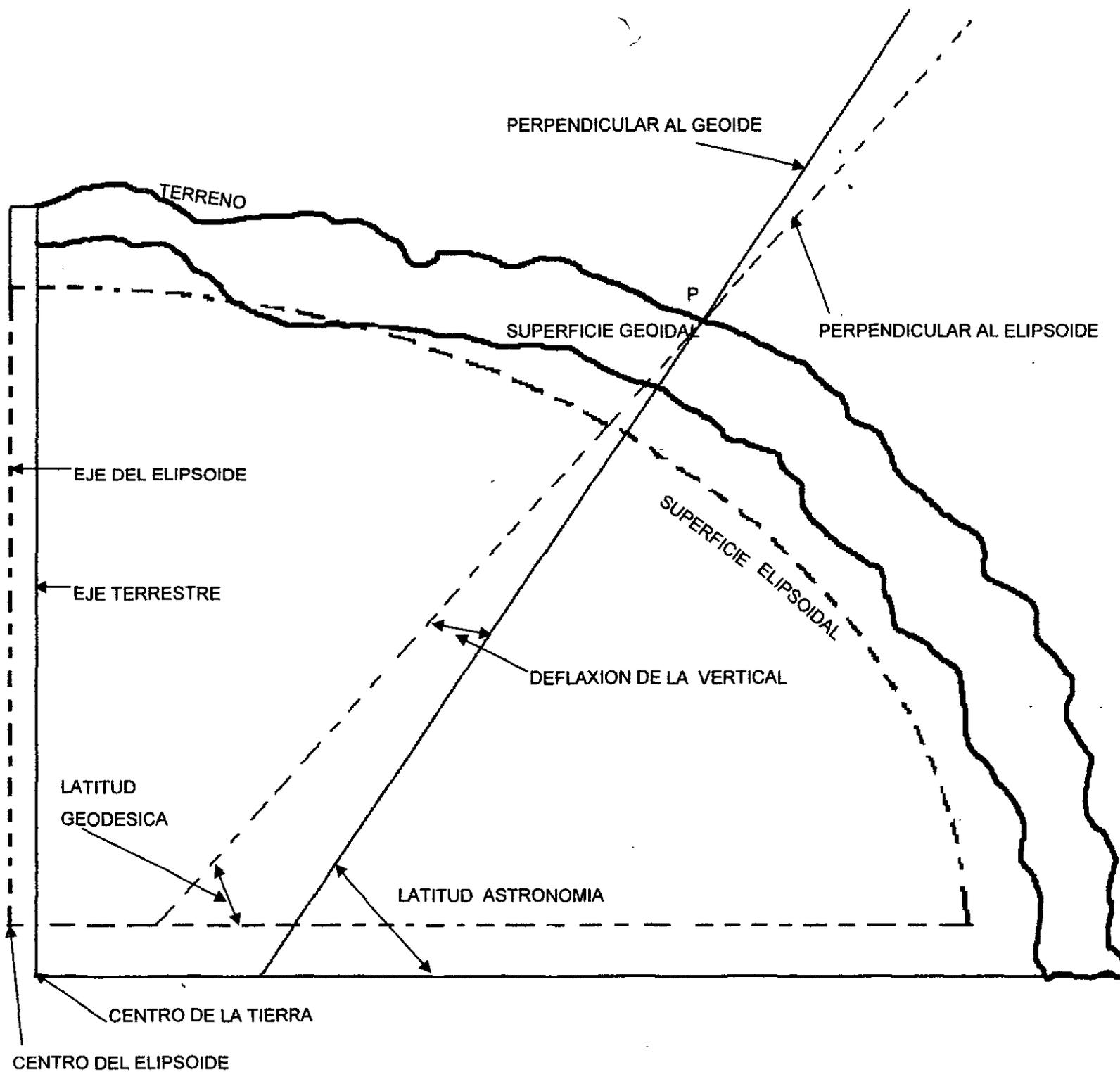


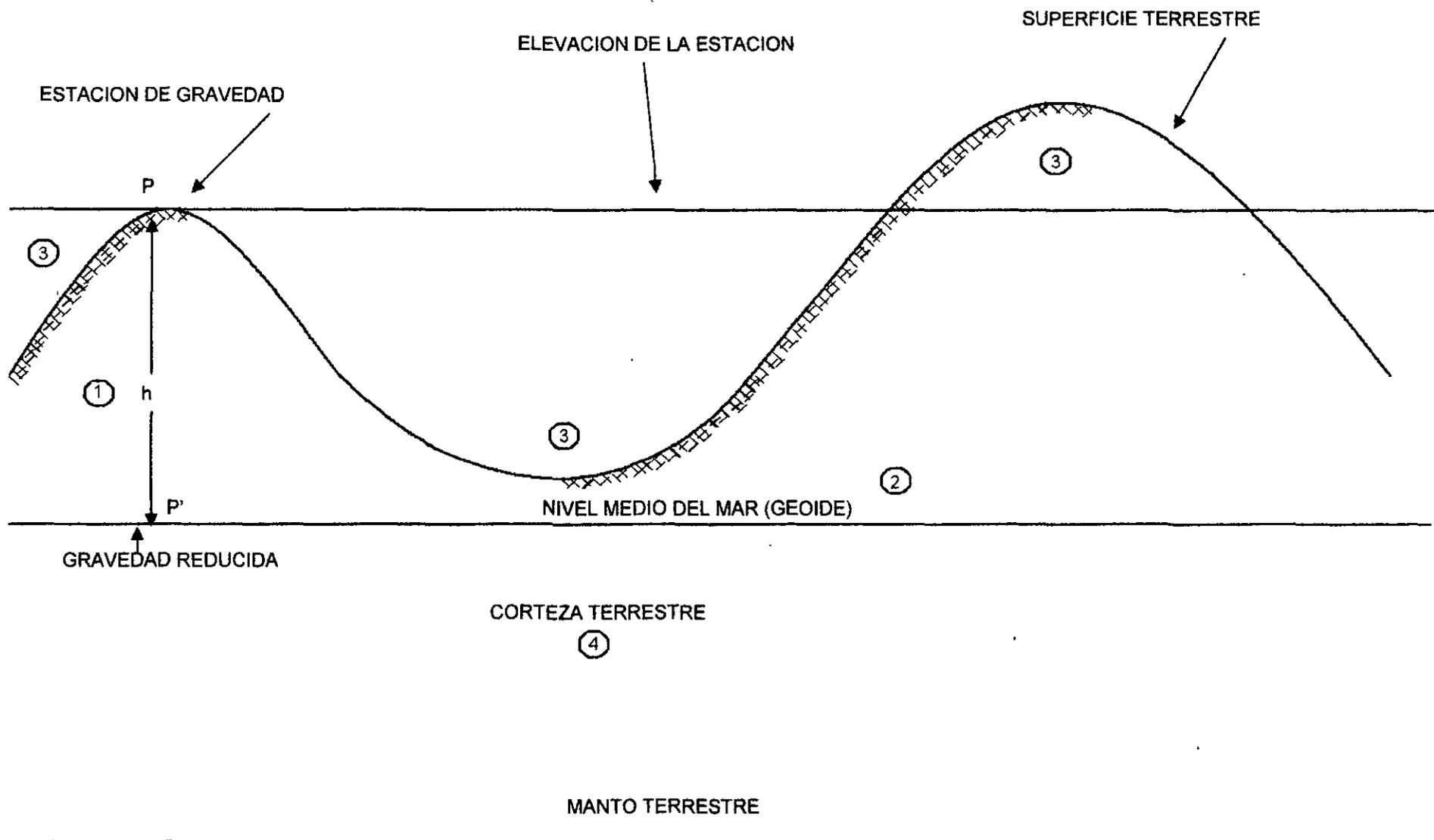


(Efectos por la distribución irregular de la masa en la corteza terrestre)



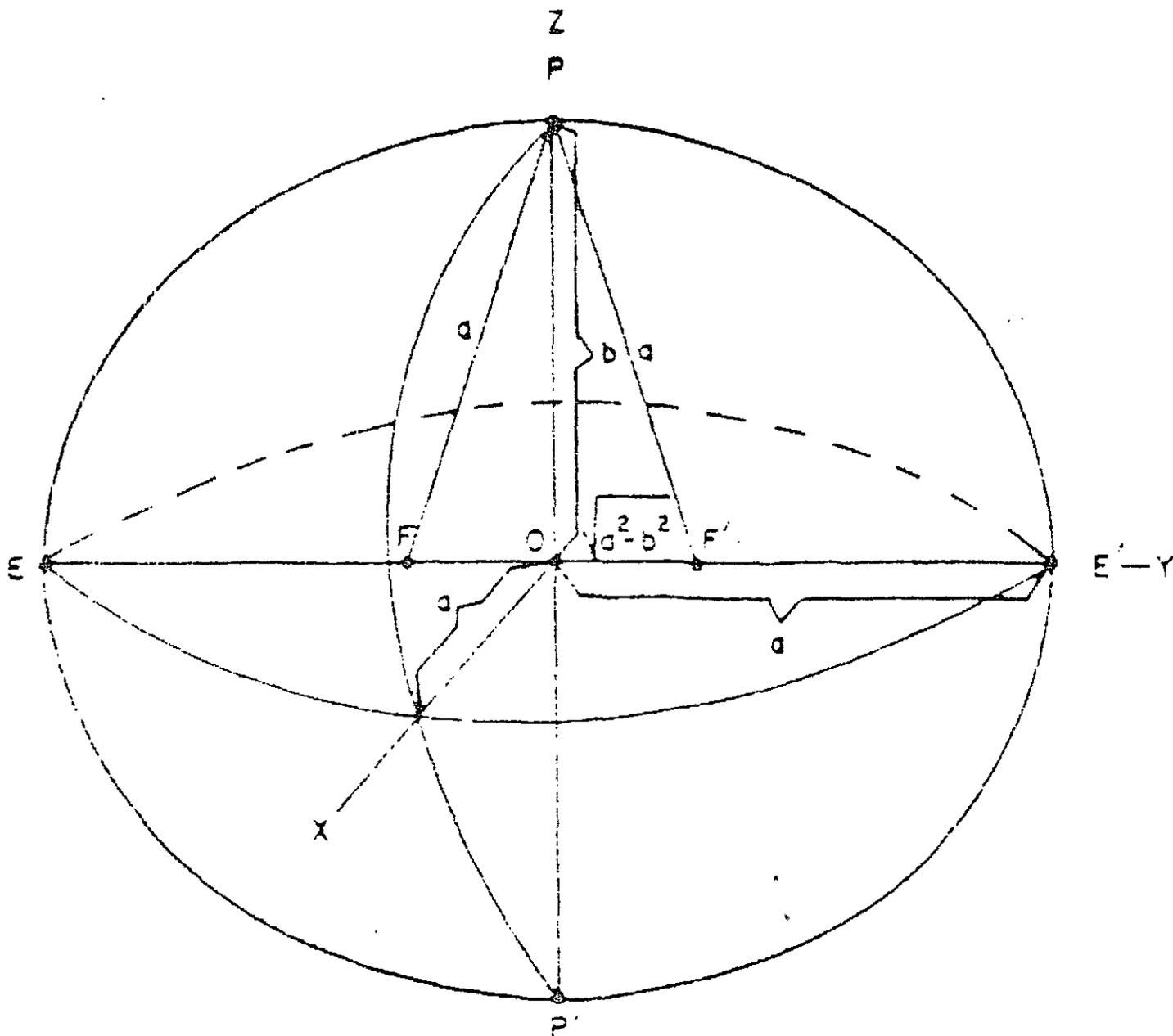




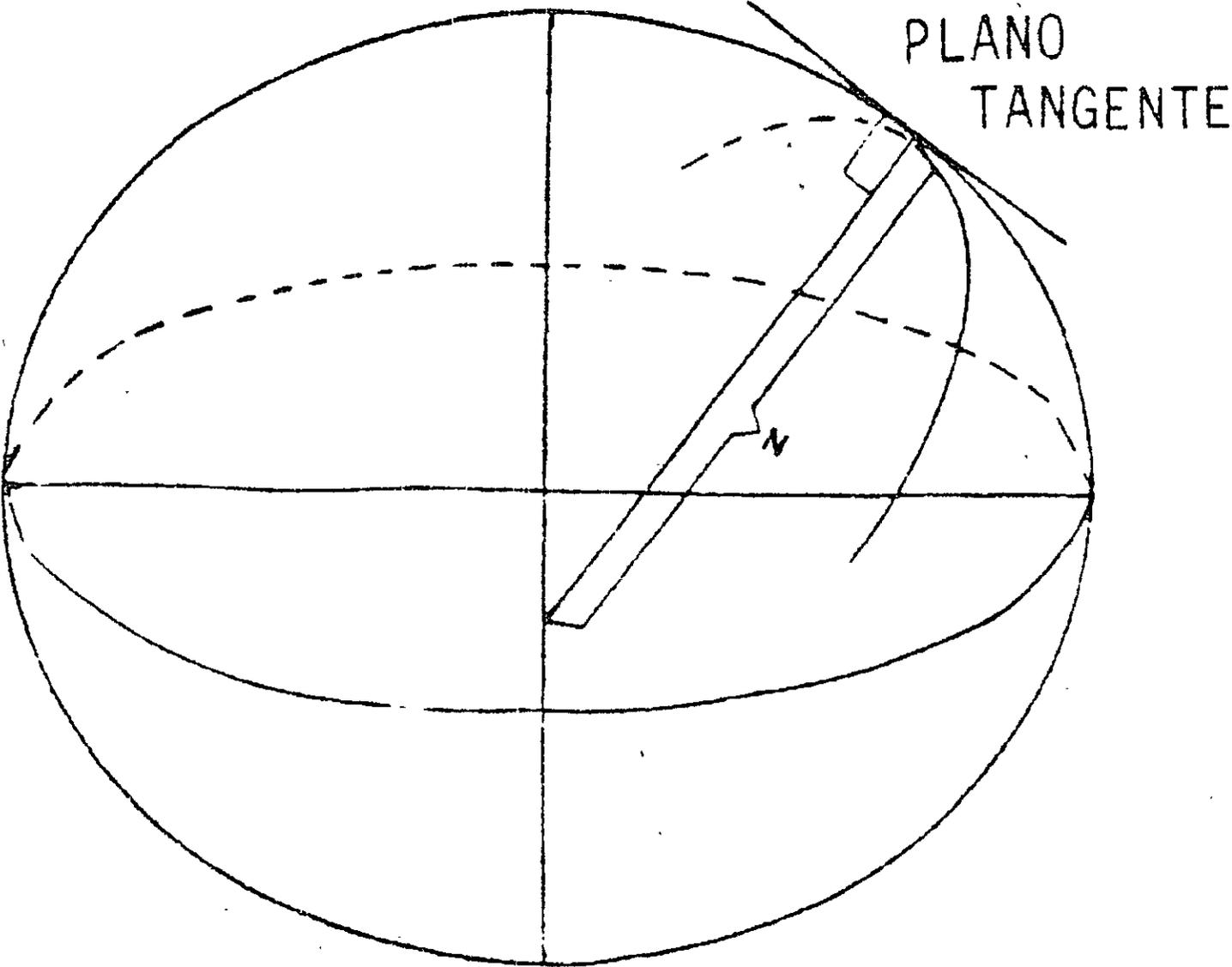


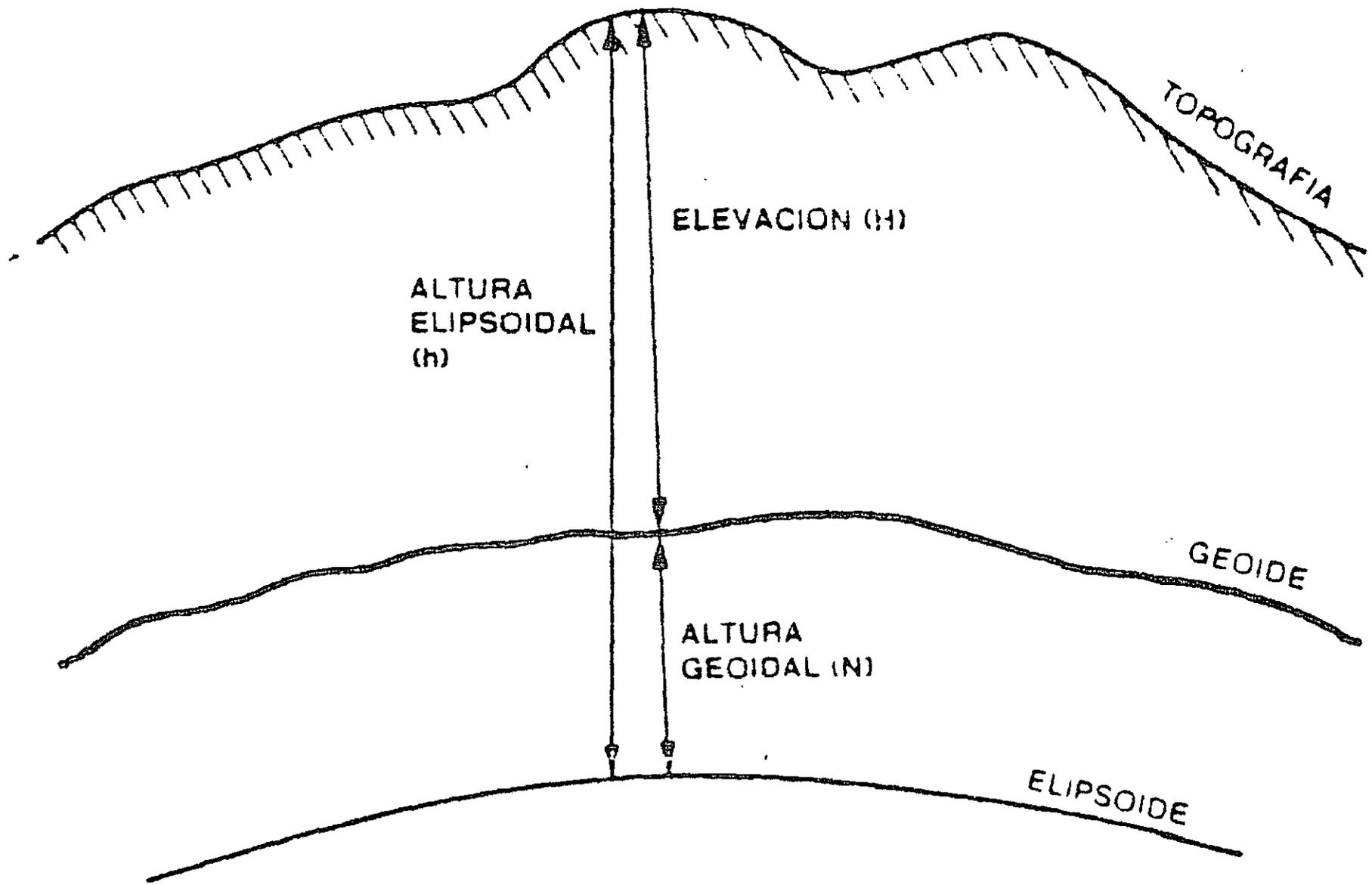
- 1.- ELEVACION, h , DEL PUNTO DE OBSERVACION.
- 2.- MASA ENTRE LA ELEVACION DE LA ESTACION Y EL NIVEL DEL MAR.
- 3.- EFECTOS DEL TERRENO.
- 4.- ESTRUCTURA GENERALIZADA, DE LA CORTEZA TERRESTRE

ELEMENTOS GEOMÉTRICOS DEL
ELIPSOIDE



RADIO DE CURVATURA DE LA
NORMAL MAYOR (1er VERTICAL)





$$h = H + N$$