



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO**



FACULTAD DE INGENIERÍA

**LOCALIZACIÓN DE PUNTOS DE ENLACE EN DUCTOS
SUBMARINOS, MEDIANTE EL SISTEMA DE POSICIONAMIENTO
GLOBAL (GPS)**

T E S I S

PARA OBTENER EL TITULO DE:

INGENIERO TOPÓGRAFO Y GEODESTA

PRESENTA:

GUSTAVO PIMENTEL LÓPEZ

DIRECTOR

ING. ADOLFO REYES PIZANO

México, D.F. 2008

Agradecimientos:

A quienes me dieron la oportunidad de respirar el amanecer, sentir el calor de cada sueño, a mi madre Sra. Gudelia López Hernández y mi padre. Sr. Pedro Pimentel Cruz, son mi fuerza para continuar.

A mis hermanos Armando, Pedro y Vicky que siempre me han apoyado, los quiero mucho.

A mi ángel que me ha apoyado en este infinito camino, siempre vivirás en mí.

A todos aquellos Maestros, Doctores y personal docente de esta Gran Universidad por sus sabias experiencias vertidas en los salones de clases y ejemplo a seguir: muchas gracias.

A ese gran equipo que son mis compañeros que siempre me dieron su apoyo con explicaciones consejos información desarrollo y sobre todo su tiempo el cual no podré pagar pero si dejar constancia de su apoyo; en este trabajo.

Y para todos aquellos grandes amigos que de una u otra forma estuvieron conmigo.

A todos muchas gracias.

LOCALIZACIÓN DE PUNTOS DE ENLACE EN DUCTOS SUBMARINOS, MEDIANTE EL SISTEMA DE POSICIONAMIENTO GLOBAL (GPS)

CONTENIDO

	INTRODUCCIÓN	
Capítulo I.	ANTECEDENTES	
	I.1 INFRAESTRUCTURA.....	4
	I.2 OBJETIVO DE LA OBRA.....	4
	I.3 ALCANCES GENERALES.....	5
Capítulo II.	ESTABILIZADO DE LÍNEAS SUBMARINAS	
Capítulo III.	REACONDICIONAMIENTO DE CRUCES	
Capítulo IV.	REFORZAMIENTO DEL SISTEMA DE PROTECCIÓN CATODICA	
Capítulo V.	GEODESIA	
	V.1 RESEÑA HISTORICA.....	26
	V.2 GEODESIA SATELITAL.....	42
	V.3 GEOIDE Y ELIPSOIDE.....	46
	ELIPSOIDE COMPARADO CON EL GEOIDE.....	51
	V.4 DATUM.....	55
	TIPOS DE TRANSFORMACION DE DATUMS.....	60
	V.5 SISTEMA DE COORDENADAS.....	65
	SISTEMAS DE COORDENADAS CARTESIANAS.....	66
	SISTEMAS DE COORDENADAS DE REFERENCIA EN GEODESIA SATELITAL.....	68
	SISTEMAS DE COORDENADAS DE REFERENCIA EN EL CAMPO DE GRAVEDAD DE LA TIERRA.....	75
	SISTEMAS DE COORDENADAS ESFERICAS ELIPSOIDALES.....	77
Capítulo VI.	CARTOGRAFÍA	
	PROYECCION CILINDRICA.....	82
	CUADRICULA UTM.....	84
Capítulo VII.	GPS (SISTEMA DE POSICIONAMIENTO GLOBAL)	
	INTRODUCCIÓN.....	89
	SEÑAL GPS.....	90
	FUNCIONAMIENTO DEL SISTEMA GPS.....	96
	RECEPTORES GPS.....	104
	FUENTES DE ERROR.....	105
	PRECISIÓN.....	109
	EL SISTEMA WAAS.....	110
	APLICACIONES DE LOS GPS.....	115
	EL FUTURO DE LOS SISTEMAS DE POSICIONAMIENTO GLOBAL.....	116
Capítulo VIII.	POSICIONAMIENTO GEODÉSICO	
	VIII.1 EQUIPO.....	119
	VIII.2 SOFTWARE.....	124
	VIII.3 METODOLOGÍA.....	160
	CONCLUSIÓN	
	TERMINOLOGÍA MARINA	
	DEFINICIONES	
	BIBLIOGRAFÍA	

INTRODUCCIÓN

México actualmente es una potencia mundial en la producción de hidrocarburos, aunque eventualmente se encuentran en yacimientos que sólo contienen hidrocarburos en estado gaseoso, la mayoría de los yacimientos contienen aceite con gas disuelto por lo que es imposible extraer únicamente el aceite, pues al hacerlo éste arrastra consigo parte del gas, al que se acostumbra llamar "gas asociado". en la Región Marina Suroeste, la totalidad del gas producido se encuentra asociado al crudo.

La aplicación de las técnicas de ingeniería petrolera en la explotación de los yacimientos tienen como objetivo aprovechar al máximo la energía presente en el (los) yacimientos (s). históricamente la explotación de los hidrocarburos se inició con un gran interés por el crudo y una actitud de relativa indiferencia por el gas, de ahí que antes fuera cosa común el observar campos petroleros poblados de quemadores de gas. A nivel mundial, la inversión por pozos en búsqueda de gas, representa del orden del 10% y 90% para los pozos de aceite.

El manejo de los hidrocarburos presenta características muy diferentes según se trate de líquidos o de gases, características que están muy ligadas con los conceptos de manejabilidad, seguridad y beneficio económico.

Además de separar el gas, es necesario comprimirlo para reducir el gran volumen que ocupa en las condiciones superficiales normales: y para manejarlo en condiciones de seguridad para las instalaciones, para el personal y para el ambiente, se requiere disponer de instalaciones adecuadas cuya construcción básicamente del atractivo económico que ofrecen haciéndose rentables mostrándose en la figura No. 1 los puntos de enlace típicos de operación.

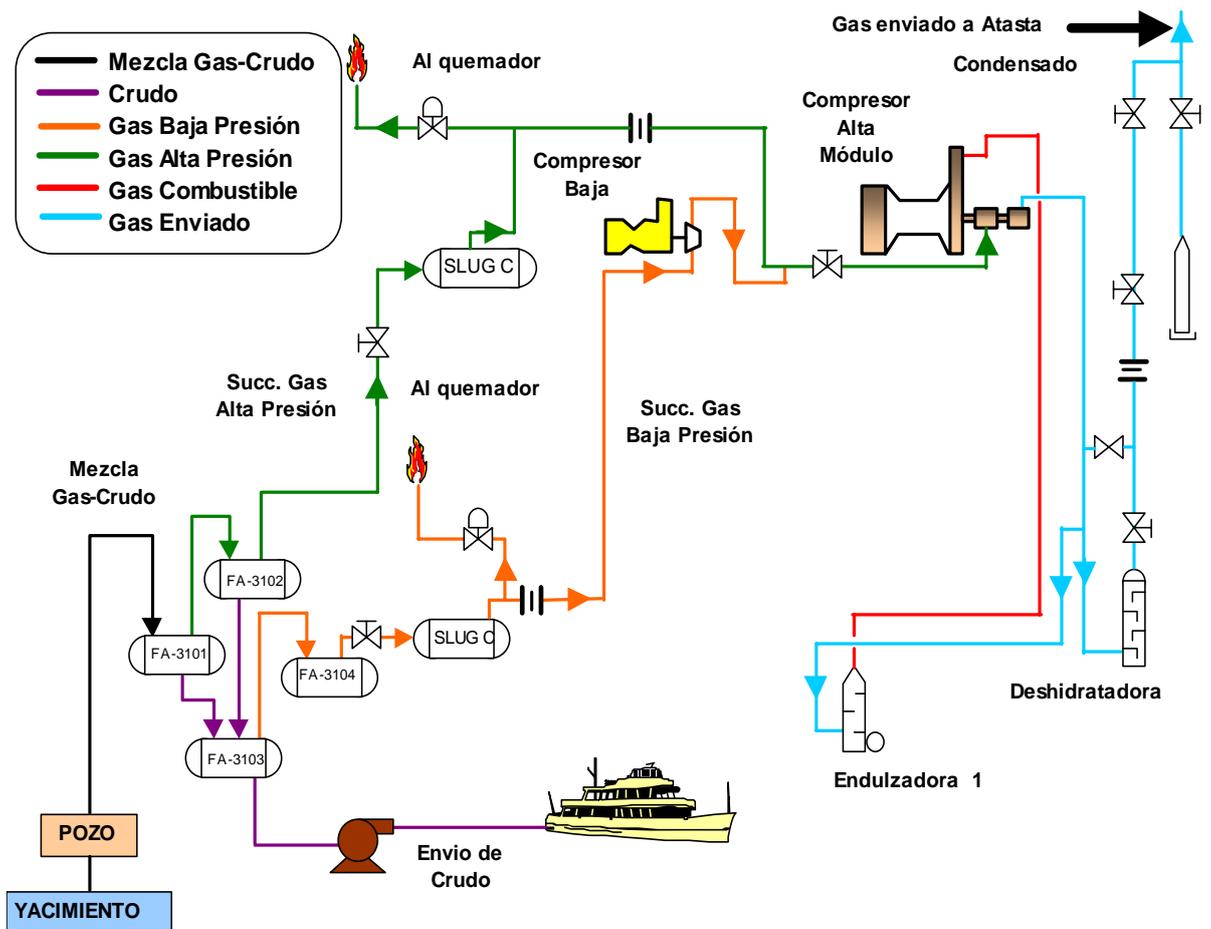


Figura No. 1.- Enlaces Típicos de Operación

Para ello que es necesario contar con un Sistema de Posicionamiento confiable en el cual la embarcación se encuentre en la ubicación correcta de los puntos de enlace, y por ende, se puedan realizar los diversos trabajos en condiciones confiables a los niveles especificados de seguridad, a fin de mantener la continuidad en el transporte de gas y aceite desde el origen destino, bajo normas de seguridad que permitan evitar fallas de alto riesgo que pongan en peligro la seguridad del personal, el entorno ecológico, la seguridad de las instalaciones y la producción manejada. ver figura No. 2

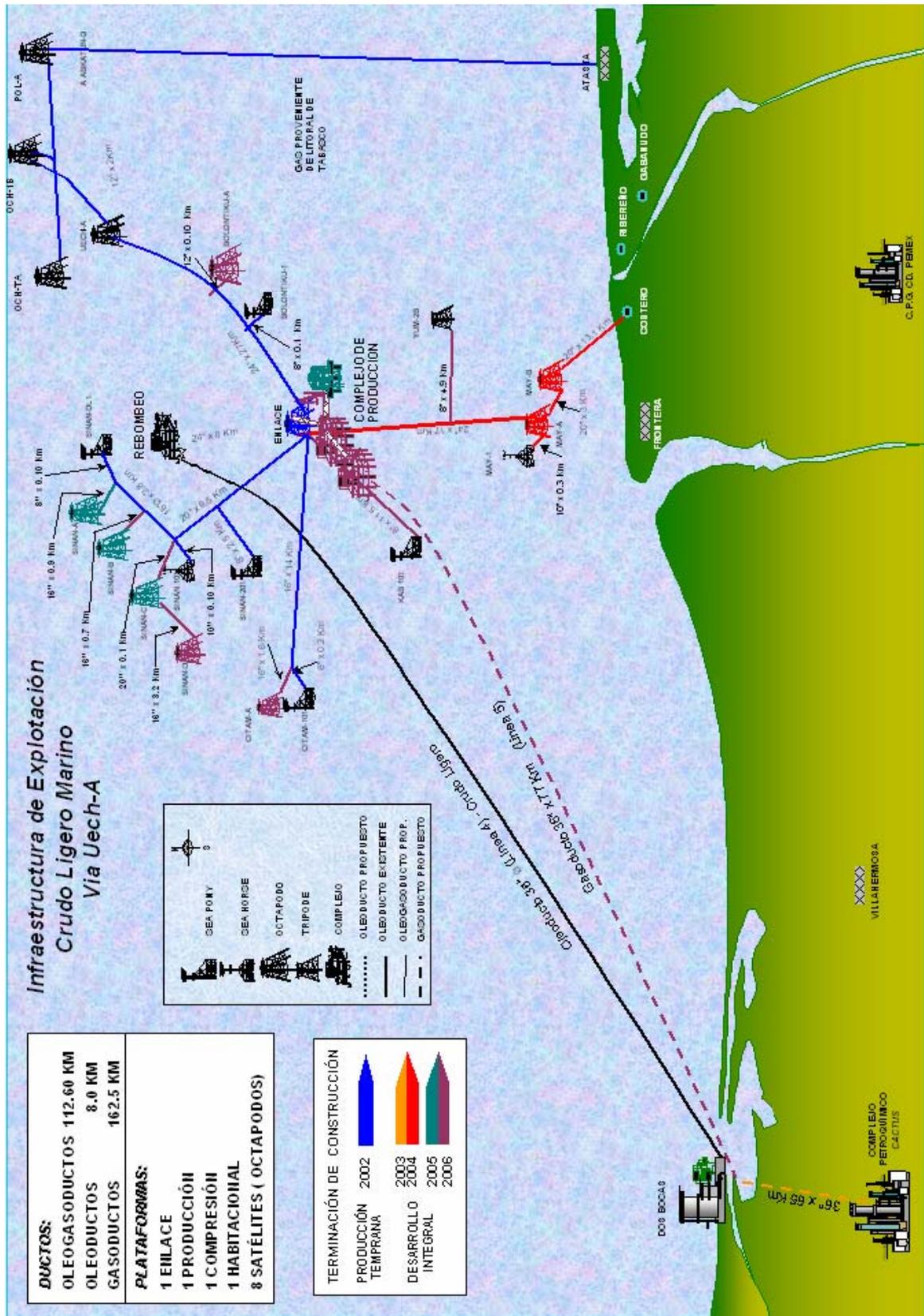


Figura No. 2 Infraestructura de explotación de la Sonda de Campeche

CAPITULO I

ANTECEDENTES

I.1 INFRAESTRUCTURA

La Región Marina Suroeste cuenta con una infraestructura para el transporte de hidrocarburos constituida por aproximadamente 800 km de ductos de diferentes diámetros y servicios.

Esta infraestructura forma una red de ductos submarinos que recolecta la producción de hidrocarburos mezclados de las plataformas satélites y la lleva a complejos marinos de producción, aquí la carga se separa en dos corrientes principales, una de aceite y otra de gas, las cuales se transportan a las terminales de exportación y distribución.

Los ductos submarinos, al encontrarse instalados en el fondo del mar, en un ambiente marino agreste, están expuestos a condiciones físicas y químicas que pueden llevar sus niveles de riesgo a rangos intolerables que pongan en peligro su integridad física. En forma genérica los efectos visibles causados por estas condiciones se pueden clasificar en tres componentes principales: socavaciones bajo la tubería, deslave y desaparición de protecciones en cruces de tuberías y desgaste de la protección catódica.

Estos efectos durante condiciones de tormenta se presentan una tendencia incremental debido a la vibración de la tubería y la velocidad del agua cerca del lecho marino, así como por el oleaje y las corrientes submarinas; generan desplazamientos de la línea de su posición original y pendientes prolongadas, así como deslaves en protecciones que cruzan provocando daños mecánicos en recubrimientos y metal base, así como polarización de protección catódica existente, que en conjunción con las condiciones de operación y propiedades de la tubería provocan inestabilidad hidrodinámica lo que representa un riesgo intolerable tanto para estas instalaciones como para el personal que trabaja en las plataformas marinas y para el medio ambiente.

I.2 OBJETIVO DE LA OBRA

El objetivo de la obra es restablecer las condiciones originales de diseño de las tuberías en el fondo del mar, las cuales han ido disminuyendo como consecuencia del tiempo y fenómenos naturales del entorno costa fuera.

Para ello, dentro, se ha diseñado una estrategia de integridad costa fuera en donde se contemplan tres actividades críticas de mantenimiento de ductos en el fondo del mar.

- ✘ Estabilizar los segmentos de tubería submarina sujetos a condiciones de riesgo inaceptable por socavaciones, descubrimiento y destrucción del lastre.
- ✘ Reacondicionar los cruces submarinos con protecciones deslavadas que permiten acercamientos y rozamientos peligrosos en tuberías submarinas.
- ✘ Rehabilitar el sistema de protección catódica de segmentos de tubería que han perdido su potencial electroquímico de protección tubo / suelo.

Con ello se permitirá mantener los ductos de la Región Marina Suroeste en condiciones confiables a los niveles especificados de seguridad, también coadyuvara a mantener la continuidad en el transporte de gas y aceite desde el origen destino, bajo normas de seguridad que permitan evitar fallas de alto riesgo que pongan en peligro la seguridad del personal, el entorno ecológico, la seguridad de las instalaciones y la producción manejada.

I.3 ALCANCES GENERALES

Estabilizado de líneas submarinas y Reacondicionamiento de cruces

En el Golfo de México una de las principales amenazas o peligros que afectan a la integridad mecánica de las tuberías alojadas en el fondo del mar son las socavaciones del lecho marino que generan espacios alargados entre la tubería y el lecho.

Particularmente en la Sonda de Campeche que se caracteriza por un lecho marino cambiante e inestable, estas socavaciones crecen de manera dramática asociadas a las cambiantes condiciones de operación, provocan esfuerzos y fatiga adicionales no contemplados en el diseño original de las tuberías, que terminan por generar daños mecánicos a los ductos y colapso final.

Entonces es prioridad de P.E.P Región Marina Suroeste, estabilizar las líneas submarinas detectadas con este tipo de peligros que aumentan de manera alarmante los límites de riesgo tolerable.

El estabilizado se efectuara mediante la colocación de apoyos o soportes y/o dragado con equipos especiales de chorro hidráulico, que no dañen el entorno ambiental ni la tubería.

Reforzamiento del sistema de protección catódica

De acuerdo con su diseño y construcción, la mayoría de los ductos marinos de la Sonda de Campeche, tiene una vida útil de diseño de 20 años. Periodo técnico en que se estima su duración de un sistema de protección anticorrosivo exterior, la cual consiste en un recubrimiento superficial complementado con un sistema de protección catódica galvanico basado en ánodos de sacrificio.

Cerca del final de este periodo de 20 años, se asume que los ánodos o brazaletes de sacrificio a base de aluminio terminan por reducirse y dar paso al fenómeno de la corrección exterior en la tubería de metal. La vigencia de este sistema se obtiene con apoyo de un R.O.V que tienen la capacidad de detectar los niveles de protección catódica a lo largo del ducto y con esta información inferir el desgaste de los ánodos y calcular las longitudes de tubería a reforzar mediante la instalación de nuevos ánodos de sacrificio.

CAPITULO II

ESTABILIZADO DE LÍNEAS SUBMARINAS

El procedimiento para estabilizar las líneas submarinas deberá cumplir con todos los aspectos técnicos requeridos para garantizar la seguridad de los ductos.

Los materiales de instalación permanente, deberán ser resistentes de acuerdo a corrientes de fondo (fuerza, dirección y franja de transición) tipo de suelo (arena, arcilla), temperatura del agua y criterio de oleaje.

La configuración final de las tuberías en el lecho marino, deberá ser tal que no existan radios de curvatura y bajo ninguna circunstancia generen un esfuerzo mayor del 18% de fluencia.

Para las líneas submarinas, se deberá efectuar el estabilizado del ducto superior que conforma el cruce en el área de influencia del mismo cumpliendo con lo siguiente:

Equipo

- a) Embarcación de posicionamiento dinámico.
- b) Software y sistema de posicionamiento diferencial global.
- c) Software de navegación Qinsy.
- d) Sistema de saturación para 6 buzos.
- e) Sistema de buceo de superficie (para apoyo a saturación)
- f) Equipo completo de Air-lift (dragado) de 14" \varnothing o el que se requiera
- g) Compresor 750 pcm.
- h) Mangueras de 1" \varnothing y conexiones
- i) Hand jett con bomba de 3 pasos, mangueras 2 \varnothing y pistola
- j) Winches 5 ton.
- k) Pescantes uno por banda y/o
- l) Grúa de la embarcación
- m) Canastilla para instalar costales y/o retirar chatarra
- n) Marco para la instalación de las colchonetas de concreto con superficie antiderrapante.
- o) Cables para las maniobras
- p) Eslingas para las maniobras
- q) Cabos de $\frac{3}{4}$ ", $\frac{1}{2}$ " y $\frac{1}{4}$ " \varnothing / grilletes de $\frac{3}{8}$ " $\frac{3}{4}$ " y $1\frac{1}{2}$ " \varnothing

- r) Lote de equipo de medición (cinta de lona de 30 mts. de longitud, flexometro, cintas de sastre, vernier, pit gage, crayones y acrílicos).
- s) Equipo de video submarino y atmosférico con fuente de iluminación submarino inc. sistema de edición
- t) Cámara fotográfica c/ flash (digital aérea y submarina)
- u) Detector de metales Jw fisher pulso 8 ó similar
- v) Varilla de 6 mts de largo de cold-roll de 1/2" \varnothing
- w) Gases de buceo y sus depósitos(helio, oxígeno, heliox y "skids")

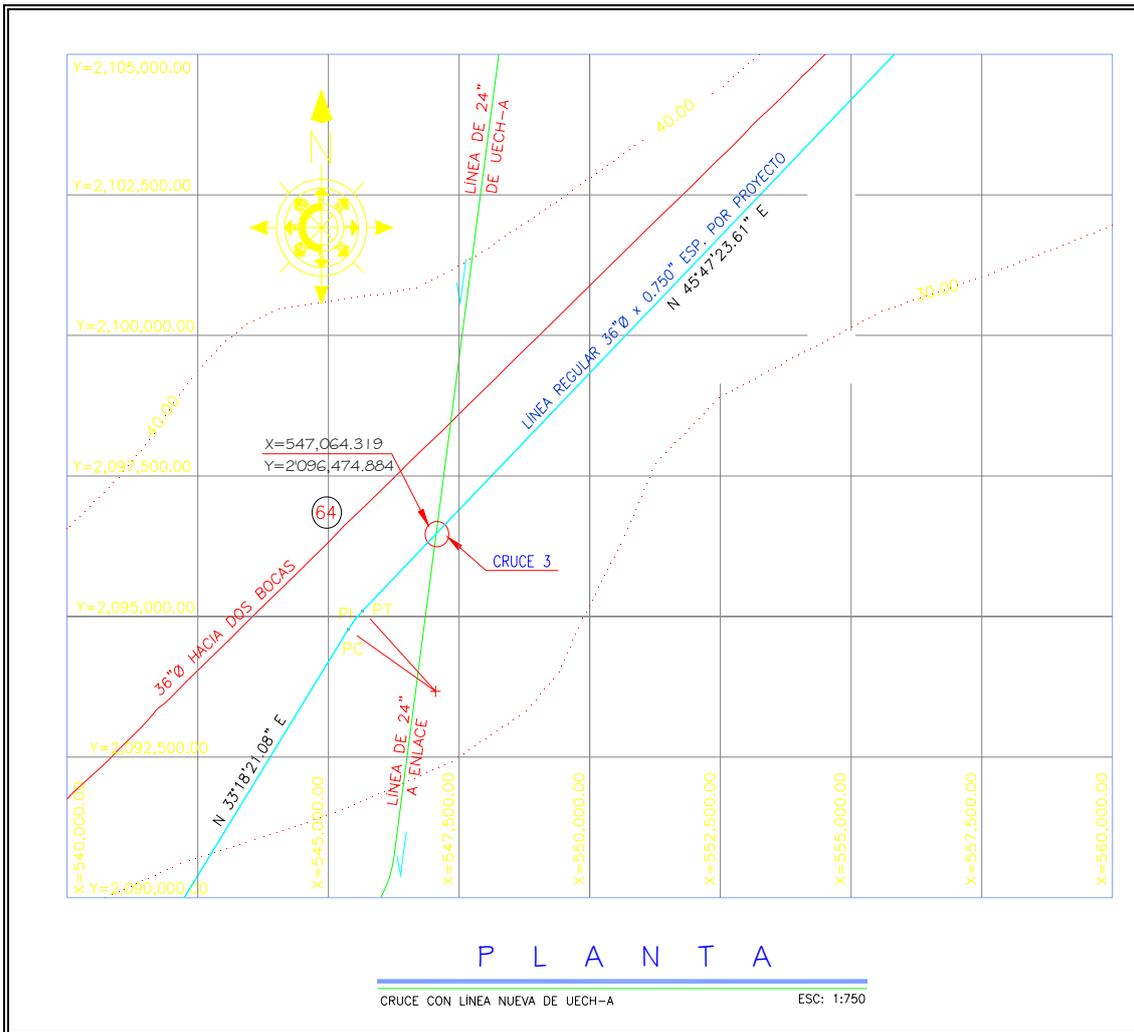
Material

Especificaciones del tapete de concreto ecológico flexible

- a) Tipo del tapete: recubrimiento (construcción)
- b) Dimensiones: 20" x 8" x 9"
- c) Peso: en aire 10,500 lbs., sumergido 6,000 lbs. (aprox.)
- d) Cuerpo: 160 elementos de concreto monolítico
- e) Concreto: densidad 145 lbs x cu. ft, resistencia 4,000 psi
- f) Armado: cable de 5/8" \varnothing de copolimero estabilizado con una resistencia a la tensión de 9,500 lbs
- g) Cemento tipo V o tipo II con aditivos puzolánicos con una densidad de 145 lbs lbs/pie cu. resistente al agua de mar
- h) Arena y la grava sana de buena densidad, graduada y ester libre de materia orgánica, aceites, ácidos.
- i) Pads o cojines de protección de pvc. de 7.5 x 7.5" de 3/8"

Desarrollo

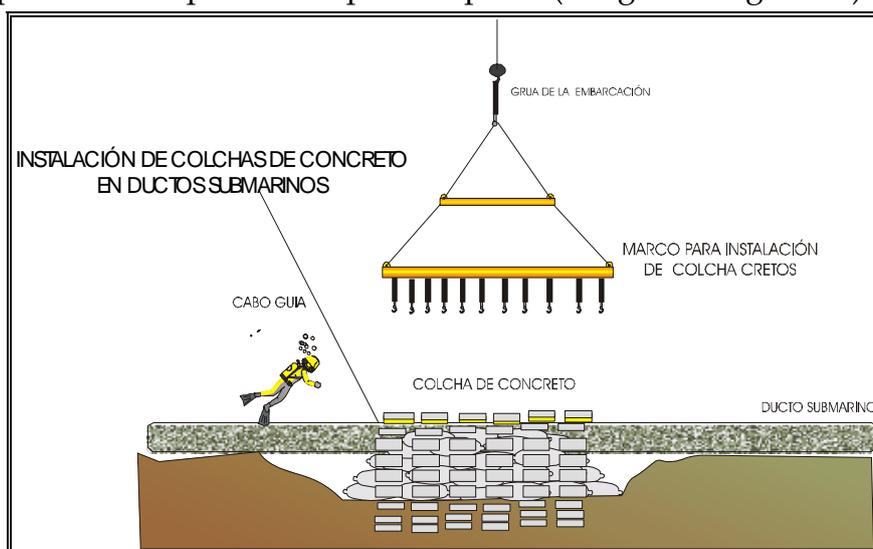
1. La embarcación con el apoyo del sistema (DGPS) y el Ing. Posicionador localizara las coordenadas de la línea, de acuerdo a la ingeniería de detalle del proyecto, procediendo a posicionar la embarcación en el lugar de los trabajos.
2. Localización de la línea a intervenir con buceo de superficie y mezcla de gases.



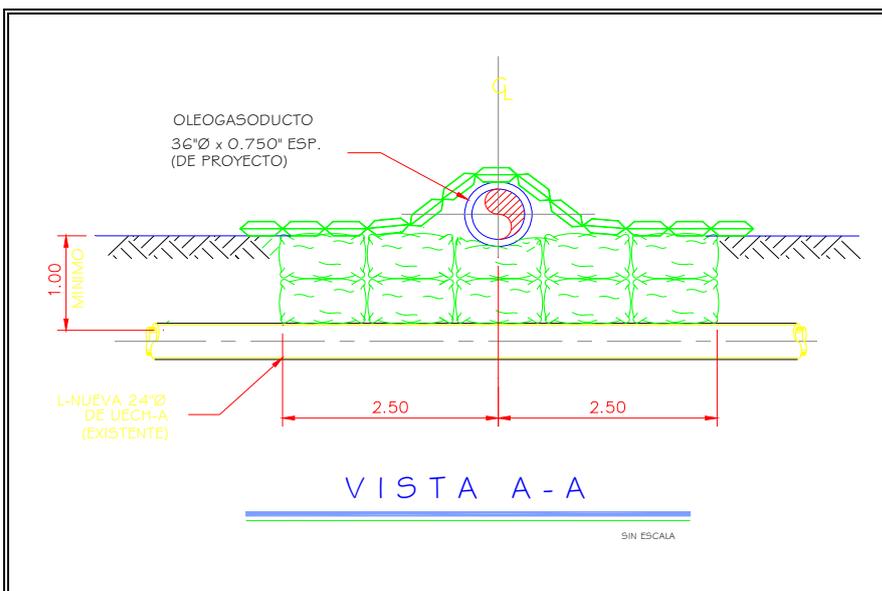
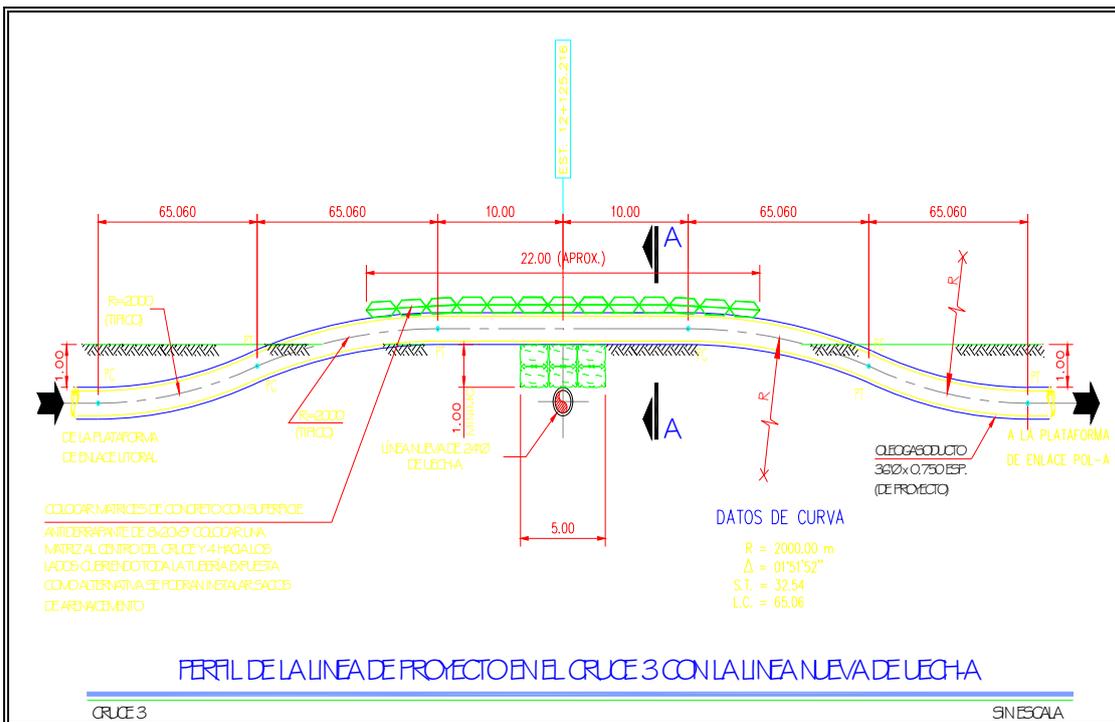
3. El buzo realiza la inspección subacuática para verificar las condiciones del ducto, previo al inicio de los trabajos:

- ✘ Inspección visual detallada comprendiendo limpieza del crecimiento marino o cualquier material cercano a la zona para realizar metrología, identificación de posible daño y dimensiones de la misma.
- ✘ Si existen daños mecánicos, se realiza inspección empleando pruebas no destructivas comprendiendo limpieza del área, prueba aplicando partículas magnéticas y/o ultrasonido con el objeto de detectar si en los daños mecánicos existen grietas no visibles o que requieran dimensionar.

- ✘ Inspección de la protección catódica en ambas líneas con el propósito de detectar zonas susceptibles a sufrir corrosión externa debido al mal funcionamiento del sistema de protección catódica producido por el ánodo de sacrificio o por su desplazamiento. La celda de referencia será de plata / cloruro de plata.
4. El buzo coloca 2 cabos guías con una separación de 10 ft. entre ellos para guiar el la colcha de concreto.
 5. En cubierta los maniobristas aseguran el colchacreto al marco de instalación "frame", así como verificar visualmente todas las orejas de izaje del colchacreto, las correas y las eslingas antes de enganchar.
 6. Se levanta el marco con apoyo de la grúa de la embarcación y usando las cuerdas guías para controlar el marco, se maniobra fuera de la borda y se baja el marco con la colcha de concreto siguiendo las instrucciones del buzo para guiarla.
 7. El buzo controlara la orientación con apoyo de los cabos guías para llevarla a su posición y coloca el tapete longitudinalmente sobre el ducto, usando el centro marcado de color amarillo como referencia para alinearlo con la corona del ducto. descender el tapete a su posición final distribuyéndolo de manera uniforme sobre le ducto verificando que la línea amarilla se encuentre alineada sobre el ducto en ambos lados.
 8. El buzo accione el mecanismo de liberación del marco permitiendo el libre paso de las cuerdas de izaje a través de las orejas de izaje hasta que el marco quede libre por completo. (ver grafica siguiente).



9. Una vez instalado el colchacreto en el sitio programado el marco se recupera a superficie.
10. Al terminar el acolchonamiento del ducto se procede a realizar la inspección con video submarino y fotografías, para verificar las condiciones finales del ducto estabilizado. (ver graficas siguientes).



CAPITULO III

REACONDICIONAMIENTO DE CRUCES

El procedimiento para estabilizar las líneas cruces submarinos deberá cumplir con todos los aspectos técnicos requeridos para garantizar la seguridad de los ductos.

Los materiales de instalación permanente, deberán ser resistentes de acuerdo a corrientes de fondo (fuerza, dirección y franja de transición) tipo de suelo (arena, arcilla), temperatura del agua y criterio de oleaje.

Posteriormente de la intervención del cruce, la separación mínima entre las dos líneas que conforman el cruce respectivo debe de ser de 1.0 metro.

La configuración final de las tuberías en el lecho marino, deberá ser tal que no existan radios de curvatura y bajo ninguna circunstancia generen un esfuerzo mayor del 18% de fluencia.

Equipo

- a) Embarcación de posicionamiento dinámico.
- b) Software y sistema de posicionamiento diferencial global.
- c) Software de navegación Qinsy.
- d) Sistema de saturación para 6 buzos.
- e) Sistema de buceo de superficie (para apoyo a saturación)
- f) Equipo completo de air-lift (dragado) de 14" ø o el que se requiera
- g) Compresor 750 pcm.
- h) Mangueras de 1" ø y conexiones
- i) Hand jett con bomba de 3 pasos, mangueras 2 ø y pistola
- j) Winches 5 ton.
- k) Pescantes uno por banda y/o
- l) Grúa de la embarcación
- m) Canastilla para instalar costales y/o retirar chatarra
- n) Red para instalar costales
- o) Cables para las maniobras
- p) Eslingas para las maniobras
- q) Cabos de 3/4", 1/2" y 1/4" ø / grilletes de 3/8" 3/4" y 1/1/2" ø
- r) Lote de equipo de medición (cinta de lona de 30 mts. de longitud, flexometro, cintas de sastre, vernier, pit gage, crayones y acrílicos).

- s) Equipo de video submarino y atmosférico con fuente de iluminación submarino inc. sistema de edición
- t) Cámara fotográfica c/ flash (digital aérea y submarina)
- u) Detector de metales jw fisher pulso 8 ó similar
- v) Varilla de 6 mts de largo de cold-roll de 1/2" ø
- w) Gases de buceo y sus depósitos(helio, oxígeno, heliox y "skids")

Materiales

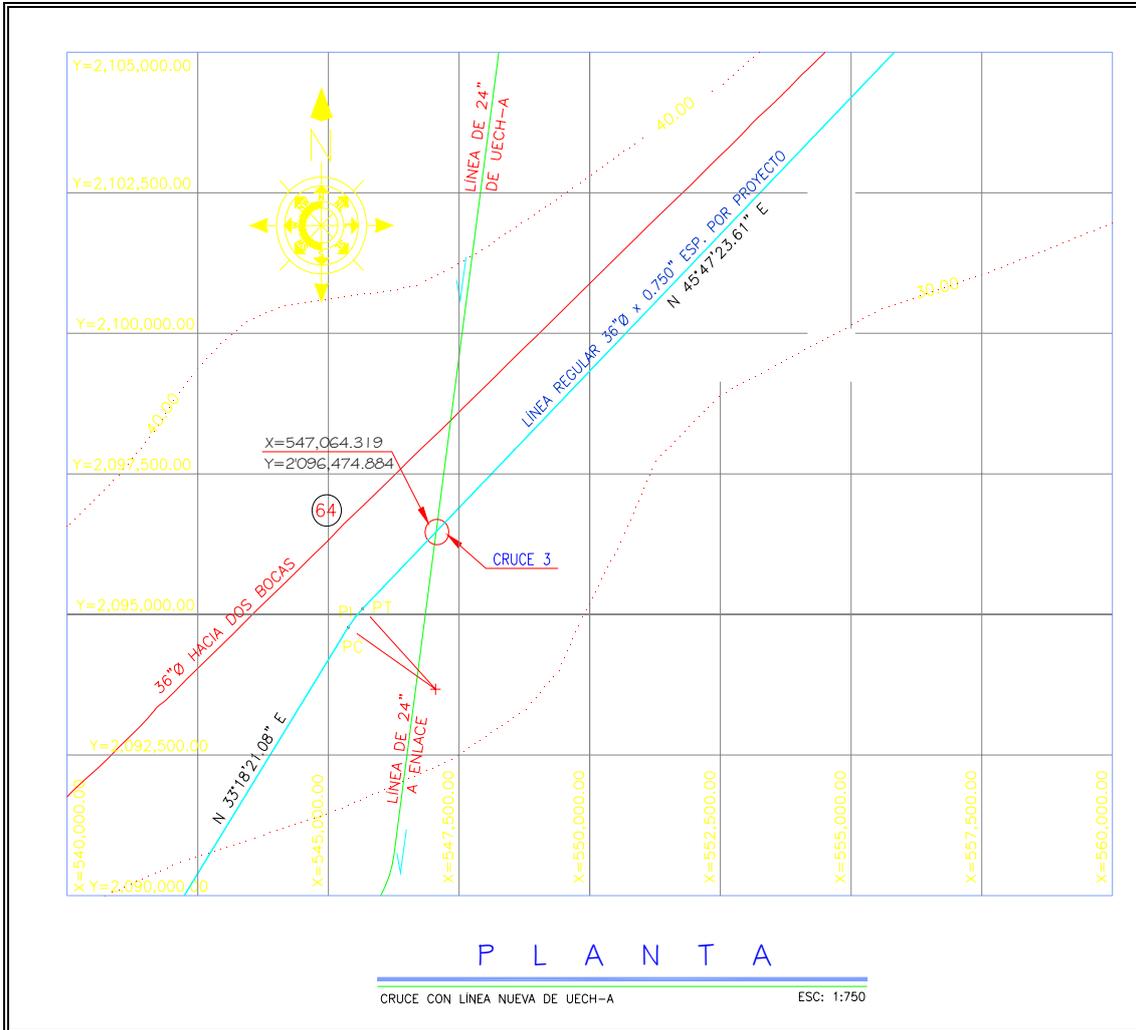
- a) Sacos de arena - cemento
- b) Saco de material sintético tipo bolsacreto de 0.80 mts x 0.50 mts x 0.15 mts de alta resistencia y doble costura de cierre
- c) Proporción deberá ser de 80/20 arena- cemento
- d) Cemento deberá de ser del tipo V o tipo II con aditivos puzolánicos resistente al agua de mar
- e) Arena de buena densidad, graduada y ester libre de materia orgánica, aceites, ácidos.
- f) Relación de agua -cemento será del 0.5 empleando agua de mar

Desarrollo

Para el reacondicionamiento de los cruces submarinos, mediante la separación de los ductos que lo conforman se realiza lo siguiente:

1. La embarcación con el apoyo del sistema (DGPS) y el Ing. Posicionador localizara las coordenadas de la línea, de acuerdo a la ingeniería de detalle del proyecto, procediendo a posicionar la embarcación en el lugar de los trabajos.

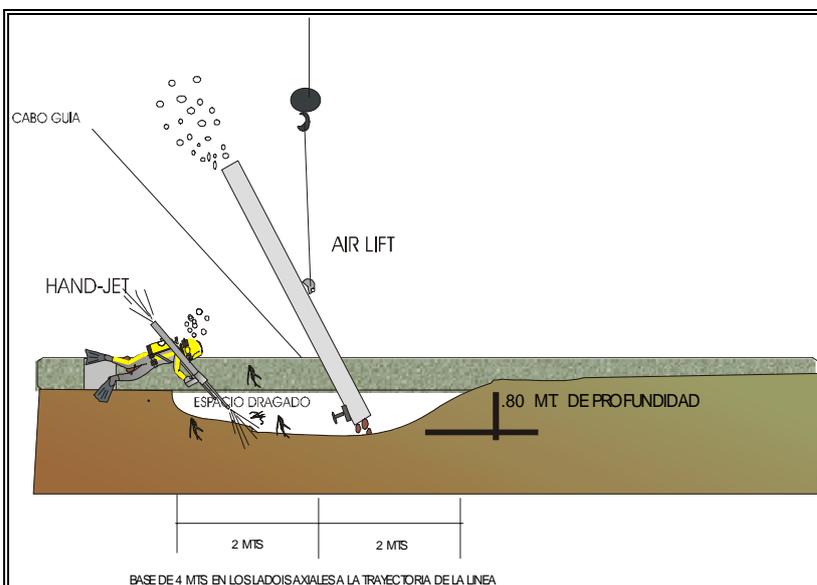
2. Localización del cruce a intervenir con buceo de superficie y mezcla de gases.



3. Inspección de la zona ambas líneas que conforman el cruce el cual incluye:

- ✘ Retiro de costales existentes.
- ✘ Inspección visual detallada comprendiendo limpieza del crecimiento marino o cualquier material cercano a la zona para realizar metrología, identificación de posible daño y dimensiones de la misma.

- ✘ Si existen daños mecánicos, se realiza inspección empleando pruebas no destructivas comprendiendo limpieza del área, prueba aplicando partículas magnéticas y/o ultrasonido con el objeto de detectar si en los daños mecánicos existen grietas no visibles o que requieran dimensionar.
 - ✘ Inspección de la protección catódica en ambas líneas con el propósito de detectar zonas susceptibles a sufrir corrosión externa debido al mal funcionamiento del sistema de protección catódica producido por el ánodo de sacrificio o por su desplazamiento. La celda de referencia será de plata / cloruro de plata.
4. Después de realizar la inspección verificar si se requiere dragar para alcanzar la distancia que se requiere por ingeniería (0.80 mts. de la parte baja de la línea al lecho marino).
 5. Si se encuentran objetos que puedan interferir en el dragado se removerán, y posteriormente se procede a dragara con Air lift y/o Jand jet “si se requiere” (ver grafica siguiente).



6. En superficie, el operador del compresor y los maniobristas tendrán el equipo de dragado listo (Air - lift o en su momento el equipo de Hand - jet) listo para ser enviado a el buzo en el fondo.

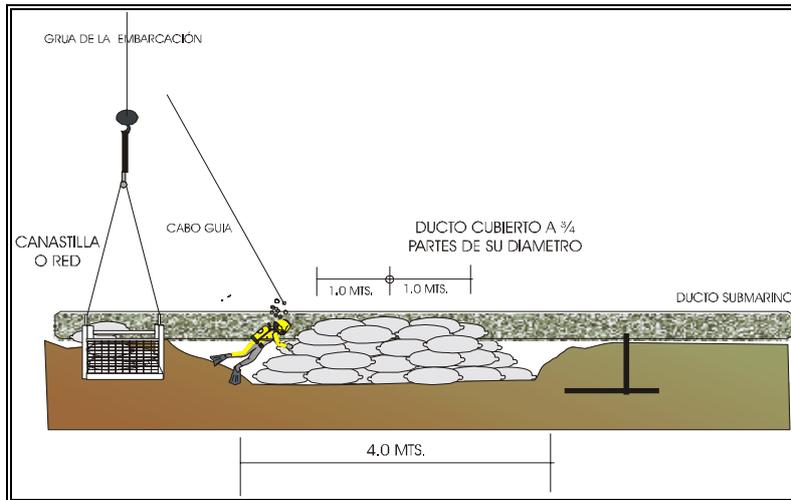
Diametro	Volumen requerido	
	p.c.m.	psi
18" ø	650	100
16" ø	600	100
14" ø	575	100
12" ø	550	100

Nota: la presión de salida del suministro de aire siempre deberá ser 100 psi arriba de la presión del fondo.

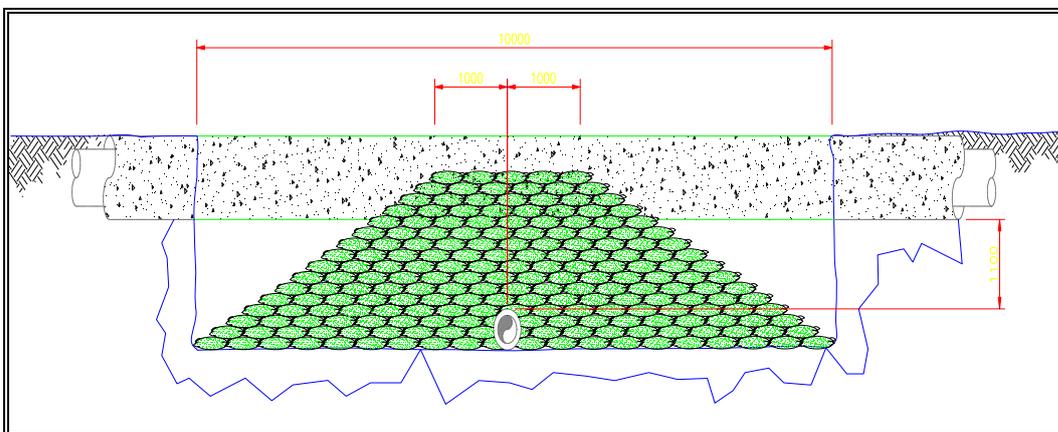
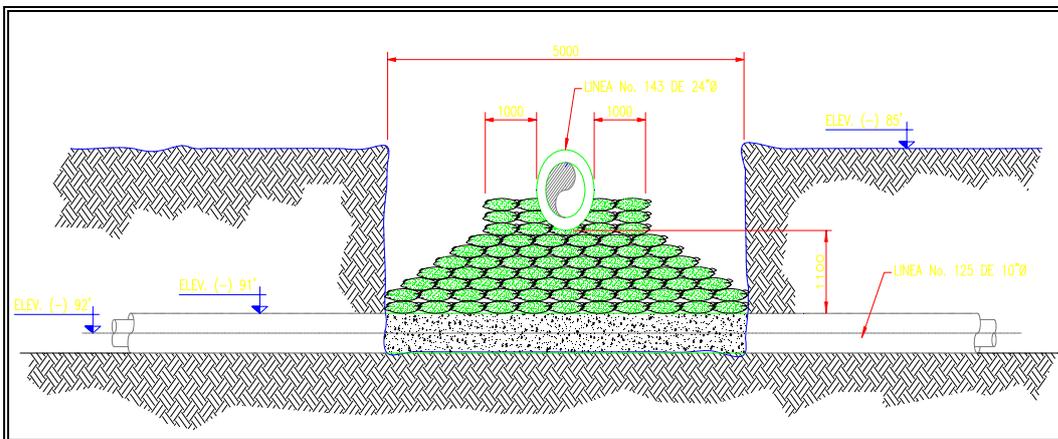
7. El buzo guiara el equipo hasta la posición de dragado de la línea e iniciara la operación.
8. Se continua el dragado a lo largo, ancho y profundo del cajón de acuerdo a los planos de ingeniería que P:E.P proporcione.

Nota: especificaciones de diseño : cada soporte deberá considerar 80 cms. de la parte inferior del ducto al lecho marino formando una base de 4 mts. en los lados axiales a la trayectoria de la línea y de 6 mts. mas el diámetro de la tubería en los lados perpendiculares a la trayectoria de la tubería

9. El buzo realiza la inspección subacuatica, para verificar las condiciones de la línea y confirmara las medidas previo al inicio de los trabajos de instalación de sacos arena cemento para el acolchonamiento del ducto.
10. La colocación de los sacos arena-cemento se realiza bajando cargas de 25 a 50 sacos (dependiendo del tamaño de la red o la canastilla).
11. El buzo guiara la carga hasta la posición más cercana de el cruce para descargar los costales y procede a estibar los costales en la base inferior uniformemente de acuerdo a la ingeniería (base de 4 mts. en los lados axiales a la trayectoria de la línea y de 6 mts. mas el diámetro de la tubería en los lados perpendiculares a la trayectoria de la tubería hasta llegar a la tubería por la parte inferior y hacer contacto con ella. (ver grafica siguiente).



12. Al terminar el acolchonamiento del ducto se procede a realizar la inspección con video submarino y fotografías, para verificar las condiciones finales del ducto estabilizado. (ver graficas siguientes).



CAPITULO IV

REFORZAMIENTO DEL SISTEMA DE PROTECCIÓN CATÓDICA

Los trabajos de reforzamiento del sistema de protección catódica de los ductos submarinos se realizan mediante la instalación de un ánodo de sacrificio, el cual tiene que tener un peso de 725 lbs, una configuración geométrica tipo trapezoidal o de brazaete, con una velocidad de consumo de 17.5 - 18.5 lbs/amp-año, una capacidad de corriente de 1150-1280 amp-hrs/lbs, tendrá un potencial de tubería a proteger de 1.0 - 1.5 volts con relación a una media celda de plata cloruro de plata, para una vida útil de 20 años.

Los ánodos deberán tener la siguiente composición química:

Elemento	Composición
Zinc (Zn)	2.8 - 3.5
Silicio (Si)	0.08 - 0.12 máx.
Indio (In)	0.01 - 0.02
Aluminio (Al)	Remanente

Equipo

- a) Embarcación de posicionamiento dinámico
- b) Software y sistema de posicionamiento diferencial global
- c) Software de navegación Qinsy
- d) Sistema de saturación
- e) Sistema de buceo de superficie
- f) Equipo de soldadura submarina y atmosférica
- g) Cepillo de copa para carda
- h) Mangueras de 1" \varnothing y conexiones
- i) Winches 5 ton.
- j) Pescantes uno por banda y/o
- k) Grúa de la embarcación
- l) Canastilla para instalar costales y/o retirar chatarra
- m) Cables para las maniobras
- n) Eslingas para las maniobras
- o) Cabos de $\frac{3}{4}$ ", $\frac{1}{2}$ " y $\frac{1}{4}$ " \varnothing / grilletes de $\frac{3}{8}$ " $\frac{3}{4}$ " y $1\frac{1}{2}$ " \varnothing
- p) Lote de equipo de medición (cinta de lona de 30 mts. de longitud, flexometro, cintas de sastre, vernier, pit gage, crayones y acrílicos).

- q) Equipo de ultrasonido Epoch III o similar c/ cables, transductores y calibradores
- r) Water blaster de 20,000 psi y/o equipos hidráulicos
- s) Equipo de video submarino y atmosférico con fuente de iluminación submarino y sistema de edición
- t) Cámara fotográfica c/ flash (digital aérea y submarina)
- u) Varilla de 6 mts de largo de cold-roll de 1/2" \varnothing
- v) Gases de buceo y sus depósitos(helio, oxígeno, heliox y "skids")

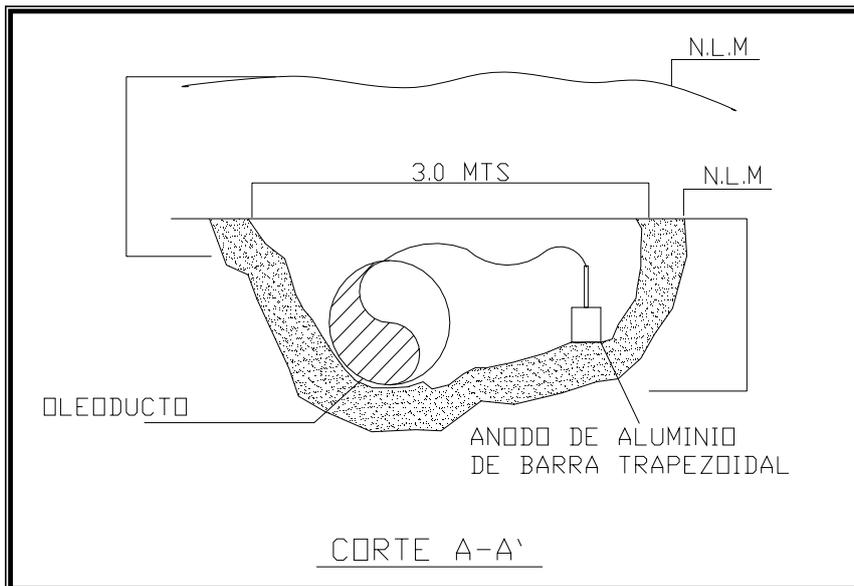
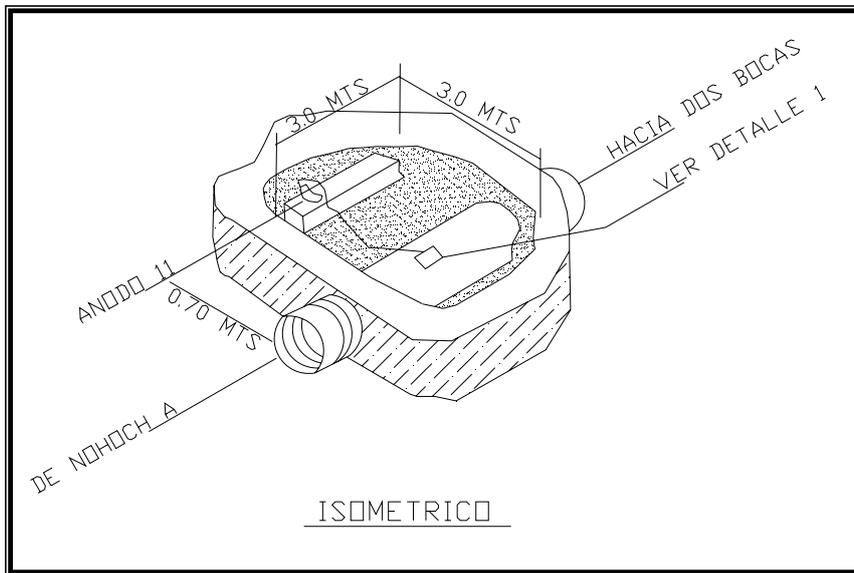
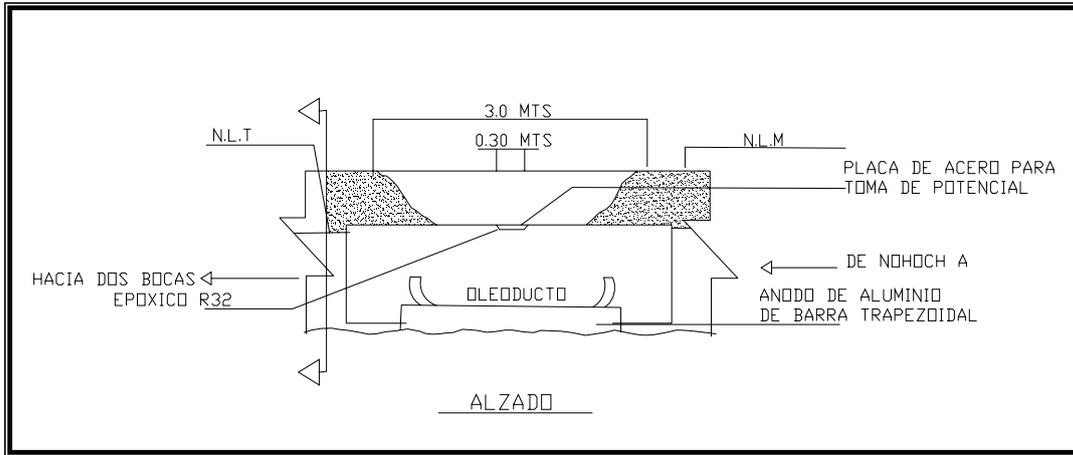
Materiales

- a) Ánodos de aluminio de conformación tipo trapezoidal (barra) de alta eficiencia con un peso de 725 lbs. de peso, con una velocidad de consumo de 17.5 - 18.5 lbs/amp-año, con una capacidad de corriente 1150-1280 amp-hrs/lbs, el cual deberá entregar un potencial de tubería a proteger en volts de 1.0 -1.5 con relación a una media celda de cloruro de plata , para una vida útil de 20 años (marca Harco , tipo galvanium III, modelo h725 o equivalente), con una dimensión de 8 pies de longitud, 9.5" de ancho y 9.5" de alto.
- b) Cable calibre numero 8 con doble forro de polietileno negro de alto peso molecular (hmwpe) -pvc para uso marino
- c) Terminal tipo ojillo
- d) Placa de acero al carbón a-36 de 4" x4" y espesor de 3/8" c/ orillas redondeadas y la placa cepillada.
- e) Recubrimiento epoxico Re-32 100% sólidos
- f) Soldadura submarina (Br-20)
- g) Soldadura de bronce y fundente

Procedimiento

1. Acondicionamiento de placa de acero al carbón a-36 de 4" x 4" por lado y 3/8" de espesor con esquinas redondeadas, se realiza limpieza con carda. sobre la placa metálica
2. Se solda el cable de calibre no.8 de 5 mts. de longitud doble forro de polietileno negro de alto peso molecular para uso marino colocando en el extremo contrario del cable una terminal soldada tipo ojillo. posteriormente se aplica el recubrimiento epoxico Re-32 con un espesor de 0.125"

7. Una vez descubierto el ducto procedemos a retirar el lastre del concreto en un área aproximada de 30 x 30 cms. con Water blaster de 20,000 psi. también se deberá realizar una limpieza mecánica con cepillo hidráulico o con la misma Water blaster de el recubrimiento dieléctrico (mecánico) para que permita un contacto eléctrico efectivo entre la placa metálica del cable del ánodo y el ducto.
8. Es conveniente medir el potencial del ducto empleando un multímetro digital de alta impedancia y un electrodo de referencia de plata-cloruro de plata antes de la instalación del ánodo.
9. Se deberá realizar inspección de espesores con ultrasonido en la zona donde se realizara la soldadura de la placa a la tubería en el área de 0.30 x 0.30 mts. en caso de encontrares espesores críticos se deberá cubrir nuevamente la zona descubierta con recubrimiento epoxico Re-32 y se deberá realizar otra ventana cercana al punto original, hacia adelante ó atrás con el fin de realizar la soldadura de la placa del ánodo.
10. Previo a bajar el ánodo al fondo se deberá activar el mismo efectuando una limpieza mecánica con carda para su activación y soldar la placa.
11. Una vez soldada la placa en el ánodo se deberá verificar el potencial del ducto tomando la lectura con un multímetro de alta impedancia y un electrodo de referencia (celda de cloruro de plata) debiendo presentar una lectura de potencial estable con un ligero incremento de valor potencial comparado con el obtenido antes de la instalación del ánodo lo cual confirma un buen contacto, se realiza la aplicación de la resina, epoxica Re-32 cubriendo la placa y la soldadura efectuada así como el área donde se haya retirado el recubrimiento dieléctrico de la tubería.
12. Finalmente el ducto y el ánodo serán enterrados nuevamente con material de sitio o costales de arena para estabilizar la línea y el ánodo no se mueva de su posición y no pierda contacto.(ver gráficas siguientes).



CAPITULO V

GEODESIA

La Geodesia es una de las Ciencias más antiguas cultivada por el hombre. El objeto de la Geodesia es el estudio y determinación de la forma y dimensiones de la Tierra, de su campo de gravedad, y sus variaciones temporales; constituye un apartado especialmente importante la determinación de posiciones de puntos de su superficie. Esta definición incluye la orientación de la Tierra en el espacio.

Etimológicamente la palabra Geodesia, del griego $\gamma\eta\delta\alpha\iota\omega$ (divido la tierra), significa la medida de las dimensiones de la Tierra, en su acepción moderna también engloba el estudio del campo de gravedad.

De acuerdo a la definición clásica de F.R. Helmert (1880), la Geodesia es la ciencia de la medición de la Tierra y la representación de su superficie terrestre y oceánica por métodos cartográficos, esta definición incluye la determinación del campo de gravedad externo de la Tierra.

Todo el proceso de **determinación de posiciones** geodésicas está intrínsecamente ligado con la forma y dimensiones de la Tierra, por lo tanto el problema de la determinación de la figura de la Tierra no es puramente teórico, sino que tiene una proyección práctica en lo referente al cálculo de coordenadas de puntos y a la resolución de problemas geométricos sobre su superficie. La parte teórica del problema general de la **figura de la Tierra** consiste en el estudio de las superficies de equilibrio de una hipotética masa fluida, sometida a las acciones gravitatorias y a un movimiento de rotación.



Imagen de la Tierra desde el espacio

Por una parte habrá que efectuar numéricamente una comprobación de que las formas teóricas que se establezcan sean compatibles con la realidad, y por otra, a partir de la observación, habrá que calcular los parámetros que definan su forma y sus dimensiones. Aquí los conceptos físicos y geométricos están interrelacionados; la teoría del potencial y las ecuaciones diferenciales juegan un papel principal.

En Geodesia la superficie matemática de la Tierra es el **geoide**, superficie equipotencial en el campo de la gravedad terrestre que se toma como cota cero en la determinación de altitudes ortométricas. La materialización aproximada del geoide sería una superficie que envolviera la Tierra y que resultase de la prolongación de la superficie media de los mares a través de los continentes, siendo normal a todas las líneas de fuerza del campo gravífico terrestre.

La determinación del geoide se convierte así en uno de los objetivos fundamentales de la Geodesia.

El estudio de las **mareas terrestres** o variaciones periódicas de la vertical también es objeto de la Geodesia, cuyas conclusiones al respecto son de sumo interés para la astronomía y la geofísica. Se estudian fundamentalmente las acciones atractivas del Sol y la Luna sobre la Tierra, la teoría del movimiento de estos astros es bien conocida. La observación del fenómeno consiste en la medida de las desviaciones provocadas en la vertical física, en sus componentes verticales y horizontales.

Este es el objeto de la Geodesia en su forma general, sin embargo no debemos olvidar otros fines prácticos como su aplicación a la formación de cartas o **mapas** en su más amplio sentido, incluyendo desde la carta topográfica fundamental de un país a las cartas o mapas especiales para fines concretos. En estos menesteres la Geodesia debe proporcionar la infraestructura geométrica necesaria y efectuar mediciones precisas de distancias, ángulos, altitudes, orientaciones observaciones a satélites, etc. La formulación matemática se trata en la teoría de **Redes Geodésicas**. Como ejemplos, las cartas hidrográficas para la navegación o las cartas planimétricas de empleo en agrimensura o catastro implican, cada una de ellas, una Geodesia particular con métodos apropiados. Tanto la medida geométrica de emplazamiento de radiofaros, torres de control, antenas, como los apoyos de base para construcción de túneles, acueductos o autopistas incumbe en parte a la Geodesia. También debemos incluir los estudios del medio ambiente, búsqueda de recursos mineros y energéticos, sobre todo para fijar áreas de explotación y zonas de prospección para concesiones. Estas y otras necesidades civiles hacen que se desarrollen métodos precisos y se utilicen tanto las técnicas clásicas como los modernos satélites artificiales.

Mención aparte debemos hacer al estudio de **deformaciones de la corteza**. La precisión alcanzada por los instrumentos de medida geodésicos es tan alta que pueden detectarse movimientos de la corteza del orden del milímetro. Esto abre un nuevo campo de actuación en el que entran de lleno los estudios de control de zonas activas de la corteza, los parámetros determinados pueden utilizarse como precursores de desastres naturales como en el caso de terremotos o erupciones volcánicas y su conexión con la geodinámica del planeta. Por último las grandes aplicaciones de la fijación de posiciones relativas de puntos con precisiones del orden de la décima de milímetro. Esta precisión es necesaria en el control de ciertas instalaciones tales como fábricas de funcionamiento automático, centrales nucleares, instalación de radiotelescopios y en el estudio de deformación de presas y de grandes estructuras, etc.

Divisiones de la Geodesia

Los objetivos de la Geodesia pueden alcanzarse siguiendo diversos métodos de trabajo a partir de distintos tipos de datos obtenidos directa o indirectamente, siendo así que atendiendo a ellos podemos distinguir tres grandes ramas.

Astronomía Geodésica.- Es aquella parte de la Geodesia que con métodos y observaciones astronómicas trata fundamentalmente de obtener la dirección de la vertical; determina, pues, coordenadas astronómicas, latitud Φ , longitud λ (o el tiempo t) y acimutes astronómicos a . Con los datos obtenidos trata de determinar el geoide como figura de la Tierra por el método de nivelación astrogeodésica, y efectuar la reorientación de redes geodésicas en la compensación con puntos Laplace. Las determinaciones astronómicas, tanto su teoría como sus métodos son a veces incluidas dentro de la astronomía de posición. Los métodos de pasos meridianos y de alturas iguales son los más comúnmente empleados.

Geodesia Geométrica.- Es aquella rama de la Geodesia en la que los datos de observación están constituidos por las medidas de ángulos y distancias en la superficie terrestre. Estos datos son referidos a un elipsoide de referencia para construir las triangulaciones en el caso de la Geodesia clásica bidimensional o bien estudiados en coordenadas cartesianas en el caso de la Geodesia tridimensional. También son necesarias las determinaciones de altitudes de puntos sobre una superficie de cota cero. El conocimiento de la geometría del elipsoide de revolución es fundamental.

Geodesia Dinámica.- Es aquella rama de la Geodesia que basada en la teoría del potencial, trata de las medidas de la gravedad, del estudio del campo exterior y de la obtención de la forma de la Tierra; sus datos fundamentales son las medidas de la gravedad efectuadas generalmente en superficie, y las perturbaciones observadas en el movimiento de un satélite artificial. Está relacionada con la Geodesia geométrica, con la geofísica, con la astronomía y con la mecánica celeste. Suele subdividirse en gravimetría, teoría del campo y consecuencias. No obstante esta división, hoy día los métodos globales de la Geodesia actúan en conjunto con datos geométricos y dinámicos a fin de alcanzar sus objetivos de forma conjunta en la llamada **geodesia integrada**.

VI. RESEÑA HISTORICA

El estudio y evolución de la Geodesia ha planteado grandes problemas matemáticos en todas las épocas, y en la historia de esta ciencia aparecen los más eminentes científicos de la Humanidad, quienes han aportado sus conocimientos y contribuido a su desarrollo. Al mismo tiempo, o quizá por ello, la Geodesia ha sufrido los avatares y controversias del desarrollo cultural de los pueblos y en muchos casos la influencia de ciertas filosofías e incluso de la propia teología, sobre todo en la edad media, ha sido manifiestamente negativa.

Grecia

Las primeras referencias griegas sobre la forma de la Tierra son más poéticas que científicas, no hay más que leer los poemas de **Homero (900 a.C.)**. En sus poemas heroicos resume todos los conocimientos cosmográficos y geográficos de la época y del pueblo heleno, en gran desarrollo, con una gran imaginación. Supone la Tierra plana y limitada en todos sus sentidos por las aguas del océano, coloca en medio a Grecia y en particular al monte Olimpo correspondiente a la Tessalia. En los confines del horizonte supone misteriosas columnas que sirven de sustentáculo a los cielos; bajo el suelo a gran profundidad sitúa a Tártaro morada de los enemigos de los dioses y fuera de los confines misteriosos de la Tierra el caos o la inmensidad. Esto no es ni más ni menos que la interpretación de la naturaleza por un espíritu de imaginación brillante.

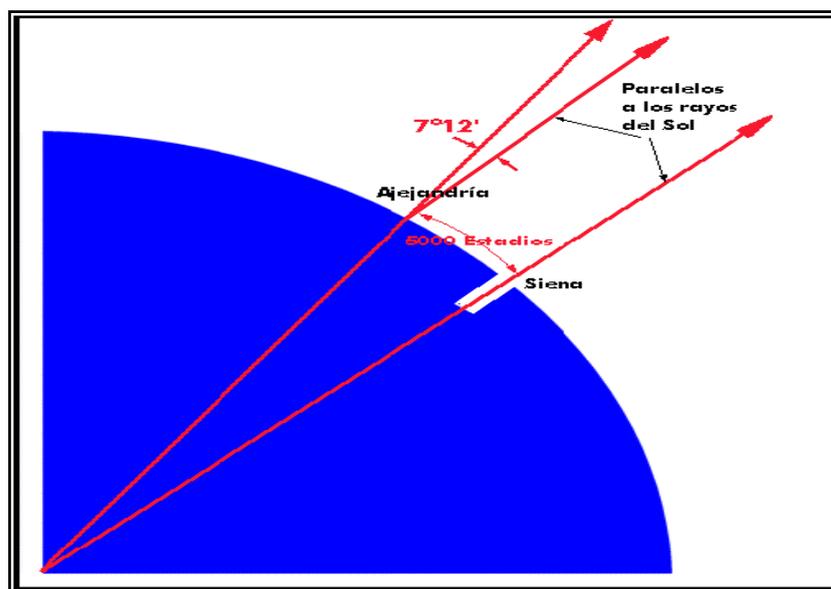
Tales de Mileto (639-546 a.C.) decía que la Tierra era un barco redondo flotando en un océano sin límites. **Anaximandro de Mileto (610-547 a.C.)**, discípulo de Tales, dice que es un cilindro que ocupa el centro de todo lo creado, pero construye la primera carta geográfica conocida. Para su discípulo **Anaxímenes (550-480 a.C.)** y para **Anaxágoras de Clazomene (500-428)**, el Sol es un disco muy delgado y la Tierra es otro disco o trapecio suspendido en el aire. **Jenofantes de Colofón (540 a.C.)** suponía la Tierra plana e ilimitada.

Los filósofos griegos afirmaban que la Tierra era esférica 500 años a. C. y se apoyaban en que la forma geométrica más perfecta era la esfera. **Parménides (515-440 a.C.)** y **Empedocles (470 a.C.)** emitieron por primera vez la idea de la esfericidad de la Tierra y su aislamiento en el espacio. **Pitágoras de Samos (569-470 a. C.)** llegó a decir que la Tierra no podía tener otra forma y que además estaba aislada en el espacio e inmóvil. **Filolao (450 a.C.)**, de la escuela pitagórica, opina que la Tierra gira alrededor de si misma produciendo los días y las noches y se desplaza, como el Sol, la Luna, los planetas y a mayor distancia el cielo con las estrellas fijas, alrededor del fuego central, alma del mundo; también se desplaza el Antichton (hemisferio opuesto). Sin embargo, **Leucipio (460-370 a.C.)** y **Demócrito de Abdera (460-370 a.C.)** suponían otra vez que era un disco plano sostenido por el aire. **Hicetas, Heráclides (388-315 a.C.)** y **Efanto** atribuían a la Tierra un movimiento de rotación y pensaban que por lo menos la Tierra, Mercurio y Venus se movían alrededor del Sol. **Platón (429-338 a.C.)**, que admite que la Tierra es redonda, la supone aislada e inmóvil. **Eudoxio de Gnido (409-356 a.C.)**, discípulo de Platón, da la teoría de las esferas de cristal para explicar el movimiento de los planetas y estrellas (supone veintiséis) con ejes en distintas direcciones y movimientos diversos, **Calipo** llega a treinta y tres esferas y **Aristóteles (384-322 a.C.)**, a cincuenta y cinco.

La teoría aristotélica sostiene: 1) La Tierra es esférica porque tal es la forma aparente de los demás astros, tal es también la forma que toma un cuerpo, como una gota de agua, sometido a la sola presencia de sus partes y tal es la forma que nos revela la sombra terrestre en los eclipses de Luna. 2) Las dimensiones de la Tierra no deben ser desmesuradas puesto que con el cambio de lugar varían el aspecto y número de las estrellas visibles. 3) La Tierra no debe moverse en el espacio, ya que su movilidad hipotética no se refleja en la posición constante de los demás astros, la altura de un astro variaba de igual forma a la misma hora en cualquier parte de la Tierra. Esta teoría tuvo una vigencia de siglos dado que era utilizada por la mayor parte de las religiones.

El geógrafo **Dicearco (350-285 a.C.)** supone la Tierra esférica y refiere sus medidas al meridiano y al paralelo de Rodas introduciendo así las coordenadas esféricas. El geómetra **Euclides** enuncia las leyes del movimiento diurno y hace observar que entre las Osas hay una estrella que no se mueve. **Arquímedes (287-212 a.C.)** da un gran impulso a las matemáticas y evalúa la circunferencia terrestre. En contra de las teorías aristotélicas aparecen las revolucionarias de **Aristarco de Samos (310-230 a.C.)** que eliminó todas las esferas y estableció el sistema heliocéntrico; la oposición de **Aristóteles** y **Cleantes (331-232 a.C.)** silenciaron estas teorías hasta los tiempos de **Copérnico**. Admitiendo la esfericidad de la Tierra, **Eratóstenes de Cyrene, (276-195 a.C.)**, bibliotecario de la Biblioteca de Alejandría fundada por el rey de Egipto Ptolomeo Soter, fue el primero en determinar 240 años a.C. el radio terrestre.

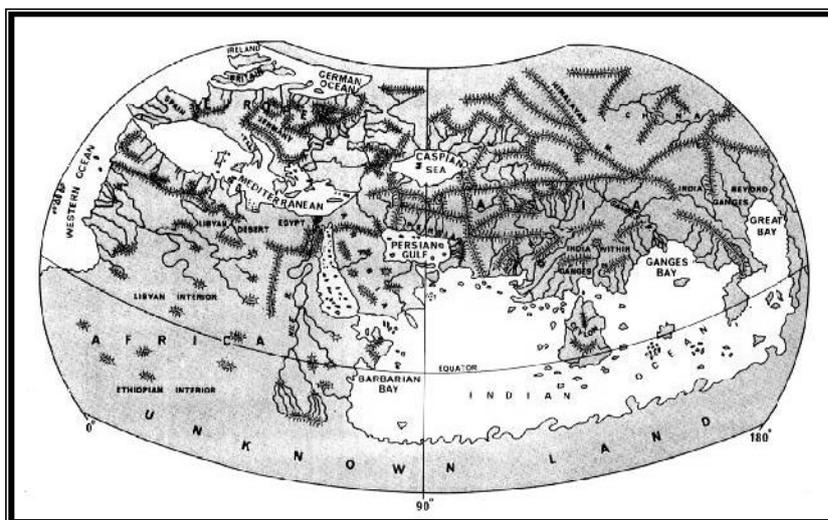
Midió la longitud del meridiano entre Siena (actual Asuan) y Alejandría, obteniendo un valor de unos 39000 Km. para la longitud de la circunferencia terrestre (unos 6207 Km. de radio). Eratóstenes se dio cuenta de que en el solsticio de verano, el Sol iluminaba en Siena los pozos hasta el fondo, por lo que en ese momento se encontraba en el cenit en su culminación. En ese mismo instante midió la altura del Sol en Alejandría, que suponía estaba en el mismo meridiano que Siena. La distancia cenital determinada no era otra cosa que el ángulo que en el centro de la Tierra esférica sustentaba el arco de meridiano Siena-Alejandría.



Esquema del método de los arcos

También conocía Eratóstenes la distancia entre ambas ciudades, así tenía todos los datos para determinar el radio de la Tierra. Las hipótesis y medidas de Eratóstenes no eran exactas, por ejemplo entre Siena y Alejandría hay una diferencia de longitudes de cerca de 3° , pero sí su método, conocido como método de los arcos, que fue utilizado durante muchos siglos. Este método de los arcos fue aplicado por **Posidonio**, (135-51 a.C.) que midió el arco entre Rodas y Alejandría, sustituyendo el Sol por la estrella Canopus, pero obtuvo un valor de unos 29000 Km. para la circunferencia (unos 4615 Km. de radio). El gran astrónomo de esta época fue **Hiparco de Nicea** (190-120 a.C.) que pensaba que la Tierra es esférica y que está inmóvil en el centro del mundo, inventa la trigonometría, descubre la precesión de los equinoccios, conoce el valor de la inclinación de la eclíptica y determina la duración del año trópico, entre otros trabajos astronómicos.

En tiempos de Julio Cesar (46 a.C.), que mandó hacer un levantamiento cartográfico del Imperio Romano, son de destacar los geógrafos **Estrabón (55 a.C. - 25 d.C.)** y **Plinio el Viejo (23-79 d.C.)** que observa las mareas en Cádiz y que murió observando la erupción del Vesubio en el año 79 d.C. El mayor geógrafo y astrónomo de este tiempo fue **Claudio Tolomeo (100-170 d.C.)**, que admitió el valor del radio terrestre de Posidonio y además lo trasmitió a su posteridad. Autor de los trece volúmenes del *Almagesto* de cuyo original no se dispone pero si se tienen las traducciones hechas al árabe por el sirio Hunaim Ibn Ishaq en el siglo IX y al latín por Gerardo de Cremona en el siglo XII en Toledo. Ideó el sistema planetario geocéntrico basado en sus observaciones desde el templo de Serapis. Construyó un mapa del mundo y las posiciones terrestres las representaba por la latitud y longitud, la autoridad de Tolomeo traspasó su época. En la Figura siguiente puede verse el mapa del mundo atribuido a Tolomeo.



Mapa del mundo de Tolomeo

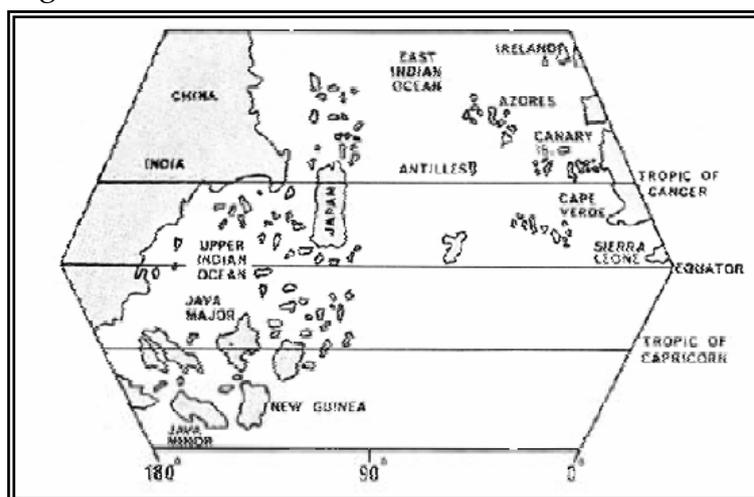
Edad media

Las ideas aristotélicas impregnaron la Edad Media en Europa, se admitía la esfericidad de la Tierra, pero se explicaba muy mal. Se suponía la Tierra cubierta de agua excepto la parte habitada (ecumene), en las antípodas era imposible vivir "boca abajo". La historia de esos siglos está moteada por los avances y descubrimientos de matemáticos y astrónomos que no dejan de considerar los problemas geodésicos en sus trabajos; un resumen de los conocimientos matemáticos es realizado por el geómetra **Papús (400)**. Es de destacar la medida del arco de meridiano realizada por el monje budista chino **I Hsing** en el año 727.

Las aportaciones árabes a la Geodesia son muy reducidas, aunque merecen destacarse las expediciones organizadas en las llanuras de Palmira y Zinjar, cerca de Bagdad y Al Raqqah por el califa **Al-Mamún (786-833)**, hijo del Haroun al-Raschid, (830) para determinar la longitud del grado, y los trabajos del matemático **Al-Khwarizmi** que publicó un mapa del mundo conocido y determinó el radio de la Tierra, además de introducir en las matemáticas los numerales hindúes 1,2,... y de cuyo nombre se tomó la palabra algoritmo tantas veces usada después. El astrónomo **Al-Battani (858-929)** hacia el año 900 publica un tratado de geografía dando las posiciones de las principales ciudades; sirviéndose de la trigonometría publica tablas astronómicas de uso común. Los astrónomos árabes **Aboul Wefa** y **Ben Younis** recalculan las constantes astronómicas y **Alhazen (966-1039)** escribe un tratado de óptica. En 1154, en Sicilia, aparece la gran compilación de *Geografía Universal* de **Idrisi (1098-1166)**. Las primitivas enseñanzas griegas, de maestros de la categoría de Pitágoras, Eudoxio, Aristóteles, Eratóstenes, Hiparco y Tolomeo, entre otros, sobrevivieron gracias a la civilización árabe, y en el siglo XII, a través de España, llegaron a Europa en las traducciones al latín hechas en el reinado de Alfonso X de Castilla. Un caso digno de mención es el de **Roger Bacon (1214-1294)**, creador de la óptica, estudia la refracción, gran problema de las observaciones, trata la astronomía y la geografía y considera las mareas terrestres como el resultado de la atracción lunar.

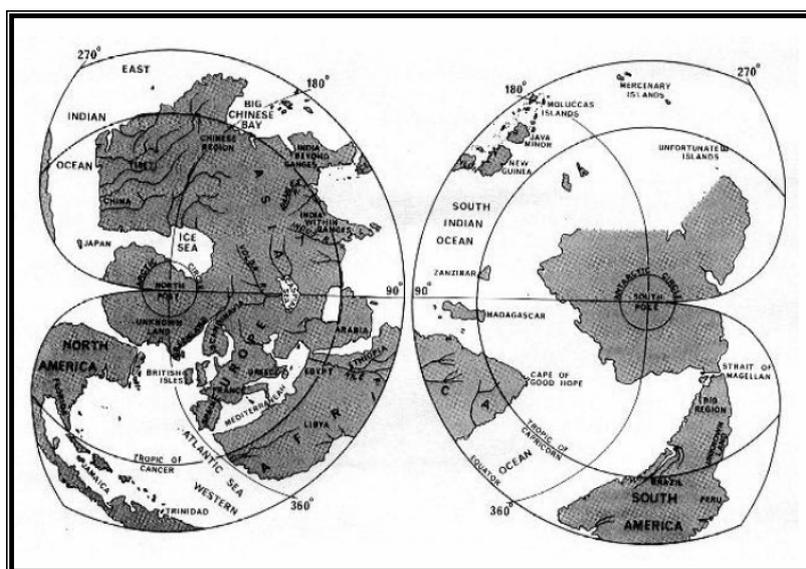
Siglos XV y XVI

Pasado este tiempo, surge la época de las grandes exploraciones. En primer lugar fue, posiblemente, el viaje de **Marco Polo (1254-1324)** de 1271 a 1295 el que sirvió a **Toscanelli (1397-1482)** para la confección de un mapa (ver la figura siguiente) que quizá influyó en la decisión de **Cristóbal Colón (1492)** de cruzar el Atlántico navegando hacia el oeste



Mapa de Toscanelli

Pero Toscanelli, cometió un gran error pues tomaba como radio de la Tierra 1 determinado por Posidonio y transmitido por Ptolomeo y como en sus mapas se apoyó Colón no es de extrañar que éste creyera que el Cipango y el Catay estaban más cerca (1025 leguas) de lo que realmente resultó (3150). Según relata en su tercer viaje, Colón se percató de que la Tierra no era esférica, pero no supo explicarlo. Después de Colón, **Vasco de Gama (1469-1524)** llega al sur de África y **Magallanes (1480-1521)** y **Elcano (1519-1522)** dan la vuelta al mundo. Las necesidades de navegación, principalmente, hicieron que se organizaran verdaderas escuelas de cartógrafos, quienes con los conocimientos, muchas veces imprecisos, aportados por la Geodesia confeccionaron gran cantidad de mapas, algunos de los cuales adquieren gran renombre, como los del italiano **Américo Vespucio (1415-1512)** quien obtuvo los primeros mapas de la costa oeste de América del norte y dio nombre al continente. Sin embargo el cartógrafo por excelencia de esta época, cuyos mapas satisfacían las necesidades de la navegación, fue el flamenco **Gerhard Kaufmann (1512-1594)** más conocido por **Mercator**. En la Figura siguiente puede verse el mapa del mundo de Mercator.



Mapa del mundo de Mercator

Hasta finales del siglo XV no aparecen en Europa nuevas ideas en el terreno de la Geodesia o de la astronomía. Quizá deba recordarse al cardenal alemán **Nicolás de Cusa (1401-1464)** que se hizo famoso por su idea del Universo infinito y que estudió el movimiento diurno de la Tierra. Otros como **Peurbach (1423-1461)**, **Waltherus (1430-1504)** y **Regiomontano (1436-1476)** hicieron algunos intentos para evolucionar las ideas, y **Leonardo da Vinci (1452-1519)**, además de un artista confirmado, fue un buen científico, sugiriendo ya ideas sobre la isostasia y las mareas terrestres.

El gran astrónomo de esta época es **Nicolás Copérnico (1473-1543)** quien en su obra "*De Revolutionibus Orbium Coelestium*" de 1543 da la teoría heliocéntrica del sistema solar, que vino a revolucionar el pensamiento de la época anclado en las ideas aristotélicas; se entablaron duras polémicas y se logró indirectamente que la atención de los astrónomos y geodestas se dirigiese por este camino. Proliferaron las observaciones, se construyeron observatorios y en general la astronomía tuvo el apoyo de gobiernos y particulares que de otra manera difícilmente se hubiese logrado. Naturalmente, la Geodesia y la navegación se beneficiaron enormemente de los resultados que se estaban obteniendo, pues pronto dispusieron de un mejor conocimiento de las posiciones de los cuerpos celestes indispensables para sus fines de posicionamiento y orientación. La teoría heliocéntrica pronto fue admitida por el mundo científico; la razón se imponía a la teología, aunque no sin grandes sacrificios: el italiano **Giordano Bruno (1548-1600)** fue ejecutado por hereje al admitir las ideas copernicanas y **Galileo** fue obligado a retractarse de las mismas en uno de los procesos más famosos de la historia. El gran observador de esta época es **Ticho Brahe (1546-1601)** cuyas observaciones del planeta Marte permitieron a **Kepler (1571-1630)** enunciar sus

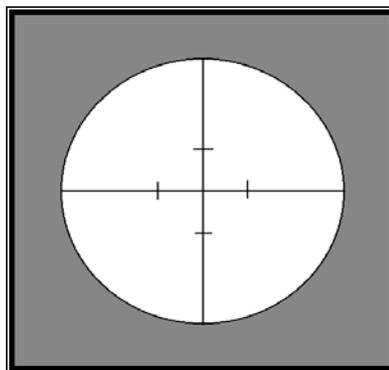
dos primeras leyes sobre el movimiento de los planetas. También Kepler propuso un método para determinar el radio terrestre, consistía en medir la distancia entre dos puntos alejados sobre la superficie de la Tierra y los ángulos formados por la recta que los une con las verticales en ambos extremos. En los países católicos la Inquisición incluye en el Index de libros proscritos las obras de Copérnico, Galileo y Kepler, entre otros, y esta situación se mantiene nada menos que hasta 1822 en que intenta producirse una reconciliación entre la razón y la fe. Pero hubo de esperarse hasta octubre de 1992 cuando el Papa polaco Juan Pablo II reconoció oficialmente que la Iglesia Católica dejaba de considerar hereje a Galileo.

Un invento matemático viene a ayudar de forma definitiva la realización de cálculos geodésicos y astronómicos. Se trata de los logaritmos inventados por **Neper (1550-1617)** en 1595, estos no eran ni decimales ni neperianos. Las tablas de logaritmos decimales fueron publicadas por **Briggs** en 1624 y los logaritmos neperianos fueron introducidos por **Euler** en 1748. En cuanto a las medidas del arco cabe destacar que el médico francés **Fernel (1485-1558)** en 1525 midió la distancia entre París y Amiens con un cuadrante y contando las vueltas que daban las ruedas de su carruaje.

Siglo XVII

Las investigaciones y los trabajos geodésicos continúan, pero con unas bases mucho más científicas que antes. **Stevin (1548-1620)** intuye la gravedad.

Galileo Galilei (1564-1642) aplica el anteojo a las observaciones astronómicas y enuncia las primeras leyes de la mecánica con los importantes conceptos de velocidad y aceleración, también establece las leyes de la caída de los graves. La refracción es estudiada por los matemáticos **Fermat (1601-1665)** y **Descartes (1596-1650)** quien en 1637 publica las leyes por las que se rige. También Descartes presenta su teoría de los torbellinos para explicar el Universo. Las medidas del arco continúan. En 1615 el holandés **Snellius (1580-1626)** realizó la primera triangulación precisa y estudió la refracción; midió un arco entre Bergen op Zoom y Alkmaar con una base cerca de Leyden. Este método, cuyos principios fueron dados por **Gemma Frisius** en 1533, perduró hasta el siglo XX con las mejoras aportadas por los instrumentos de observación y medios de cálculo. También se efectúan mediciones en Inglaterra por **Norwood (1590-1675)** que en 1633 mide el arco entre Londres y York y en Italia por los jesuitas **Riccioli (1598-1671)** y **Grimaldi** usando por primera vez ángulos cenitales recíprocos en 1645, aunque tuvieron problemas con la refracción atmosférica. En España aparece, en 1615, un mapa de Aragón realizado por **Juan Bautista de Labaña (1555-1625)** en el que se utilizan las triangulaciones para los levantamientos. En 1670 en Francia, el abad **Picard (1620-1683)** mejora los procedimientos de observación al aplicar a los instrumentos goniométricos un anteojo provisto de retículo formado por dos hilos en cruz.



Retículo de anteojo

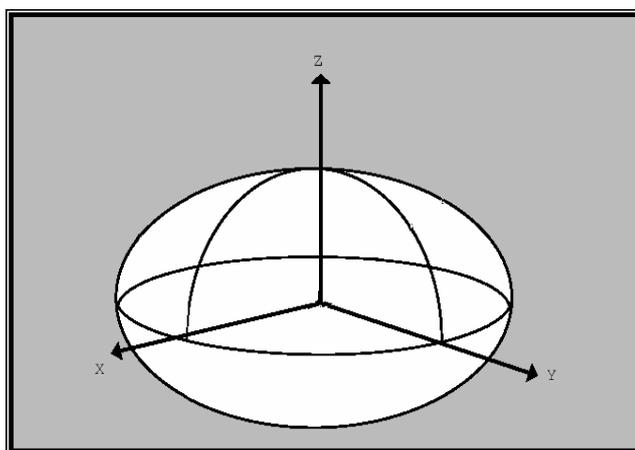
Midiendo por triangulación el arco de París entre Malvoisine (al sur de París) y Sourdon (al sur de Amiens) determinó el radio terrestre y su resultado (6275 Km. de radio) fue de trascendental importancia pues sirvió a **Newton (1642-1727)** para calcular la distancia a la Luna, que venía dada en unidades del radio terrestre, y comprobar su ley de gravitación universal formulada en 1666 y publicada en 1687. Newton suponía que la fuerza de atracción que mantiene la Luna en su órbita alrededor de la Tierra es la misma que la fuerza que actúa sobre los cuerpos de la superficie terrestre, entonces sólo tenía que comparar la fuerza de atracción con la gravedad obtenida por **Galileo**.

Los precursores de la Ley de Newton parecen ser el italiano **Borelli (1608-1679)** y los ingleses **Horrox (1619-1641)** y **Robert Hooke (1635-1703)** que dedicó gran parte de su obra al estudio de la gravedad. También disponía Newton de la matemática necesaria, puesta a punto por él mismo, por **Descartes** y por **Leibnitz (1646-1716)** principalmente. La aplicación de la Ley de Newton a la teoría de figuras de equilibrio permitió concluir que la Tierra no era una esfera sino que debía ser un elipsoide de revolución achatado por los polos del eje de rotación. Fundamentalmente **Newton** trata el problema de la figura de la Tierra en las proposiciones XVIII, XIX y XX de su obra "*Philosophiae naturalis principia mathematica*", también en esta obra da la primera explicación correcta del fenómeno de las mareas y efectuó cálculos precisos de las mismas. Ya en 1672 **Richer** había observado que el péndulo astronómico es más lento en Cayena que en París y **Huygens, (1629-1695)**, el gran experto en relojes, que utilizó el primer reloj de péndulo preciso, interpretó estas variaciones diciendo que la gravedad aumenta del ecuador a los polos porque la Tierra es aplanada. Esto se verifica para el elipsoide de Newton

Siglo XVIII

El siglo XVIII está dedicado en primer lugar a la medida de la longitud del grado para determinar el aplanamiento de la Tierra y en segundo lugar al desarrollo teórico de la Geodesia Dinámica. **Dominico Cassini (1625-1712)**, director del observatorio de París, observa que el planeta Júpiter aparece aplanado y dice que la Tierra también debe serlo, pero no dice cómo. En 1693 se comienza la prolongación del arco de Picard por el norte hasta Dunkerque y por el sur hasta Colliure, los trabajos se interrumpieron y fueron continuados de 1700 a 1718 por su hijo **Jacques Cassini (1677-1756)**, **Filipo Maraldi (1665-1729)** y **La Hire (1640-1718)**. Con los resultados de las seis mediciones distintas realizadas a lo largo de 36 años se obtenía que la longitud de un arco de un grado disminuía desde el ecuador hacia el polo norte y se concluía, al contrario que los newtonianos, que el elipsoide terrestre debía ser alargado en el sentido del eje de rotación. Por aquel entonces **Bradley (1693-1762)** descubre la nutación. La controversia fue zanjada en favor de las conclusiones newtonianas al comparar los resultados experimentales obtenidos por dos expediciones organizadas por la Academia de Ciencias de París, a propuesta del académico **d'Anville (1697-1782)**, con el fin de medir la longitud de un grado de meridiano en las proximidades del polo y otro en el ecuador. **Maupertuis (1698-1759)** y **Clairaut (1713-1765)** fueron a Laponia (1736-37) a 76° de latitud norte y **Godin (1704-1760)**, **La Condamine (1701-1774)** y **Bouguer (1698-1758)**, con la colaboración de los españoles **Jorge Juan (1713-1773)** y **Antonio de Ulloa (1716-1795)**, fueron a Perú (1735-44).

Esta es una de las primeras misiones geodésicas en las que participaron grupos internacionales, pues para su desarrollo fueron necesarios acuerdos entre los Reyes Luis XIV de Francia y Felipe V de España por un lado y entre Suecia y Rusia por otro. **Bouguer** aprovecha la ocasión para medir la desviación de la vertical producida por el Chimborazo no explicándose los resultados obtenidos a no ser que la montaña tuviera “grandes huecos en su interior”. Los resultados de las mediciones confirmaron las conclusiones newtonianas. Desde entonces la Tierra se considera, en segunda aproximación, como un elipsoide de dos ejes achatado por los polos del eje de rotación.



Elipsoide terrestre

Al respecto dijo **Voltaire** sobre **Maupertuis** “*Il avait aplati la Terre et les Cassini*”, pues fueron tres generaciones de Cassinis las que estuvieron involucradas. El problema desde entonces es determinar las dimensiones de la Tierra obteniendo valores numéricos del semieje y del aplanamiento del elipsoide terrestre. En 1740 **Daniel Bernouilli (1700-1782)** escribió un trabajo sobre las mareas basado en la ley de Newton y usando observaciones mejoró los valores dados por Newton. En 1742 **Maclaurin (1698-1746)**, que había leído una tesis a los 17 años sobre “*El poder de la gravedad*”, estudiando las mareas, demuestra que el elipsoide de revolución aplanado puede ser una figura de equilibrio de una masa fluida y homogénea sometida a su propia gravitación y dotada de un movimiento de rotación, también obtiene la correspondiente ley de gravedad. En 1743 **Clairaut**, que a los 18 años fue aceptado como miembro de la Academia Francesa, publica su “*Théorie de la figure de la Terre*” que puede considerarse como el origen de la Geodesia Dinámica.

Para determinar el semieje y el aplanamiento de la Tierra otras muchas medidas de la longitud del grado fueron realizadas desde entonces: En 1751 los Jesuitas **Maire** y **Boscovich (1711-1787)** miden un arco en Rusia y **Rimini** otro en los Estados Pontificios bajo los auspicios del Papa Benedicto XIV.

La Caille (1713-1762) y **Maclear** miden en 1752 un gran arco en África del Sur. En 1768 **Mason** y **Dixon** miden el arco en los Estados Unidos empleando un método de proyecciones ciertamente ingenioso. En 1769 **Maskeline (1732-1811)** mide el arco de Escocia y estudia la desviación de la vertical. En todos los casos había controversias en los resultados debido a la no existencia de una unidad de medida universalmente admitida. La Asamblea Constituyente de Francia crea por Decreto de 26 de marzo de 1791 la "*Commission Général des Poids et Mesures*" que decidió la adopción del sistema métrico decimal. El metro quedó definido en función de la longitud del meridiano terrestre. Para dar la longitud del metro **Pelambre (1749-1822)** y **Pedro Andrés Mechain (1744-1804)** miden el meridiano de Francia entre Dunkerque y Perpignan. Los españoles **Gabriel Ciscar (1760-1829)** y **Agustín de Pedrayes (1744-1815)** intervinieron en las discusiones previas a la preparación de este sistema métrico, celebradas en París entre 1793 y 1800. El resultado de esta operación fue publicado por **Delambre** en una obra titulada "*Les bases du système métrique décimal*". En 1895 la Comisión se transforma en "*Convention International du Metre*". El desarrollo de la matemática complementa perfectamente el desarrollo geodésico. **Euler (1707-1783)**, a quien se deben las primeras teorías sobre el movimiento de cuerpos rígidos en particular las ecuaciones de la rotación, junto con **Monge (1746-1816)** y **Meusnier (1754-1793)** definen los elementos fundamentales de las curvaturas de superficies y las propiedades de las líneas trazadas sobre ellas llegando a teoremas clásicos de la teoría de superficies de aplicación geodésica. **D'Alembert (1717-1783)** en 1749 estudia el equilibrio de una masa fluida en rotación y su alumno **Laplace (1749-1827)** publica en 1773 su primera memoria sobre mecánica celeste, en su segunda memoria de 1799 incluye la teoría matemática de las mareas dando el desarrollo que hoy día lleva su nombre, además, estableció las ecuaciones hidrodinámicas de propagación de las ondas de marea en los océanos, ecuaciones que no han podido ser integradas hasta el advenimiento de los ordenadores. En 1786 publicó su memoria sobre la figura de la Tierra. Trabajos también importantes son los emprendidos por **Lagrange (1736-1813)** quien en 1788 publica la primera edición de su "*Méchanique Analytique*", y obtiene las ecuaciones del movimiento del polo. En 1785 **Legendre (1752-1833)** introduce la noción de potencial y funda la teoría de funciones esféricas y en 1787 publica su memoria sobre observaciones trigonométricas donde aparece su famoso teorema de resolución plana de triángulos esféricos. Desde el punto de vista práctico **Borda (1733-1799)** perfecciona los instrumentos geodésicos con la introducción del círculo repetidor y realiza la unión geodésica Greenwich-París. Es a partir de esta época cuando la Geodesia clásica comienza a estructurarse. Se hace necesario establecer las definiciones precisas de aquellos conceptos continuamente manejados y de cuyo entendimiento y comprensión depende su desarrollo lógico y coherente.

Algunos de estos conceptos presentan lo que podemos llamar definiciones puramente descriptivas que, sin ser precisas, sirven para localizar el concepto, o dicho de otro modo, para tener una idea de él; tales son la mayor parte de las definiciones que aparecen en tratados o cursos elementales; no obstante, la Geodesia como ciencia en sí, exige definiciones rigurosas. Una cosa quedó clara después de los trabajos de **Snellius** y **Picard** y es que con medidas de ángulos y distancias podían obtenerse posiciones de puntos sobre la superficie de la Tierra. Pronto proliferaron, debido principalmente a necesidades cartográficas con fines militares, civiles y de navegación, las invenciones de nuevos instrumentos de observación y se perfeccionaron los teodolitos para la medida de ángulos.



Teodolito reiterador

Siglo XIX

La primera gran operación geodésica en el siglo XIX fue la prolongación hacia España del meridiano de Francia, preparada por **Mechain**, por encargo del "*Bureau des Longitudes*", en la que intervinieron por parte de Francia **Domingo Francisco Arago (1786-1853)** y **Juan Bautista Biot (1774-1872)** y por parte de España **José Chaix** y **José Rodríguez y González**. **Arago** fue un eminente astrónomo, físico y geodesta; secretario del "*Bureau des Longitudes*" y director del observatorio de París; profesor de análisis y Geodesia en la escuela politécnica. En 1848 fue Ministro de Marina y de Guerra y abolió la esclavitud en las colonias francesas. Colaboró con **Biot** en la medida del índice de refracción del aire; en 1840 descubrió la cromosfera solar. Las medidas de grandes arcos de meridiano y paralelo se sucedieron a lo largo de este siglo. Como hemos dicho, entre los años 1806 y 1808 **Biot** y **Arago** por parte francesa y **Chaix** y **Rodríguez** por parte española prolongaron el meridiano de Francia en España y enlazaron las islas de Ibiza y Formentera con el continente.

En 1817 **Struve (1793-1864)** y **Tanner** comienzan la medida del arco del Danubio al Ártico que terminan en 1849. En 1819 aparece calculado el elipsoide de **Walbeck** en Rusia. En 1823 **Everest (1790-1866)** mide el arco de la India y en 1830 publica los datos de su elipsoide. Este mismo año **Airy** calcula su elipsoide con arcos de meridiano y paralelo de Gran Bretaña. En 1866 el Coronel norteamericano **Clarke (1828-1914)** obtiene los elementos de su primer elipsoide que se utiliza en América del Norte y en 1880 publica el segundo. Un gran impulso instrumental es el dado por **Perrier (1833-1888)** en 1868 con los círculos acimutales para la observación de triangulaciones de primer orden, que son construidos por los hermanos **Brünner**. En 1885 **Jäderin** emplea los hilos en suspensión para la medida de bases geodésicas. Es en el siglo XIX cuando la mayor parte de los científicos de elite establecen y desarrollan las bases de la Geodesia matemática y experimental. **Carlos Federico Gauss (1777-1855)**, astrónomo, geodesta y matemático, director del observatorio de Gottinga, inventó el heliógrafo y diseñó, calculó y compensó, utilizando por primera vez el método de mínimos cuadrados, la red geodésica del reino de Hannover en 1821 y dio las bases de la geometría diferencial de superficies de uso obligado en Geodesia geométrica y dinámica; también estableció el fundamento teórico de la Geodesia con la definición de la superficie matemática de la Tierra, superficie equipotencial que posteriormente, en 1872, **Listing** llamaría geoide. Los fundamentos del método de mínimos cuadrados habían sido establecidos por **Mayer** en 1748, **Laplace** en 1787 y **Legendre** en 1805. **Gauss** inició en 1823 la medida de un arco de meridiano entre Altona y Gottinga y otro de paralelo en Hannover, estos trabajos geodésicos en Alemania fueron continuados por **Bessel** y **Baeyer (1794-1885)** que llegaron a cubrir todo el territorio alemán por una red geodésica que enlazaría con los trabajos efectuados en Francia, en los países bálticos y en los países de la Europa Central, haciendo posible el enlace con los trabajos geodésicos realizados en Rusia. También se realizaron trabajos geodésicos en América, en Asia y en África en el siglo XIX. Los trabajos geodésicos en América del Norte condujeron a la medida de largos arcos de meridiano y a la obtención del elipsoide de **Hayford** que posteriormente fue adoptado por la IUGG como Elipsoide Internacional.

Con los trabajos realizados a lo largo del siglo se han determinado entre otros los siguientes elipsoides: **Elipsoide Semieje Aplanamiento**

Everest (1830) 6.377.276 1/300.8
Airy (1830) 6.376.542 1/299.3
Bessel (1840) 6.377.397. 1/299.15
Clarke (1888) 6.378.245. 1/293.5
Hayford (1909) 6.378.388. 1/297.0

También en el siglo XIX la teoría del potencial fue desarrollada con multitud de teoremas. **Jorge Gabriel Stokes (1819-1903)**, en 1849 publicó una memoria titulada "*On the variation of gravity at the surface of the Earth*" donde expone su método para la determinación del geoide a partir de anomalías de la gravedad. **Green (1793-1841)** da sus famosas identidades, **Poincaré (1854-1912)**, demostró que el aplanamiento terrestre tenía un límite, **Bruns (1848-1919)**, introductor de la Geodesia tridimensional, presentó su famosa relación entre el potencial perturbador y la ondulación del geoide. Los estudios sobre mareas realizados por **Laplace** fueron continuados por Lord **Kelvin (1824-1907)** que desarrolló una teoría de mareas para una Tierra elástica e introduce el análisis armónico en este campo. **George Darwin (1845-1912)**, hijo de Charles Darwin, aplicó las teorías de Lord Kelvin que fue su maestro y se le considera el creador de la teoría de mareas terrestres para una Tierra fluida y viscosa, estudia la fricción en el interior de la Tierra y predice la existencia de mareas de carga sobre la corteza elástica. **Pratt (1774-1872)** en 1855 presenta su modelo isostático y **Airy** hace lo propio el mismo año. Otro gran matemático, geodesta y astrónomo fue **Bessel (1784-1846)**, director del observatorio de Königsberg, que midió el arco prusiano en 1838, determinó el primer valor fiable del aplanamiento de la Tierra y cuyo elipsoide de 1840 ha formado parte de algunos datums europeos. **Fourier (1786-1830)** nos da sus métodos de análisis armónico y la famosa transformada de tantas aplicaciones posteriores a la Geodesia. **Legendre** trabaja en el mismo sentido. **Riemann (1826-1866)**, con sus teoremas sobre la transformación conforme, y **Cartán (1869-1951)** inician los fundamentos de la moderna geometría diferencial que continuada con los trabajos de **Marussi** está teniendo amplia repercusión en Geodesia tridimensional diferencial con el estudio de referencias móviles y coordenadas geodésicas holónomas de uso obligado en gradiometría. En 1888 **Küstner** observa variaciones periódicas de la latitud de un observatorio determinada por el método de **Talcott** y el experimento Berlín-Waikiki de 1891-92 demuestra que el eje de rotación de la Tierra no está fijo en la corteza. Para el estudio de este interesante fenómeno se crea en 1899 el *Servicio Internacional de Latitudes*.

Las ondas electromagnéticas fueron estudiadas por **Maxwell (1831-1879)** y el francés **Fizeau (1818-1896)** fue el primero en medir la velocidad de la luz en 1849. La aplicación de las ondas electromagnéticas a la medida de distancias en Geodesia fue iniciada por **Michelson (1852-1931)**, después en 1948 el sueco **Bergstrand** inventó el geodímetro y **Wadley** en 1956 el telurómetro.

Ahora estos instrumentos están muy perfeccionados con el avance de la tecnología laser y la informática.

Siglo XX

Comienza el siglo con la aparición de la obra de **Helmert (1843-1917)** "Die mathematischen und physikalischen Theorien der höheren Geodäsie", que viene a sintetizar los trabajos geodésicos hasta entonces y que ha servido y sirve como libro de referencia inexcusable. **Helmert** es el introductor del método de nivelación astrogeodésica para la determinación del geoide a partir de desviaciones de la vertical. En 1900 crea el Sistema Gravimétrico de Viena y en 1901 da su fórmula de la gravedad normal. En 1900 comienzan las medidas de mareas terrestres con péndulos horizontales. En 1903 se realizan las primeras observaciones gravimétricas en el mar con barómetros por **Hecker**. En 1904 **Kühnen** y **Furtwänder** miden la gravedad absoluta en Potsdam y su valor es aceptado como origen del sistema mundial, aunque en 1950 se demostró que su valor era 14 miligales mayor del real. En 1906 aparece la balanza de torsión de **Eötvös** y las investigaciones isostáticas de **Hayford** y **Helmert**. En 1909 el geodesta norteamericano **Hayford** con datos de la red geodésica de los Estados Unidos y aplicando el método de las áreas con la hipótesis isostática de Pratt, publica los resultados de su elipsoide que posteriormente es adoptado como elipsoide de referencia Internacional en Madrid en 1924. Se establece el sistema de gravedad de Potsdam. En 1910 **Poincaré** resuelve el problema del movimiento del polo para una Tierra con núcleo líquido. En 1911 aparecen los trabajos de **Love (1863-1940)** que describen la marea de una Tierra elástica por medio de los llamados números de Love que sirven para caracterizar las deformaciones producidas por el potencial de marea. En 1914 **Schweydar (1877-1959)** realiza la primera observación de mareas terrestres con un gravímetro y en 1921 aparece el famoso desarrollo armónico de **Doodson (1890-1968)** del potencial de marea. En 1923 se desarrollan las medidas de gravedad con péndulos submarinos por el geodesta holandés **Vening-Meinesz (1887-1966)**. En 1924 se utilizan los hilos invar para la medida de bases. Se adopta el elipsoide Internacional de **Hayford**. En 1928 **Vening-Meinesz** publica un libro con las fórmulas que llevan su nombre y que determinan las componentes de la desviación de la vertical a partir de medidas gravimétricas. En 1929 presenta un aparato tripendular para la medida de la gravedad en el mar. También aparecen los primeros gravímetros de muelle de **Ising** y **Lejay**. En 1930 el geodesta italiano **Giovani Cassinis** calcula la fórmula de la gravedad normal que es adoptada como fórmula internacional. Se perfeccionan los péndulos horizontales. Se realizan experiencias con gravímetros marinos y se utiliza el péndulo reversible para medidas absolutas en Washington y Teddington por **Clark**, **Heyl** y **Cook**. En 1935 **Nicolás Stoyko** descubre las variaciones estacionales de la velocidad de rotación de la Tierra. En 1936 aparecen los cálculos de un geoide gravimétrico de **Jeffreys** e **Hirvonen**. Se desarrolla la teoría de errores en nivelación por **Vignal**. Se presentan correcciones a las observaciones de gravedad en plataformas móviles por **Browie**.

Se estudia el problema de contorno de la geodesia Física por **Molodensky**, **Krassowsky** y **Michailov**. En 1937 **Kukkamäki** estudia la refracción y la nivelación con importantes resultados. Las observaciones de eclipses de Sol y de ocultaciones de estrellas por la Luna proporcionan datos suficientes para la determinación de los parámetros del elipsoide terrestre y para la unión en un mismo sistema de referencia de puntos de la superficie terrestre alejados. Las observaciones de estos fenómenos proliferan en la primera mitad del siglo XX. Son de destacar los métodos empleados por **John O'Keefe** del U.S Army Map Service para la observación de ocultaciones y los métodos para la observación de eclipses de **Atkinson**, **Kukkamäki**, **Linblad**, **Banachiewicz**, **Platzeck**, **Mairzegui**, **Gaviota**, **Markowitz** y nuestros más cercanos **Torroja (1919-1994)** y **Bonjera**. La primera campaña de observación de un eclipse de Sol con fines geodésicos fue organizada por **Banachiewicz** en el eclipse del 19 de junio de 1936 observando desde Japón, Siberia y Grecia. Siguió el eclipse del 9 de julio de 1945 observado por expediciones finlandesa y sueca. El eclipse del 20 de mayo de 1947 fue observado también por astrónomos escandinavos desde Brasil y Costa de Oro. El eclipse del 4 de mayo de 1948 fue observado por astrónomos norteamericanos desde diferentes lugares. La Universidad Complutense de Madrid comenzó su participación en la observación de eclipses con fines geodésicos en el eclipse del 25 de febrero de 1952 desplazando una expedición a Cogo (Guinea Ecuatorial) en el que se ensayó por primera vez el método fotométrico afocal de **Torroja-Bonjera** con registro cinematográfico. Posteriormente se volvió a participar en el eclipse de 30 de junio de 1954 en Suecia en el que llegaron a montarse 36 expediciones de diversos países. Los resultados españoles, obtenidos con un método perfeccionado del anterior llamado focal o parcial, fueron de primera calidad. En 1940 aparecen los trabajos del geodesta finlandés **Weiko A. Heiskanen** sobre aplanamiento de elipsoides de dos y tres ejes, sobre cartas de anomalías de la gravedad y sobre correcciones isostáticas siguiendo la hipótesis de Airy. En 1943 el sueco **Bergstrand** inventa el geodímetro, primer distanciómetro con ondas de luz, que empieza a utilizarse en 1950. En 1945 aparecen publicados los trabajos de **Molodensky**. Se efectúan triangulaciones Shoran. En 1946 se realizan las primeras medidas con gravímetros absolutos de caída libre en Sevres por **Volet**. El geodesta finlandés **Väisälä** publica el método de triangulación estelar. En 1947 se realiza la medida óptico interferométrica de bases de calibración con el aparato de **Väisälä**. En 1948 el también geodesta finlandés **Tanni** publica el primer mapa del geoide mundial obtenido por aplicación de la fórmula de Stokes. Por su parte **Bomford** y de **Graaff-Hunter** calculan un geoide a partir de desviaciones de la vertical. En 1950 el japonés **Takeuchi** resuelve por primera vez numéricamente el sistema de ecuaciones diferenciales que gobierna las deformaciones elásticas de una Tierra no homogénea. En 1950 se aplica la triangulación Hiran con precisión de 5 metros.

Aparecen los niveles automáticos, los gravímetros de muelle de alta precisión y los gravímetros marinos Graf y LaCoste. En 1954 el sudafricano **Wadley** inventa el telurómetro, primer distanciómetro con microondas, que empieza a utilizarse en 1957. En 1957 se utiliza la cámara lunar de **Markowitz**.

VII. GEODESIA SATELITAL

En 1957, el 4 de octubre se lanza el primer satélite artificial de la Tierra por los rusos, el Sputnik 1, el Sputnik 2 fue lanzado un mes después y en febrero de 1958 se lanza el primer satélite norteamericano Vanguard I. En 1958 comienza la geodesia por satélites con las cámaras Baker-Nunn y fotografía con fondo de estrellas. En los años cincuenta se extiende el uso de la estadística en la compensación de redes con los trabajos de **Triensta**, **Bjerhammar**, **Wolf**, etc., y se establece el Datum Europeo ED50. Aparece el geoide astrogeodésico de **Bomford**, el geoide gravimétrico de **Heiskanen** y la red gravimétrica mundial de **Woolard** y **Morelli**. Se determinan los primeros armónicos del neopotencial por **O'Keefe**. Se finaliza la medida del arco desde Ciudad del Cabo a El Cairo. En 1963 se crea el International Polar Motion Service, con sede en Mizusawa. Aparecen los gravímetros absolutos de **Sakuma** y **Faller**. Aparece el primer modelo Mekometer. En 1964 se lanzan los primeros satélites Doppler Transit por los EEUU que quedan operativos para uso civil en 1967. En 1968 aparece el gravímetro superconductor de Goodkind y se lanzan los satélites Echo I y II, ANNA 1B, Geos1 y 2, Pageos, Diademe1-2, Oscar 14 y Timation. De 1966 a 1976 se realiza la primera gran operación europea de Geodesia por Satélites denominada WEST (Western European Satellite Triangulation). En 1967 se presenta el gravímetro absoluto de lanzamiento vertical de **Cook**, y los primeros gravímetros absolutos portátiles de **Faller** con precisiones de 5 centésimas de miligal. En 1969 el Apollo 11 deposita en la Luna los reflectores laser y se miden distancias desde los observatorios de Lick y McDonald. También en 1969 se mide la primera gran base por VLBI entre Haystack y Greenbank. En los años sesenta se utilizan las cámaras balísticas en geodesia por satélites. Se perfeccionan los equipos Doppler, se continúan lanzando satélites geodésicos y se desarrolla el receptor Mark I para VLBI. Aparecen las investigaciones de **Kaula** sobre teoría de satélites geodésicos, de **Bjerhammar** e **Hirvonen** sobre la geodesia sin hipótesis, de **Kaula**, **Bjerhammar** y **Moritz** sobre investigaciones estadísticas del campo de gravedad y los de **Baarda** y **Bjerhammar** sobre fiabilidad de redes geodésicas. También se estudia la refracción geodésica por **Tengstrom**, la colocación mínimo cuadrática por **Krarup** y **Moritz** y la determinación de movimientos recientes de la corteza por **Boulanger**. Los modelos de geopotencial llegan al orden y grado 16 como el SE II. Se perfecciona el seguimiento Doppler de satélites. El movimiento del polo se determina con observaciones Doppler.

En los años setenta el avance de la Geodesia es espectacular. Se termina y adopta la IGSN71, Red Gravimétrica Internacional estandarizada. Aparecen los sistemas de levantamiento inercial. Los gravímetros absolutos portátiles con precisión de 1 centésima de miligal. La gravimetría a bordo de helicópteros. También aparece el Terrameter, distanciómetro experimental de laser bicolor. Se despliega el sistema Doppler Tranet-2 y se perfeccionan los receptores Doppler como los JMR y los Magnavox. En cuanto a la VLBI se desarrollan los equipos Mark II y III y el primer sistema móvil. También en estos años setenta se perfecciona el seguimiento laser a la Luna con nuevos reflectores depositados allí por los satélites Apollo14 y 15 y el Lunakhod II. El lanzamiento de satélites continúa con el DIAL, el Oscar 19, el PEOLE, los satélites laser STARLETTE y LAGEOS, el primer satélite altimétrico Geos-3 y el también altimétrico Seasat-1. El primer satélite GPS del Bloque I, el PRN4 fue lanzado el 22 de febrero de 1978. Otros importantes avances en esta década los constituyen las investigaciones sobre movimientos recientes de la corteza con resultados experimentales en el este de Europa. Se obtienen perfiles de marea gravimétrica. Aparecen modelos de marea oceánica. Modelos de funciones covarianza del campo de gravedad. Se investiga la solución de grandes sistemas de ecuaciones (**Meissl**) y la Geodesia 4-dimensional (**Mather**). Se determina el WGS72 como sistema Geodésico Mundial y se termina la fase II de la retriangulación europea RETRIG con el sistema ED-79 (**Kobold**). Los modelos de geopotencial llegan al grado y orden 36 con los GRIM-2 y GEM-10B. Los sistemas de posicionamiento por satélites Doppler y laser llegan a precisiones relativas de 2 decímetros. Estas precisiones también son alcanzadas con medidas VLBI intercontinentales. Los parámetros de rotación de la Tierra quedan determinados con precisiones de 2 centésimas de segundo de arco.

En la década de los ochenta se desarrolla la gravimetría marina y aerotransportada con precisiones de 1 miligal. Se contrastan los primeros gradiómetros. Se trabaja con seguimiento satélite a satélite. Se continúa y perfecciona el seguimiento laser de satélites y de la Luna. Se establecen las primeras redes geodésicas mundiales con VLBI para la definición del sistema de orden cero. Se siguen lanzando satélites geodésicos como los Navstar 6 a 13 de GPS, los Nova 1 a 3, el Oscar 30, el Bulgaria 1300, Meteor-3, Ajisai, Geo-IK y los ETALON 1 y 2. El primer satélite GPS del Bloque II fue lanzado en febrero de 1989. Por su parte se desarrollan y comercializan receptores portátiles GPS de 10 fabricantes. En esta década las investigaciones se dirigen fundamentalmente a la Geodesia integrada, Geodesia operativa, optimización de redes, rotación de la Tierra y determinación del geoide. Se realizan campañas de comparación de gravímetros absolutos en Sevres. Se establecen los Datums Norteamericanos NAD-83 y NAD-87. Se determina y comienza a usarse el Sistema Geodésico Mundial WGS-84. También se establece el Sistema Europeo ED-87 y la Red Europea Unificada de Nivelación UELN-73. En gravimetría se comienza la Red internacional de Bases de gravimetría absoluta IAGBN.

Se obtienen los primeros resultados de la topografía marina a partir de altimetría de satélites. En el GPS también se logran levantamientos estáticos y cinemáticos con precisiones centimétricas relativas. En cuanto a modelos de geopotencial, se obtienen desarrollos hasta orden y grado 360 como el OSU86F. Un objetivo de los trabajos de esta década de los ochenta es aumentar la precisión de las determinaciones geodésicas, cualquiera que sea la técnica utilizada. La determinación de geoides regionales comienza a lograrse con precisiones internas de 20 centímetros, las técnicas espaciales de posicionamiento alcanzan precisiones relativas de 1 centímetro y los parámetros de rotación de la Tierra se determinan con precisiones de la milésima de segundo de arco. Es también en la década de los ochenta cuando prácticamente todas las operaciones geodésicas de relieve tienen carácter internacional. Así surgen proyectos de diversa índole que se desarrollan en conjunto, entre ellos podemos citar: MERIT-COTES, WEDOC, WEGENER-MEDLAS, ADOS, Crustal Dynamics, etc.

En los años noventa continúan los desarrollos iniciados en la década anterior, presentándose ya resultados tangibles de gran precisión. Se establecen las redes continentales por técnicas GPS y las redes nacionales de orden cero. La investigación se dirige al control de calidad de las redes GPS con el estudio de la propagación de errores de todo tipo. También se investiga el modelado de fuerzas no gravitacionales y los métodos gradiométricos. En la geodesia espacial continúan los avances en VLBI, GPS y los modernos sistemas DORIS, PRARE y DGPS para aumentar la precisión y facilidad de seguimiento de satélites y posicionamiento de estaciones. Se lanzan nuevos satélites GPS del bloque II y se prepara el bloque III, también se lanzan satélites Laser como el LAGEOS-2, el ESTELLA y en GFZ-1. Pero la novedad de los años noventa es el uso de satélites medioambientales de amplio espectro, en 1991 se lanza en ERS-1 de la Agencia Europea del espacio, en 1992 el TOPEX/Poseidon, misión conjunta de EE.UU. y Francia y en 1995 el ERS-2 de la ESA. Estos satélites, además de servir como satélites de recursos y oceanográficos, proporcionan a la Geodesia medidas altimétricas con las que se perfeccionan los modelos de geopotencial, los geoides marinos y la determinación precisa de la SST, superficie topográfica del mar.

Aparecen en estos años los modernos modelos de geopotencial como los estadounidenses OSU91A de 1992 y el EGM96 de 1996 entre otros.

La Asociación Internacional de Geodesia continúa celebrando sus Asambleas Generales cada cuatro años en conjunción con las reuniones de la Unión Internacional de Geodesia y Geofísica. Las directrices y publicaciones emanadas de la mencionada Asociación marcan las pautas del desarrollo moderno de la Geodesia y a ellas remitimos al lector para una continua actualización.

En 1996 la normativa de regulación de los sistemas GPS determinó la supresión, en el 2006, de la Disponibilidad Selectiva y la incorporación de una frecuencia más para uso civil. Esto significa que dentro de unos años los satélites GPS transmitirán código civil en las frecuencias L2 y L1, redundancia que permitirá estimar los errores ionosféricos, proporcionando una precisión en modo absoluto similar a la obtenida con técnicas diferenciales. La señal en la frecuencia L1 permanecerá invariable, lo que permitirá a los actuales receptores seguir operativos. El segmento de control se mejorará con la puesta en marcha de un nuevo sistema de control, actualmente en fase de diseño, para la estación experta que contempla hasta un total de veinte estaciones monitoras, lo que supondrá un control más preciso de las efemérides y de los relojes de los satélites.

Con los sistemas de navegación actuales GPS, GLONASS, GPS/GLONASS no es posible cumplir los estándares rigurosos de seguridad que algunas aplicaciones civiles, como la navegación aérea, requieren. En concreto, la notificación de errores al usuario sobre el funcionamiento del sistema puede llevar desde un segundo, cuando el error se produce en el satélite, hasta varias horas, en aquellos casos en los que es el segmento control el que detecta el fallo. Con el fin de resolver estos inconvenientes, Europa está desarrollando EGNOS (*European Geostationary Navigation Overlay Service*) que estará operativo en el año 2003. Este sistema reducirá los errores en posicionamiento para alcanzar los estándares de seguridad en la navegación aérea con la instalación en tierra de una red de 34 antenas receptoras fijas (RIMS) que recibirán las señales GPS enviándolas a un centro de control donde se calibrará la información del satélite midiendo el posible error para corregirlo y enviarlo de nuevo a 10 estaciones en tierra. Además se enviarán estas señales a dos nuevos satélites INMARSAT geoestacionarios situados a una altura de 35000 Km., que actuarán como repetidores enviando las señales a los usuarios. Servicios similares se están desarrollando en Estados Unidos (WAAS: *Wide Area Augmentation System*) y en Japón (MTSAS: *MTSAT Satellite Based Augmentation System*). Así mismo, Europa pondrá en marcha un sistema global de navegación por satélite (GNSS-1: *Global Navigation Satellite System 1*) que integrará los servicios de GPS, GLONASS y de las redes EGNOS, WAAS y MTSAS. Este será el paso inicial hacia la consecución de un sistema europeo de posicionamiento (GNSS-2 o Galileo) que utilizará una constelación de satélites europeos.

Por último puntualizar que en los próximos cinco años GPS y GPS/GLONASS serán los únicos sistemas de posicionamiento basado en satélites que se encontrarán operativos.

V.3 EL GEOIDE Y EL ELIPSOIDE

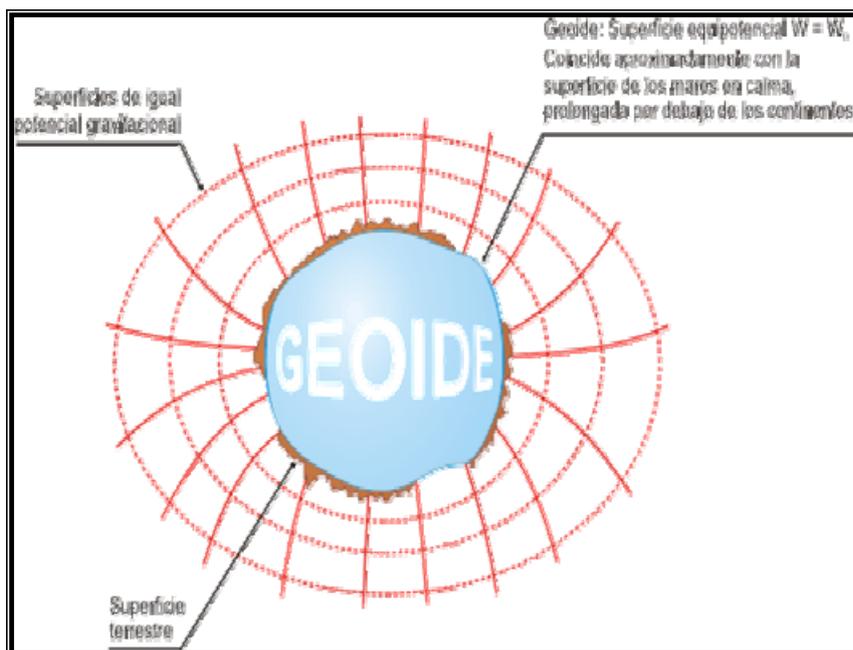
Para la geodesia, el apoyo de las figuras Geométricas tales como la esfera y el elipsoide resultan de gran utilidad, no obstante, la verdadera forma de la tierra obedece a un campo matemático, cuya abstracción es el denominado geoide en la teoría de Molodensky. En 1833, J. Lesting propuso el concepto de geoide: "superficie equipotencial (o de nivel), del campo gravitatorio terrestre que coincida con la superficie del nivel medio del mar en reposo, idealmente extendida entre los continentes" Esto significa que el potencial gravitatorio es constante en cada punto del geoide y por lo tanto la vertical del lugar es perpendicular a este geoide"

Como puede verse, la distribución de las masas al interior del geoide es indeterminable hasta ahora, hablando estrictamente, pues se requerirán hipótesis sobre la estructura interna. Molodensky desarrollo una teoría que ignora dicha estructura interna en una superficie llamada cuasigeoide, sobre la que es posible realizar mediciones superficiales, definiendo una figura auxiliar que reúne condiciones matemáticas rigurosas, prescindiendo así de la figura del geoide.

Si la tierra contase con una densidad uniforme y no existiera el relieve, el geoide tendría una forma de elipsoide achatado y centrado sobre el centro de masas de la tierra, pero como la figura del geoide depende de su distribución de masas interna existe una ondulación o altura geoidal entre el geoide y el elipsoide, produciéndose así una desviación de la vertical, pues donde exista una diferencia de masas el geoide se hunde por debajo del elipsoide o por encima de tales diferencias son un déficit o un exceso respectivamente.

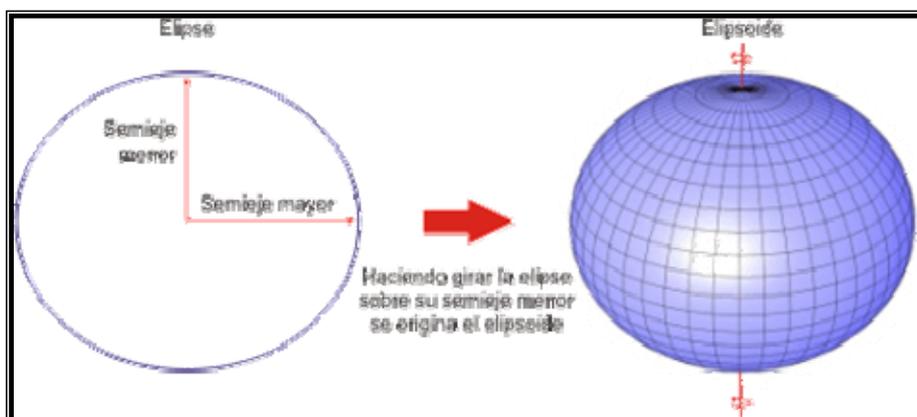
El Geoide será el lugar geométrico de los puntos que se encuentran en equilibrio bajo la acción de las siguientes solicitaciones:

- ✘ Fuerzas de atracción gravitatoria del resto de los puntos de la superficie del mismo.
- ✘ Fuerzas de atracción gravitatoria del resto de los astros del Sistema Solar.
- ✘ Fuerza centrífuga, debida al movimiento de rotación de la Tierra.



La obtención de una superficie de referencia, con una definición matemática sencilla que permita efectuar cálculos, es imprescindible para poder realizar la proyección de los puntos del relieve terrestre sobre la misma y permitir la elaboración de mapas y planos. El geode no puede ser la superficie de referencia adoptada, pues, como hemos dicho, es muy compleja e irregular. Se toma entonces la hipótesis de escoger un elipsoide de revolución que se adapte en lo posible al geode y que se define por unos parámetros matemáticos, denominándose **Elipsoide de referencia**.

El elipsoide es una figura tridimensional que intenta reproducir la geometría del geode, pero con la particularidad de que su superficie sí es modelizable a partir de ecuaciones. Tiene su origen en una elipse a la que imaginariamente hacemos rotar entorno a su eje más corto:



A partir del giro de la elipse sobre su eje menor, se genera el elipsoide de revolución que ya es una figura tridimensional.

La elección del elipsoide es más que justificada, por razones de sencillez en su definición matemática y porque se ajusta con aproximación de primer orden al geoide. Hasta aquí, estaríamos hablando de lo que podemos denominar Elipsoide Medio o General, que se determinaría teniendo en cuenta los siguientes condicionantes:

- ✘ El centro gravitatorio terrestre debe coincidir con el centro del elipsoide.
- ✘ El plano definido por el Ecuador terrestre debe coincidir con el del elipsoide.
- ✘ La suma de los cuadrados de las alturas geoidales debe ser mínima.

Dada la gran dificultad que supondría realizar las observaciones necesarias para concretar este Elipsoide General, las distintas naciones han utilizado los llamados Elipsoides Locales, que constituyen una aproximación admisible en zonas geográficas concretas. Esto suele hacerse adoptando valores arbitrarios (los que más convengan) para la latitud y longitud geodésicas en un punto de origen, además de una altura sobre el elipsoide. Posteriormente, mediante la utilización de las ecuaciones matemáticas necesarias, se buscará mantener el paralelismo entre el eje menor del elipsoide y el eje de rotación de la Tierra.

Los trabajos geodésicos llevados a cabo por los diferentes países han dado lugar a la definición de numerosos elipsoides de referencia, de forma que las medidas efectuadas por cada país están referidas al elipsoide elegido, lo que dificulta sobremanera la conexión de trabajos de ámbito internacional.

Como es lógico, la tendencia desde entonces ha sido la de intentar establecer una cartografía uniforme, referida a un mismo elipsoide. En este sentido, y haciendo un poco de historia, fue Hayford, en el año 1910, el que estableció un elipsoide para la representación de EEUU, que fue adoptado en el año 1924 por la Asamblea Internacional de Geodesia y Geofísica como elipsoide internacional de referencia, con los parámetros:

$$a = 6378388.00$$

$$b = 6356912.00$$

$$\alpha = 1: 297.00$$

Este elipsoide fue perfeccionado con posterioridad gracias a determinaciones obtenidas mediante satélites artificiales, estableciéndose uno con parámetros muy parecidos, que se adoptó como internacional en 1964, por la Unión Astronómica Internacional, en Hamburgo.

Los parámetros fueron los siguientes:

$$a = 6378155.00$$

$$b = 6356773.00$$

$$\alpha = 1 : 298.30$$

Pocos años después, en 1967, fue Veis el que, basándose en nuevos datos disponibles, estableció unos nuevos parámetros para este elipsoide. Son los siguientes:

$$a = 6\,378\,142 \pm 6\mu$$

$$\alpha = 1/298.255 \pm 0.005$$

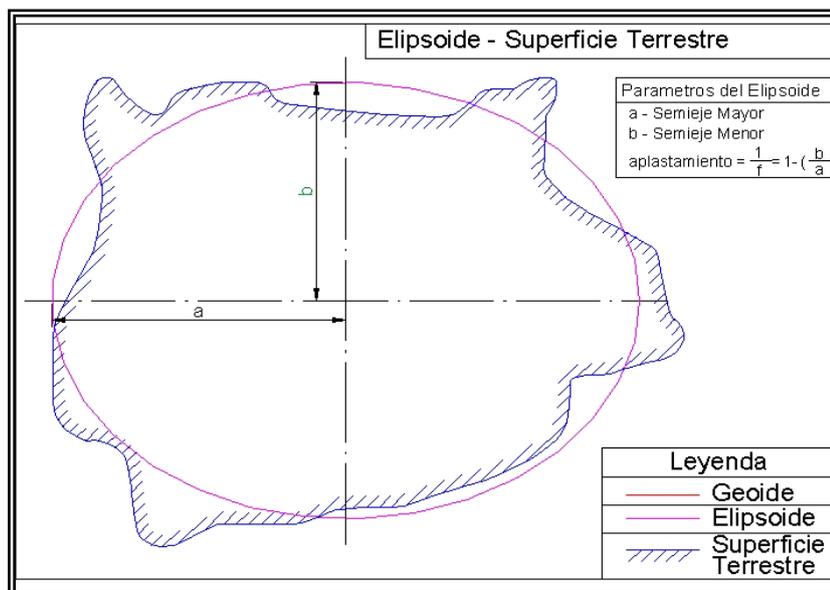
Los parámetros que definen todo elipsoide de revolución y las relaciones entre ellos, son los siguientes:

Semieje mayor: a

Semieje menor: b

Excentricidad: $e^2 = \frac{a^2 - b^2}{a^2}$

2ª Excentricidad: $e'^2 = \frac{a^2 - b^2}{b^2}$

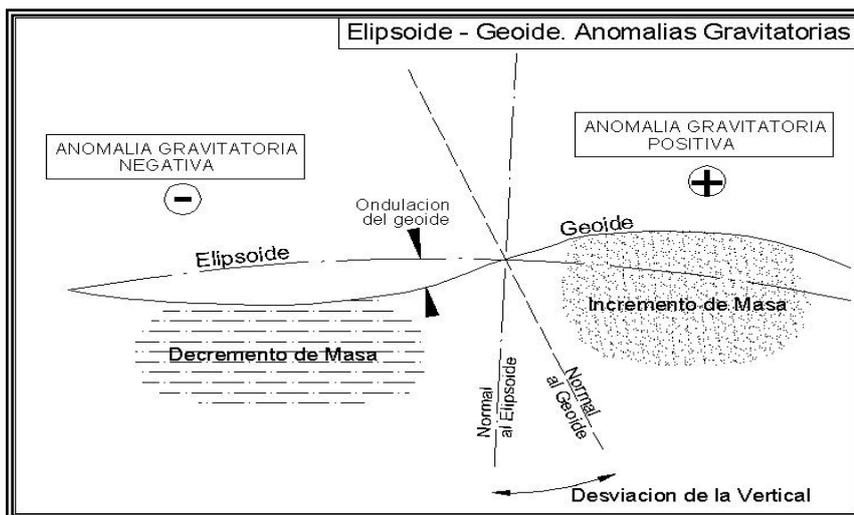


Los siguientes Elipsoides de Referencia son los mas utilizados a nivel mundial en Cartografía:

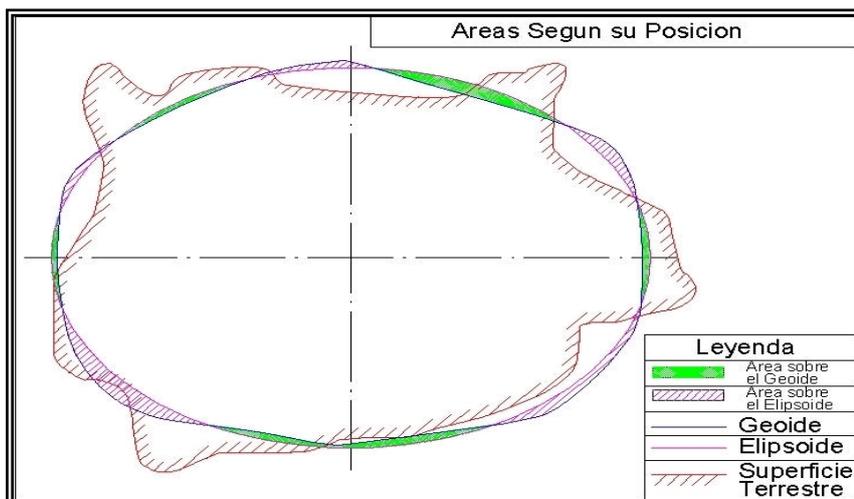
Elipsoides de referencia utilizados en cartografía				
Nombre del elipsoide	a	b	α	e
Airy 1830	6,377,563.40	6,356,256.91	299.32496	0.081673
Modified Airy	6,377,340.19	6,356,034.45	299.32496	0.081673
Australian National	6,378,160.00	6,356,774.72	298.25000	0.081820
Bessel 1841 (Namibia)	6,377,483.87	6,356,165.38	299.15281	0.081697
Bessel 1841	6,377,397.16	6,356,078.96	299.15281	0.081697
Clarke 1866	6,378,206.40	6,356,583.80	294.97869	0.082272
Clarke 1880	6,378,249.15	6,356,514.87	293.46500	0.082483
Delambre 1800	6,375,635.00	6,356,564.00	334.00000	0.077288
Everest (India 1830)	6,377,276.35	6,356,075.41	300.80170	0.081473
Everest (Sabah Sarawak)	6,377,298.56	6,356,097.55	300.80170	0.081473
Everest (India 1956)	6,377,301.24	6,356,100.23	300.80170	0.081473
Everest (Malaysia 1969)	6,377,295.66	6,356,094.67	300.80170	0.081473
Everest (Malay&Sing 1948)	6,377,304.06	6,356,103.04	300.80170	0.081473
Everest (Pakistan)	6,377,309.61	6,356,108.57	300.80170	0.081473
Modified Fischer 1960	6,378,155.00	6,356,773.32	298.30000	0.081813
Helmert 1906	6,378,200.00	6,356,818.17	298.30000	0.081813
Hough 1960	6,378,270.00	6,356,794.34	297.00000	0.081992
Indonesian 1974	6,378,160.00	6,356,774.50	298.24700	0.081821
Hayford 1910 (International)	6,378,388.00	6,356,911.95	297.00000	0.081992
Krassovsky 1940	6,378,245.00	6,356,863.02	298.30000	0.081813
GRS 80	6,378,137.00	6,356,752.31	298.25722	0.081819
South American 1969	6,378,160.00	6,356,774.72	298.25000	0.081820
Struve 1924	6,378,298.30	6,356,657.10	294.73000	0.082306
Walbeck 1819	6,376,896.00	6,355,833.00	302.80000	0.081210
WGS 72	6,378,135.00	6,356,750.52	298.26000	0.081819
WGS 84	6,378,137.00	6,356,752.31	298.25722	0.081819

Elipsoide comparado con el geoida.

La desigual distribución de la gravedad superficial, y de lo local de las perturbaciones, causa que existan zonas de la tierra por encima del geoida y por debajo de este:



Estas diferencias gravitatorias son causadas por la composición terrestre y la presencia de una gran masa de agua en los océanos, que causa una menor atracción, y hace que, por lo general, el geoida quede por encima del elipsoide en la zona continental y por debajo en la zona oceánica:



Ángulo radial de la vertical

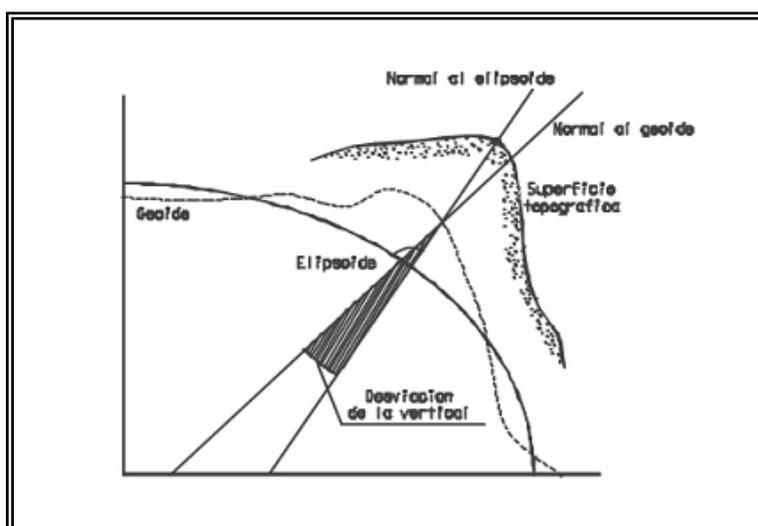
Como la Tierra no es perfectamente esférica, sino que tiene forma elipsoidal debido a la rotación. De no existir ésta, la dirección de la plomada siempre coincidiría con el radio de la Tierra., cada punto de la superficie terrestre está sometido a dos fuerzas:

- ❖ Atracción gravitatoria debida a la masa terrestre, en la dirección del centro de gravedad de la Tierra.
- ❖ Fuerza centrífuga (nula en los polos y máxima en el ecuador), en la dirección del radio del paralelo imaginario en que se encuentre dicho punto.

La resultante de estas dos fuerzas en cada punto es la vertical (vertical astronómica o vertical física), que seguirá la dirección del radio terrestre en el ecuador y en los polos, pero a otras latitudes formará un ángulo con el mismo, al que se llama ángulo radial de la vertical. Este ángulo es máximo aproximadamente a los 45° de latitud, alcanzado un valor de unos 11 minutos.

Desviación de la vertical.

Se conoce como desviación de la vertical en un punto P del terreno, al ángulo que existe entre la vertical astronómica y la normal al elipsoide (vertical geodésica).

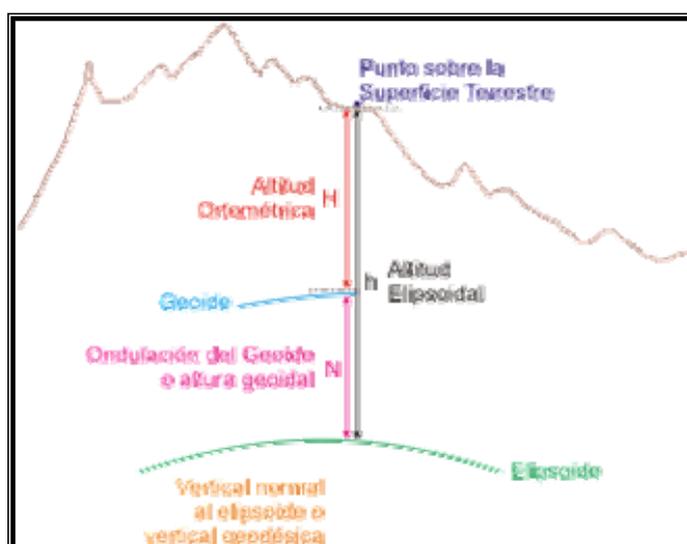


Para el estudio de las variaciones de la vertical astronómica en función de las variaciones en el valor de la gravedad, se utilizan unos aparatos especiales denominados clinómetros.

A partir de estas variaciones y del conocimiento de la vertical geodésica, puede determinarse la desviación entre ambas, mediante la aplicación de la ecuación de Laplace. Los puntos en los que se calcula la desviación de la vertical se conocen como Puntos de Laplace y tienen gran importancia en Geodesia, ya que conociendo las desviaciones de la vertical en dos puntos, es posible determinar la separación existente entre el geode y el elipsoide.

La forma física de la tierra es una aproximación cercana a una superficie matemática del elipsoide de rotación. La superficie elipsoidal es lisa y conveniente par las operaciones matemáticas. Esto es porque el elipsoide es ampliamente usado como la superficie de referencia para las coordenadas horizontales en redes de trabajo geodesicas. De otra manera, el elipsoide, es mucho menos manejable como una superficie de referencia para coordenadas verticales (alturas). En otro caso, el geode es usado. Es definido como una superficie de niveles del campo de gravedad e cual determina el nivel del mar, y puede extenderse dentro del cuerpo sólido de la tierra. La separación vertical entre el geode y una referencia particular en el elipsoide es llamada ondulación geoidal N . Los valores numéricos de las ondulaciones evidentemente dependen en particular del elipsoide. Para una referencia elipsoidal global, ellas pueden alcanzar hasta 100 m. La relación geométrica entre la ondulación geoidal N , la altura elipsoidal h y la altura ortométrica H es aproximadamente:

$$h = N + H$$



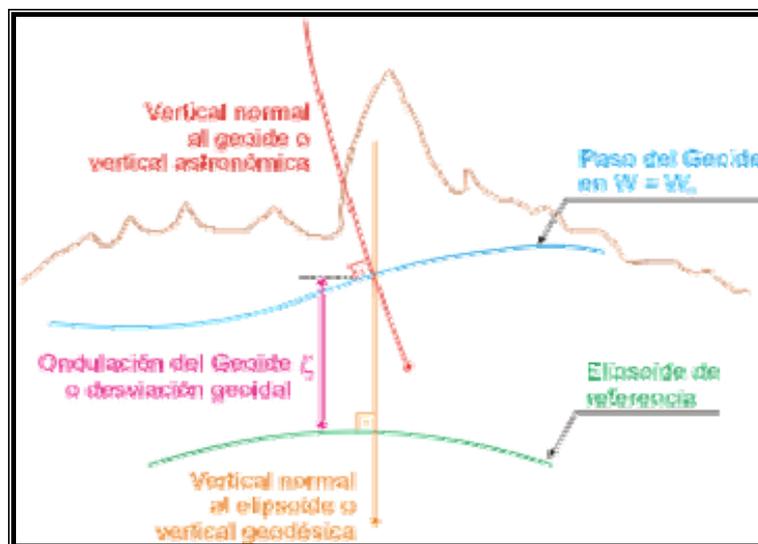
Es evidente que las ondulaciones que la ondulación geoidal N debe ser conocida cuando las observaciones en geodesia Satelital (alturas elipsoidales) y de geodesia terrestre (alturas definidas en el campo de gravedad) son usadas en un ajuste combinado.

El ángulo θ entre las direcciones de la normal elipsoidal y la línea de la plomada en el punto P es llamada la "Deflexión de la vertical". Usualmente, θ es dividida en 2 componentes y definida como:

$$\xi = \Phi - \varphi$$

$$\eta = (\Delta - \lambda) \cos \varphi$$

son obtenidas de observaciones astronómicas y φ de observaciones geodésicas. Las deflexiones de la vertical son también nombradas deflexiones astrogeodésicas. Los parámetros que definen un elipsoide local fueron usualmente estimados de tal manera que la distribución de deflexiones conocidas de la vertical cumpliera alguna condición mínima en el proceso de ajuste. Los elipsoides relacionados locales son por tanto los más adecuados.

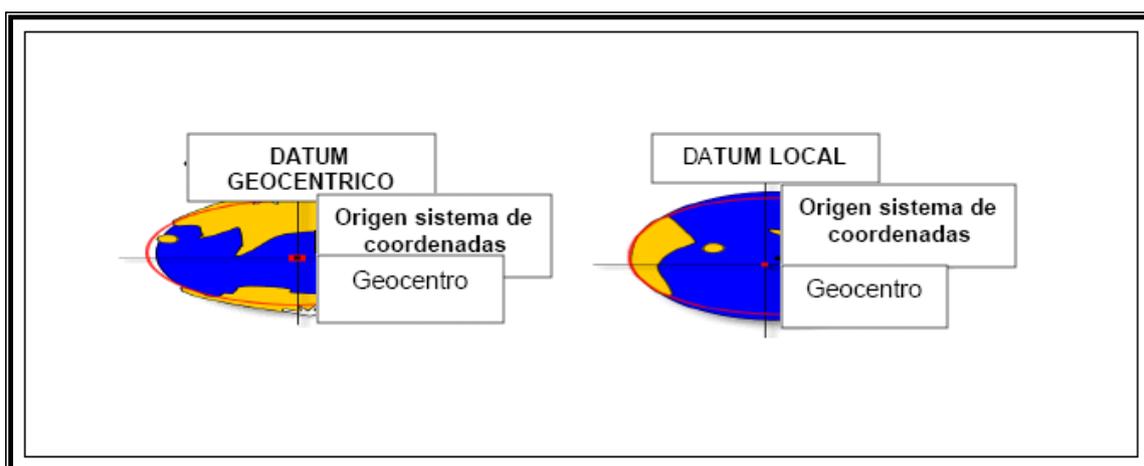


Un sistema global elipsoidal es relacionado a un elipsoide de referencia como la figura más adecuada a la Tierra en general. El origen del elipsoide es supuesto a coincidir con el centro de masa de la Tierra. Además las direcciones de los ejes elipsoidales son definidos entonces como paralelos par el sistema convencional de referencia terrestre (CTS).

V.4 DATUM

Se define el Datum como el punto tangente al elipsoide y al geoide, donde ambos son coincidentes.

El establecimiento de parámetros que describe la relación entre un elipsoide particular local y un sistema de referencia geodésico global, es llamado "Datum Geodésico".



Un datum geodésico es definido por un establecimiento de cinco parámetros

- ✧ **a** semieje mayor del elipsoide de referencia
- ✧ **f** achatamiento
- ✧ **$\Delta X, \Delta Y, \Delta Z$** coordenadas del origen del elipsoide con respecto al geocentro (parámetros de traslado al datum) para $\Delta X = \Delta Y = \Delta Z = 0$, el datum geodésico es llamado un datum absoluto.

Para un número largo de sistemas locales particulares de referencia, las renombradas constantes de cambio del datum o parámetros variables del datum $\Delta X, \Delta Y, \Delta Z$ pueden ser derivadas de observaciones satelitales. Ellas representan, como siempre, solamente una posición principal del sistema particular local con respecto al sistema geocéntrico.

Las siguientes tablas nos presentan diferentes datums con su correspondiente elipsoide:

Tabla de datums

Nombre del Datum	Elipsoide de referencia
Adindan	Clarke 1880
Afgooye	Krassovsky 1940
Ain el Abd 1970	International 1924
American Samoa 1962	Clarke 1866
Anna 1 Astro 1965	Australian National
Antigua Island Astro 1943	Clarke 1880
Arc 1950	Clarke 1880
Arc 1960	Clarke 1880
Ascension Island 1958	International 1924
Astro Beacon E 1945	International 1924
Astro DOS 71/4	International 1924
Astro Tern Island (FRIG) 1961	International 1924
Astronomical Station 1952	International 1924
Australian Geodetic 1966	Australian National
Australian Geodetic 1984	Australian National
Ayabelle Lighthouse	Clarke 1880
Bellevue (IGN)	International 1924
Bermuda 1957	Clarke 1866
Bissau	International 1924
Bogota Observatory	International 1924
Bukit Rimpah	Bessel 1841
Camp Area Astro	International 1924
Campo Inchauspe	International 1924
Canton Astro 1966	International 1924
Cape	Clarke 1880
Cape Canaveral	Clarke 1866
Carthage	Clarke 1880

Nombre del Datum	Elipsoide de referencia
Chatham Island Astro 1971	International 1924
Chua Astro	International 1924
Corrego Alegre	International 1924
Dabola	Clarke 1880
Deception Island	Clarke 1880
Djakarta (Batavia)	Bessel 1841
DOS 1968	International 1924
Easter Island 1967	International 1924
European 1950 (ED-50)	International 1924
European 1979 (ED-79)	International 1924
Fort Thomas 1955	Clarke 1880
Gan 1970	International 1924
Geodetic Datum 1949	International 1 924
Graciosa Base SW 1948	International 1924
Guam 1963	Clarke 1866
Gunung Segara	Bessel 1841
GUX 1 Astro	International 1924
Herat North	International 1924
Hjorsey 1955	International 1924
Hong Kong 1963	International 1924
Hu-Tzu -Shan	International 1 924
Indian 1954	Everest (India 1830)
Indian 1960	Everest (India 1830)
Indian 1975	Everest (India 1830)
Indonesian 1974	Indonesian 1974
Ireland 1965	Modified Airy
ISTS 061 Astro 1968	International 1924
ISTS 073 Astro 1969	International 1924
Johnston Island 1961	International 1924
Kandawala	Everest (India 1830)
Kerguelen Island 1949	International 1924

Nombre del Datum	Elipsoide de referencia
Kertau 1948	Everest (Malay. & Singapore 1948)
Kusaie Astro 1951	International 1924
L. C. 5 Astro 1961	Clarke 1866
Leigon	Clarke 1880
Liberia 1964	Clarke 1880
Luzon	Clarke 1866
Mahe 1971	Clarke 1880
Massawa	Bessel 1841
Merchich	Clarke 1880
Midway Astro 1961	International 1924
Minna	Clarke 1880
Montserrat Island Astro 1958	Clarke 1880
M'Poraloko	Clarke 1880
Nahrwan	Clarke 1880
Naparima BWI	International 1924
North American 1927 (NAD 27)	Clarke 1866
North American 1983 (NAD 83)	GRS 80
North Sahara 1959	Clarke 1880
Observatorio Meteorologico 1939	International 1924
Old Egyptian 1907	Helmert 1906
Old Hawaiian	Clarke 1866
Oman	Clarke 1880
Ordnance Survey Great Britain 1936	Airy 1830
Pico de las Nieves	International 1924
Pitcairn Astro 1967	International 1924
Point 58	Clarke 1880
Pointe Noire 1948	Clarke 1880
Porto Santo 1936	International 1924
Provisional South American 1956	International 1924
Provisional South Chilean 1963	International 1924
Puerto Rico	Clarke 1866

Parámetros	Nombre	NAD27	WGS84
Semieje mayor	a	6378206.4 m	6378137.0 m
Semieje menor	b	6356583.799999 m	6356752.314245 m
Achatamiento	f	1/294.9786982	1/298.257223563
Excentricidad	e ²	0.006768658	0.00669438
Segunda excentricidad	e'' ²	0.0068147849	0.00673994967

El datum fija el elipsoide a utilizar con sus parámetros geométricos correspondientes (siempre hay un elipsoide asociado a un datum), y establece el punto en el que la vertical geodésica coincide con la vertical astronómica. Es decir, el punto de relación entre geoide y elipsoide, que normalmente se corresponde con un punto de tangencia entre ambas superficies. A ese punto de relación se le denomina **punto astronómico fundamental**. Lógicamente, es necesario conocer con mucha precisión la vertical astronómica para orientar con precisión el elipsoide, pues es el punto inicial de materialización del sistema geodésico de referencia, pero hay una implicación aún más profunda: si la vertical astronómica y la vertical geodésica coinciden, significa que también las coordenadas geodésicas y las coordenadas astronómicas coincidirán. De ahí que los puntos fundamentales de los datums estén frecuentemente en observatorios astronómicos y de ahí procede la estrecha relación entre la astronomía y la geodesia, que se plasma en la rama de la geodesia llamada geodesia astronómica.

Conocer el datum de referencia de las coordenadas es un parámetro fundamental para mantener la exactitud cartográfica. Por otro lado, la capacidad de traducir datos cartográficos de un datum a otro es una habilidad que todo topógrafo debe conocer.

Por otro lado, existen las altitudes medidas a partir del elipsoide y que se vienen usando en los últimos años y cada vez más porque son las que nos dan las mediciones GPS. Estas altitudes presentan desfases notables con respecto a las ortométricas, puesto que como hemos dicho, la relación de distancia geoide-elipsoide varía constantemente a lo largo de toda la tierra, y eso sucede con cualquier elipsoide considerado. La diferencia ondulación del geoide puede llegar a variaciones de cientos de metros.

Al punto tomado como referencia para medir las altitudes cartográficas o cotas Z se le denomina **datum vertical**.

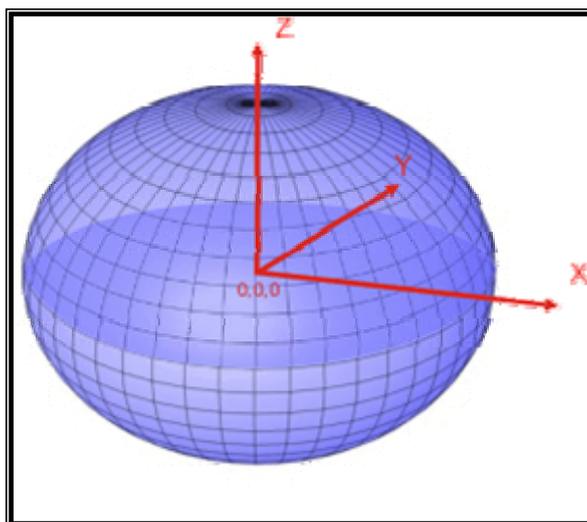
Tipos de Transformación de Datums

Existen diversos métodos para realizar el traspaso de unas coordenadas en un datum a otro de destino. Unas operan con coordenadas cartesianas X, Y, Z con referencia al centro geométrico del elipsoide de referencia considerado (no hay que confundir estas coordenadas geocéntricas X Y Z con coordenadas de sistemas de proyección como el UTM); otras, operan directamente sobre las coordenadas geodésicas expresadas en grados, minutos y segundos; por último, otras operan directamente con coordenadas proyectadas, si es necesario.

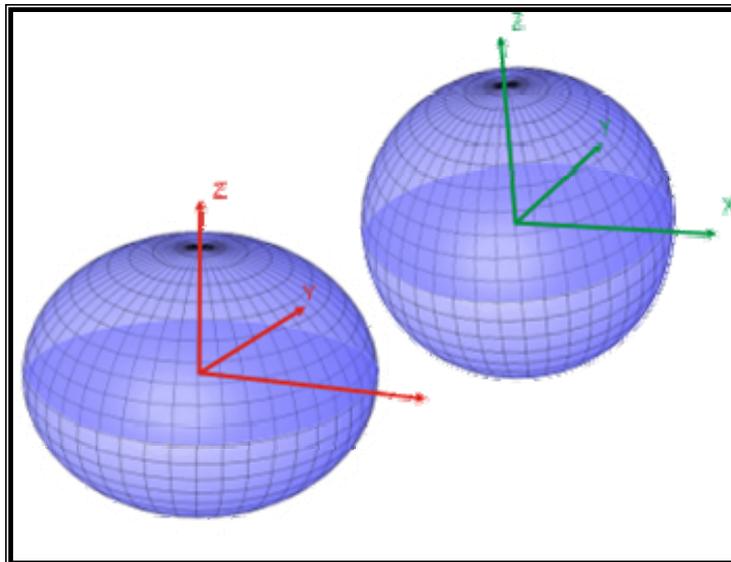
Las que operan con las coordenadas geodésicas directamente son las **Ecuaciones de Molodensky**. De estas ecuaciones existe una versión simplificada denominada comúnmente **Abriged-Molodensky**, aunque a veces también se refiere como transformación de Molodensky a secas, lo cual introduce una cierta confusión. La versión reducida, como una transformación de 3 parámetros, válida para precisiones bajas. La transformación de Molodensky completa es la que ofrece mayores garantías de precisión.

En cuanto a las transformaciones que operan con coordenadas proyectadas directamente (si es necesario), se encuentran las **transformaciones polinómicas** que emplean expresiones de distinto grado de polinomio para hacer el mejor ajuste entre dos sistemas de coordenadas que no siguen una pauta regular de distorsión entre sí. La versión más sencilla de estas transformaciones sería una transformación afín, que en esencia es la aplicación de un polinomio de orden 1. Las transformaciones polinómicas más complejas sí que pueden resolver un complejo cambio de datum.

Las transformaciones que operan con coordenadas cartesianas, requieren que estas coordenadas estén referidas al centro geométrico o de masa del elipsoide. Son lo que en términos geográficos se denominan coordenadas ECEF (*Earth Centered-Earth Fixed*), que son las coordenadas geocéntricas fijas (a veces se llaman también coordenadas cartesianas o coordenadas rectangulares). Podemos imaginar el marco de referencia de estas coordenadas, como un sistema tridimensional de ejes con centro en el elipsoide de revolución:

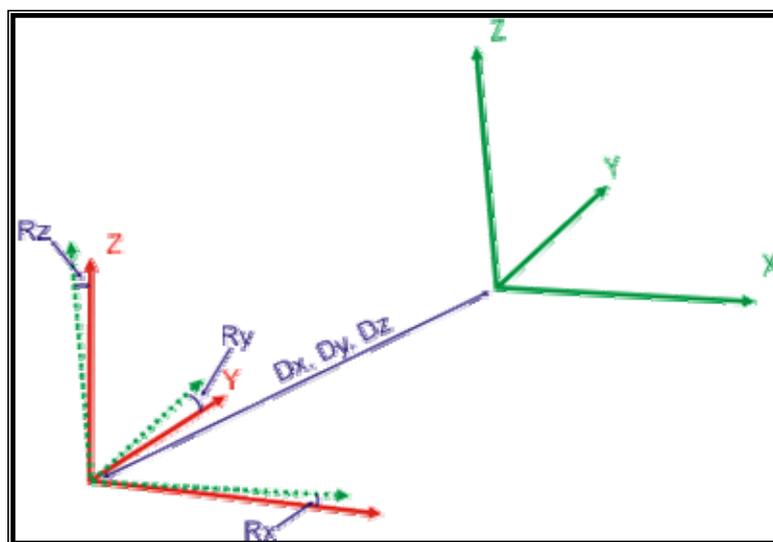


Así, cuando queremos hacer el traspaso entre coordenadas referidas a dos datums diferentes, lo primero que tenemos que hacer es pasarlas a geodésicas; en segundo lugar, pasarlas a geocéntricas; en tercer lugar, hacer el cambio de datum mediante la compensación de las diferencias entre los dos sistemas de ejes cartesianos tridimensionales geocéntricos:



Hay que considerar los desplazamientos de los centros, que se descomponen en un incremento de distancia en X, un incremento en Y y otro en Z. También supone tener que compensar los ángulos que forman cada eje con su homónimo en el otro sistema. Si los sistemas de ejes fueran paralelos, estos ángulos serían inexistentes, pero si no lo son, es necesario conocer el ángulo de desviación que presentan entre sí. Y por último, la diferencia de tamaño entre las unidades de un sistema y otro, que se denomina factor de escala.

Gráficamente, visualizamos estas diferencias de la siguiente manera:



En el gráfico está sin simbolizar la diferencia en escala entre ambos sistemas. Imaginemos que el sistema de ejes coloreados en rojo toma como unidad el metro; y sin embargo, el otro sistema tiene una unidad equivalente a 0.997 metros; el factor de escala para pasar del sistema verde al rojo sería 1.003; en otras palabras, habría que multiplicar las coordenadas verdes por 1.003

Son 7 los parámetros que tenemos que considerar para hacer el paso entre los dos sistemas de coordenadas: incrementos de distancia en X, en Y y en Z, rotaciones en los ejes X, Y, Z, y por último el factor de escala.

La mayor parte de la diferencia entre ambos sistemas se compensa teniendo en cuenta la diferencia de los centros (los desplazamientos en el eje X, en el eje Y y en el eje Z). De hecho, una transformación sencilla de datums consiste en pasar las coordenadas geodésicas a geocéntricas y una vez en geocéntricas compensar las diferencias de distancia al origen. Este tipo de transformación, suele denominarse de 3 parámetros y es sólo recomendable para aplicaciones de poca precisión.

Transformación de Datum con 7 parámetros

Dentro de las transformaciones de 7 parámetros usadas en geodesia, existen dos alternativas de formulación y una cierta confusión de nombres. Las dos formulaciones, casi idénticas, son las ecuaciones de Bursa-Wolf y la transformación de Helmert. Son prácticamente iguales y sólo presentan diferencias en la forma de plantear la matriz de rotaciones y sus signos:

Versión Bursa-Wolf (Coordinate Frame):

$$\begin{bmatrix} X' \\ Y' \\ Z' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta X \\ \Delta Y \\ \Delta Z \end{bmatrix} + (1+e) \cdot \begin{bmatrix} 1 & R_z & -R_y \\ -R_z & 1 & R_x \\ R_y & -R_x & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}$$

Coordenadas
Datum
Destino
Coordenadas
Datum
Origen

Versión Helmert (Position Vector):

$$\begin{bmatrix} X' \\ Y' \\ Z' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta X \\ \Delta Y \\ \Delta Z \end{bmatrix} + (1+e) \cdot \begin{bmatrix} 1 & -R_z & R_y \\ R_z & 1 & -R_x \\ -R_y & R_x & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}$$

Coordenadas
Datum
Destino
Coordenadas
Datum
Origen

Desde:

$$\left. \begin{matrix} \Delta X \\ \Delta Y \\ \Delta Z \end{matrix} \right\} \text{ T\u00e9rminos de Traslaci\u00f3n} \quad \left. \begin{matrix} R_x \\ R_y \\ R_z \end{matrix} \right\} \text{ T\u00e9rminos de Rotaci\u00f3n} \quad e = \text{Factor de Escala}$$

En cuanto a los nombres, existen denominaciones alternativas que crean una cierta confusi\u00f3n. As\u00ed, hay fuentes que atribuyen la expresi\u00f3n *Coordinate Frame* a la transformaci\u00f3n de Bursa-Wolf y el nombre alternativo *Position Vector* a la de Helmert. En las bases de datos de transformaciones del [EPSG](#) (European Petroleum Survey Group, ahora llamado OGP), existe confusi\u00f3n y disparidad de criterios. Pero esto no es del todo importante. Lo importante es saber que dentro de la formulaci\u00f3n Bursa-Wolf existe otra variante, y que la forma de contar los \u00e1ngulos (en el sentido de las agujas del reloj o contrario a las agujas del reloj) es importante para el funcionamiento de las ecuaciones. Tambi\u00e9n, hay que considerar que los paquetes de par\u00e1metros tienen un sentido de transformaci\u00f3n: consideran un datum origen y un datum destino, y por lo tanto si queremos revertir la conversi\u00f3n hay que variar el signo de los par\u00e1metros.

Las transformaciones de siete par\u00e1metros realizan una rotaci\u00f3n tomando como punto de rotaci\u00f3n el centro del elipsoide. Esto ocasiona que cuando se calculan los par\u00e1metros de desplazamiento y giro a partir de una serie de puntos de control con coordenadas en ambos sistemas, exista una alta correlaci\u00f3n entre las traslaciones y rotaciones. Para eliminar esta dependencia entre los par\u00e1metros, se utiliza una tercera variaci\u00f3n de las ecuaciones de 7 par\u00e1metros llamada modelo **Molodensky-Badekas**, que con la adopci\u00f3n de 3 par\u00e1metros adicionales pasa a usar un total de 10 en el proceso.

Estos tres nuevos parámetros de la variación Molodensky-Badekas definen el punto de rotación (Xp, Yp, Zp), que puede ser una posición geoméricamente representativa de la zona en la que se están traduciendo coordenadas (centroide del polígono de actuación). Este punto se puede sacar por un procedimiento muy simple: sacando la media de las X de todos los puntos de control, la media de las Y y la media de las Z, naturalmente con las coordenadas en el datum origen.

La variante Molodensky-Badekas queda como sigue:

Versión Molodensky-Badekas (10 Parámetros):

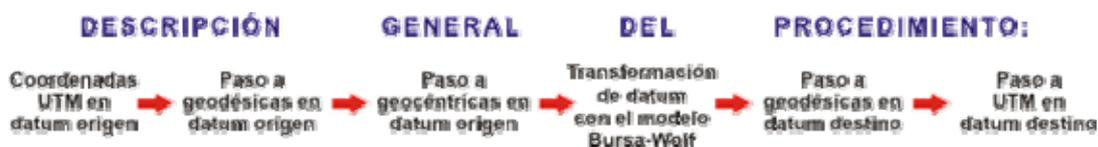
$$\begin{matrix} \left. \begin{matrix} X' \\ Y' \\ Z' \end{matrix} \right\} \begin{matrix} \text{Coordenadas} \\ \text{Datum} \\ \text{Destino} \end{matrix} \end{matrix} = \begin{matrix} \left. \begin{matrix} \Delta X \\ \Delta Y \\ \Delta Z \end{matrix} \right\} \begin{matrix} \text{Términos} \\ \text{de Traslación} \end{matrix} \end{matrix} + (1+e) \cdot \begin{matrix} \left. \begin{matrix} R_x \\ R_y \\ R_z \end{matrix} \right\} \begin{matrix} \text{Términos} \\ \text{de Rotación} \end{matrix} \end{matrix} \cdot \begin{matrix} \left. \begin{matrix} X - X_p \\ Y - Y_p \\ Z - Z_p \end{matrix} \right\} \begin{matrix} \text{Coordenadas} \\ \text{Datum} \\ \text{Origen} \end{matrix} \end{matrix} + \begin{matrix} \left. \begin{matrix} X_p \\ Y_p \\ Z_p \end{matrix} \right\} \begin{matrix} \text{Coordenadas} \\ \text{del Punto de} \\ \text{Rotación} \end{matrix} \end{matrix}$$

Como es lógico, para usar esta transformación tenemos que tener parámetros deducidos al efecto y no vale aplicar parámetros pensados para un modelo de 7 parámetros. La incorporación de un punto de rotación particularizado requiere de parámetros también con este condicionante extraídos con el modelo arriba representado.

La transformación de Bursa-Wolf, propuesta por Bursa en 1962 (*"The theory of the Determination of the Non-parallelism of the Minor axis of the Earth and Initial Astronomical and Geodetic meridians from observation of Artificial Satellite"*, en *Studia Geophysica et Geodetica*, vol. 6, nº2) y completada por Wolf en 1963 (*"Geometric connection and re-orientation of three-dimensional triangulation nets"* en *Bulletin Géodésique* vol. 68, pp. 65-169). Esta transformación es la más empleada hoy día, ya que ofrece un nivel de calidad más que suficiente para la mayor parte de las aplicaciones.

Los desplazamientos se dan en metros, las rotaciones en segundos sexagesimales, y el factor de escala en partes por millón.

En el campo de ejercicio se procede de la siguiente manera: cambiar coordenadas UTM en WGS84 a coordenadas UTM pero en un datum de destino NAD27. Para hacer este proceso, necesitamos realizar la siguiente secuencia general:



Por lo tanto, es fundamental para el topógrafo conocer el datum en el que se encuentra cada conjunto de datos, así como tener la habilidad de transformar fuentes de datos de un datum a otro, conociendo las implicaciones, riesgos y condicionantes involucrados en el proceso.

V.5 SISTEMAS DE COORDENADAS DE REFERENCIA

Los Sistemas de coordenadas de referencia son esencialmente para la descripción del movimiento de los satélites, la representación de las observaciones y la representación e interpretación de los resultados. El incremento de la precisión de muchas técnicas de observación satelitales requieren un incremento correspondiente en la precisión de los sistemas de referencia.

Los sistemas de coordenadas de referencia en Geodesia satelital son globales y geocéntricos por naturaleza, porque el movimiento satelital se refiere al centro de la masa de la tierra.

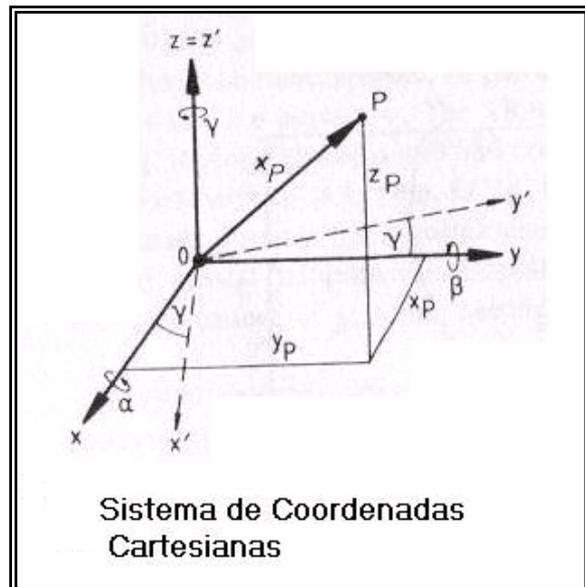
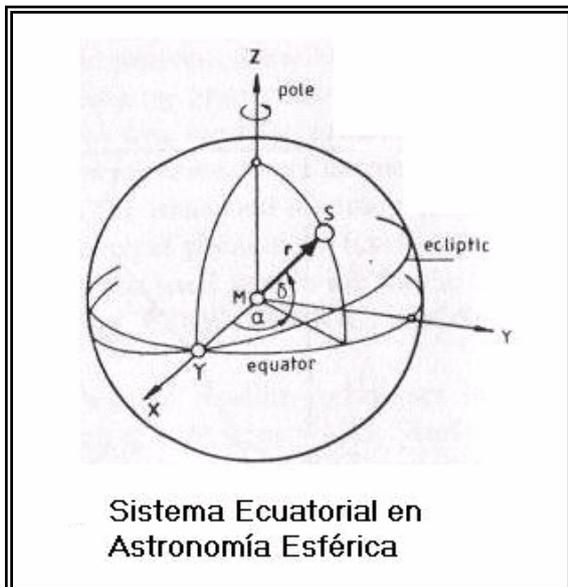
Las medidas terrestres son por naturaleza local en carácter y son usualmente descritas en los sistemas de coordenadas de referencia local. La relación entre ambos sistemas debe ser conocida con suficiente precisión. Desde la posición relativa y los cambios de orientación con el tiempo. El registro y modelado del tiempo de observación también juegan un papel importante. Se debe hacer notar que los resultados de los diferentes métodos de observación en Geodesia satelital se refieren a los sistemas de coordenadas de referencia particular los cuales son relacionados a los métodos individuales. Estos sistemas particulares no son necesariamente idénticos porque ellos pueden ser basados en diferentes definiciones. Frecuentemente la relación entre este sistema particular es conocida con una precisión muy baja que la precisión de las técnicas de observación particular. El establecimiento de formulas de transformación precisos entre sistemas es una de las más importantes tareas en Geodesia Satelital.

Sistema de Coordenadas Cartesianas y Transformaciones de Coordenadas

En un sistema de coordenadas Cartesianas con ejes X, Y, Z, la posición de un punto P determinado por vector de posición:

$$X_p = \begin{pmatrix} X_p \\ Y_p \\ Z_p \end{pmatrix}$$

Donde X_p, Y_p, Z_p son números reales.



La transformación a un segundo sistema de coordenadas cartesianas con origen idéntico y con los ejes X, Y, Z; el cual es generado por el primero, por una giro alrededor del eje Z, por el ángulo γ , que puede ser conocido a través de la matriz de operación:

$$X_p = R_3(\gamma) X_p$$

con

$$R_3(\gamma) = \begin{pmatrix} \cos \gamma & \text{sen} \gamma & 0 \\ \text{sen} \gamma & \cos \gamma & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

Rotaciones equivalentes R1 alrededor del eje X y R2 alrededor del eje Y son:

$$R_1(\alpha) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha & \operatorname{sen} \alpha \\ 0 & -\operatorname{sen} \alpha & \cos \alpha \end{pmatrix} \quad R_2(\beta) = \begin{pmatrix} \cos \beta & 0 & -\operatorname{sen} \beta \\ 0 & 1 & 0 \\ \operatorname{sen} \beta & 0 & \cos \beta \end{pmatrix}$$

La representación es válida para el sistema de coordenadas de la mano derecha. Alguna transformación de coordenadas puede ser conocida a través de una combinación de rotaciones. La transformación completa es:

$$Xp = R_1(\alpha)R_2(\beta)R_3(\gamma)$$

Las propiedades matemáticas de las matrices de rotación son directas usando álgebra lineal siguiendo las reglas, que son de mucha importancia:

La rotación no cambia el tamaño de un vector de posición

La multiplicación de matrices no es conmutativa

$$R_1(\mu)R_3(\nu) \neq R_3(\nu)R_1(\mu)$$

La multiplicación de matrices es asociativa

$$R_i(R_j R_k) = (R_i R_j) R_k$$

La rotación alrededor de los mismos ejes son aditivas

$$R_i(\nu)R_i(\mu) = R_i(\nu + \mu)$$

El inverso y el transpuesto son iguales

$$R_i^{-1}(\mu) = R_i^T(\mu) = R_i(-\mu)$$

La siguiente relación también es válida

$$(R_i R_j)^{-1} = R_j^{-1} R_i^{-1}$$

La polaridad de los ejes de coordenadas puede cambiar con la reflexión de la matrices:

$$S_1 = \begin{pmatrix} -1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad S_2 = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad S_3 = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \end{pmatrix}$$

Finalmente, la matriz por una rotación general de los ángulos: α, β, γ es:

$$R = \begin{pmatrix} \cos \beta \cos \gamma & \cos \beta \operatorname{sen} \gamma & \operatorname{sen} \beta \\ \operatorname{sen} \alpha \operatorname{sen} \beta \cos \gamma - \cos \alpha \operatorname{sen} \gamma & \operatorname{sen} \alpha \operatorname{sen} \beta \operatorname{sen} \gamma + \cos \alpha \cos \gamma & \operatorname{sen} \beta \cos \beta \\ \cos \alpha \operatorname{sen} \beta \cos \gamma + \operatorname{sen} \alpha \operatorname{sen} \gamma & \cos \alpha \operatorname{sen} \beta \operatorname{sen} \gamma - \operatorname{sen} \alpha \cos \gamma & \cos \alpha \cos \beta \end{pmatrix}$$

La relación entre el vector de posición en dos sistemas de coordenadas de rotación arbitrarias, es entonces:

$$X_p''' = R_{X_p}; \quad X_p = R_{X_p}^T$$

En geodesia satelital los ángulos de rotación son frecuentemente muy pequeños, estos permiten el uso de la linealización de R.

Con $\cos \alpha \cong 1$ y $\alpha \cong \alpha$ en radianes, entonces el orden de los términos, es el que sigue:

$$R(\alpha, \beta, \gamma) = \begin{pmatrix} 1 & \gamma & -\beta \\ -\gamma & 1 & \alpha \\ \beta & -\alpha & 1 \end{pmatrix}$$

Sistemas de Coordenadas de Referencia en Geodesia Satelital

Dos sistemas son los requeridos

- ✱ Un espacio fijo, un sistema inercial de referencia (CIS), para la descripción del movimiento satelital.
- ✱ Una tierra fija, sistema terrestre de referencia (CTS) por la posición de las estaciones de observación y por la descripción de resultados en Geodesia Satelital.

Las leyes de Newton del movimiento son solamente validas en un sistema de referencia inercial, por ejemplo un sistema de coordenadas en reposo o en un estado de movimiento rectilíneo uniforme sin ninguna aceleración. La teoría de movimiento por satélites artificiales es desarrollada con respecto a tal sistema.

El sistema ecuatorial dado en una época T_0 , es usado en astronomía esférica produce una buena aproximación a un sistema de referencia inercial. Para el tiempo siendo conocido a través de un catalogo de posiciones y del movimiento propio para un número dado de estrellas fundamentales (FK5) (Fricke 1985) sumado a un sistema de constantes astronómicas (USNO 1983).

El origen del sistema es supuesto a coincidir con el geocentro M. El eje Z positivo orientado hacia el polo norte y el eje positivo X para el primer punto de aries γ . El eje Y completa un sistema de la mano derecha. Tal sistema de referencia es nombrado "Sistema Inercial Convencional" (CIS) para distinguirlo de otro sistema inercial. Desde el centro de masa de la tierra (el origen de este sistema de referencia) se experimenta pequeñas aceleraciones por el movimiento anual alrededor del sol, el término "casi-inercia", es también usado.

La transformación de las coordenadas esféricas α, δ, r en las coordenadas cartesianas X, Y, Z es

$$X = r \cos \delta \cos \alpha$$

$$Y = r \cos \delta \operatorname{sen} \alpha$$

$$Z = r \operatorname{sen} \delta$$

Las fórmulas inversas son:

$$r = \sqrt{X^2 + Y^2 + Z^2}$$

$$\alpha = \arctan \frac{Y}{X}$$

$$\delta = \arctan \frac{Z}{\sqrt{X^2 + Y^2}}$$

En astronomía esférica r es usualmente definido como el radio de unidad. Nosotros podemos considerar la esfera celeste como una unidad esférica y aplicar las formulas básicas de la geometría esférica. La precisión no es suficiente para las necesidades modernas. Un considerable avance o desarrollo, por uno o dos grados de magnitud, es conocido con satélites astronómicos como HIPPARCOS. Otra posibilidad para una realización mucho más precisa de un sistema de referencia de espacio fijo es el uso de fuentes de radio extragalácticas (Quasar), (VLBI) la cual usara radio telescopio. El sistema FK5, en relación a la época estándar J2000 ha sido usado como cometa convencional CIS desde el primero de enero de 1988.

Un apropiado sistema de referencia de tierra fija debe ser conectado de una manera bien definida con la corteza de la Tierra. Tal Sistema Convencional Terrestre (CTS) puede ser realizado a través de un sistema de coordenadas cartesianas de estaciones fundamentales con una red de trabajo global. Actualmente es posible establecer a través de la dirección convencional, la principal orientación del eje de la polar y una longitud cero en el ecuador (Greenwich Mean Observator).

El Sistema Terrestre Convencional (CTS) es también llamado Sistema de Tierra Centra y Tierra Fija (ECEF).

La transformación del sistema de espacio fijo ecuatorial (CIS) al sistema terrestre convencional (CTS) es conocido a través de secuencias de rotación por

- precesión
- nutación
- rotación de tierra incluyendo el movimiento polar

Este puede ser descrito con operaciones de matrices. Un punto en la esfera celeste, describe la posición del vector r , nosotros podemos escribir entonces:

$$r_{CTS} = SN Pr_{CTS}$$

Los elementos de las matrices de rotación deben ser conocidas con suficiente precisión para cada etapa de observación. Estas estaciones son ahora consideradas en más detalle.

a) Precesión y Nutación

Los ejes de la tierra de rotación y sus planos ecuatorial no son fijos en el espacio pero rota respecto a un sistema inercial. Estos resultados provienen de la atracción gravitacional de la luna y el sol en un movimiento de pandeo ecuatorial de la tierra. El movimiento total es compuesto de un componente secular principal (precesión) y un componente periódico (nutación).

La posición y orientación del plano ecuatorial y el primer punto de Aries es llamado ecuador principal y equinoccio principal, respectivamente, cuando solamente la influencia de la precesión es considerada. Cuando la nutación es tomada para el conteo, son llamados ecuador verdadero y equinoccio verdadero. Las coordenadas de estrellas respectivas son: la posición principal y la posición verdadera. La posición principal puede ser transformada desde la etapa de referencia de (J2000) para la observación requerida en la etapa t usando la matriz de precesión:

$$P = R_3(-z)R_2(\theta)R_3(-\zeta)$$

con tres rotaciones con los ángulos: $-z, \theta, -\zeta$

$$\zeta = 0^{\circ}.6406161 T + 0^{\circ}.0000839 T^2 + 0^{\circ}.0000050 T^3$$

$$z = 0^{\circ}.6406161 T + 0^{\circ}.0003041 T^2 + 0^{\circ}.0000051 T^3$$

$$\theta = 0^{\circ}.5567530 T - 0^{\circ}.000185 T^2 - 0^{\circ}.0000116 T^3$$

$T = (t-t_0)$ es contado desde el siglo Juliano de 365.25 días.

La transformación del ecuador principal y el equinoccio al ecuador y equinoccio verdaderos respectivamente esta dado por etapas de observación, y es representada con una matriz de nutación:

$$N = R_1(-\varepsilon - \Delta\varepsilon)R_3(-\Delta\varphi)R_1(\varepsilon)$$

donde:

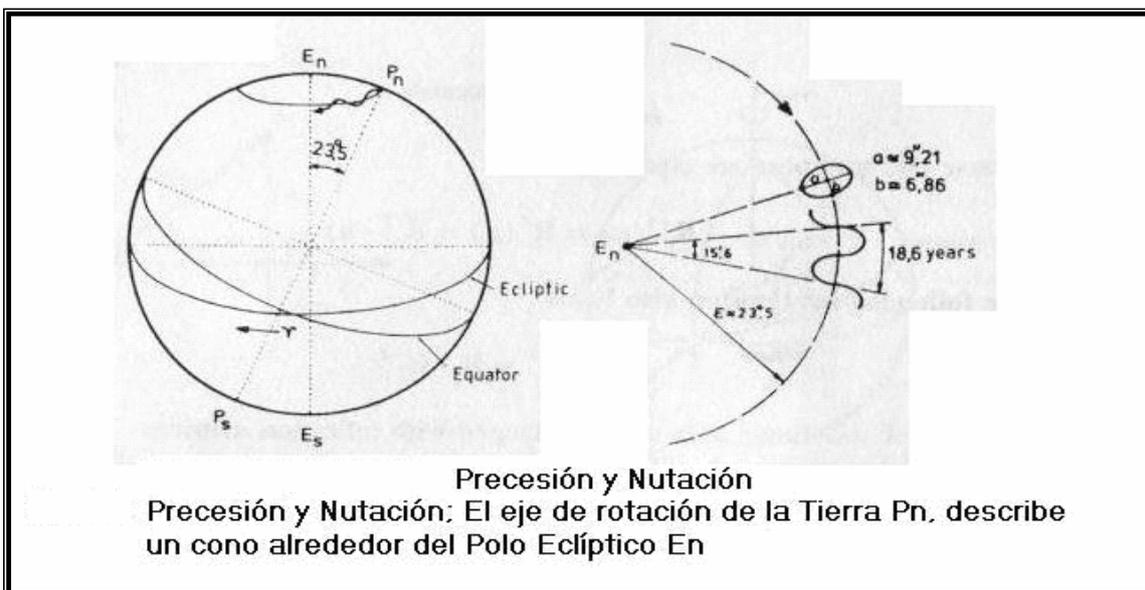
ε = oblicuidad de la eclíptica

$\Delta\varepsilon$ = nutación en la oblicuidad

$\Delta\psi$ = nutación en longitud (en la eclíptica)

y

$$\varepsilon = 232621.448 - 46.815T - 0.00059T^2 + 0.001813T^3$$



En 1980 la Unión Internacional de Astronomía (IAU) adopto, una teoría basada en un modelo elástico de la tierra, $\Delta\psi$ es trabajada en la computadora usando series de expansión resolviendo 106 coeficientes y $\Delta\varepsilon$ usa uno de 64 coeficientes. Los principales elementos son:

$$\Delta\psi = -17.196\text{sen}\Omega - 1.3187\text{sen}(2F - 2D + 2\Omega) - 0.2274\text{sen}(2F - 2\Omega)$$

$$\Delta\varepsilon = 9.2025\cos\Omega + 0.5736\cos(2F - 2D + 2\Omega) + 0.0927\cos(2F - 2\Omega)$$

con:

Ω = longitud principal de un nodo lunar ascendente

D = Elongación principal de la luna desde el sol

$$F = \lambda_M - \Omega$$

Para la aplicación a la transformación de coordenadas nosotros obtenemos las coordenadas verdaderas.

$$r_i = (X_T, Y_T, Z_T)$$

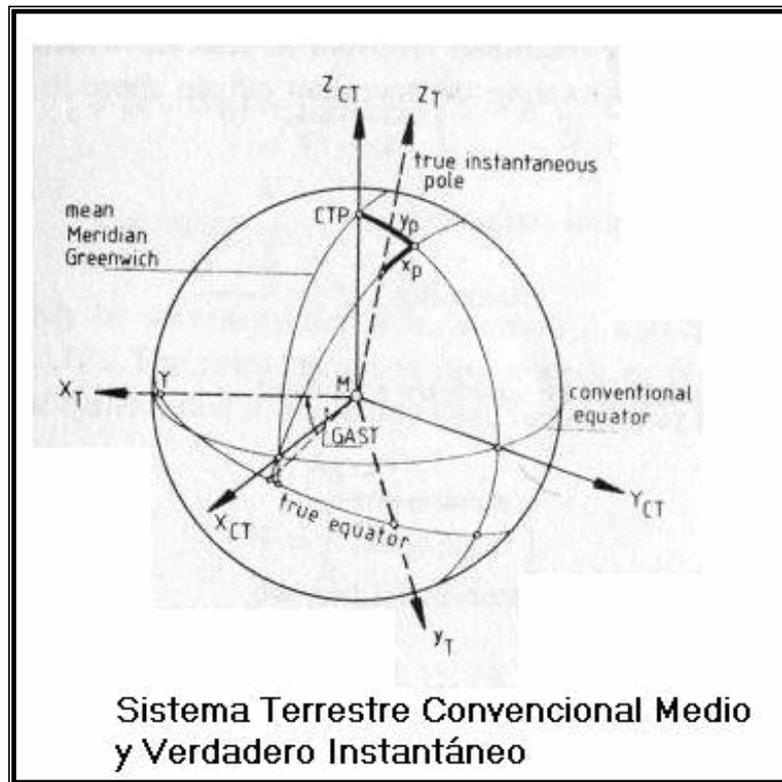
en el sistema ecuatorial instantáneo.

b) Rotación de la Tierra y Movimiento Polar:

Par la transformación de un sistema ecuatorial de espacio fijo instantáneo a un sistema de referencia terrestre convencional, nosotros necesitamos tres parámetros; son parámetros de rotación de la tierra (ERP), o parámetros de orientación de la tierra (EOP), El tiempo sidereal aparente de Greewich (GAST) y las coordenadas polares (X_p, Y_p).

Sin la precesión y la nutación, los parámetros de rotación no pueden ser descritos con la teoría pero deben ser determinados con observaciones actuales con un tiempo internacional y un servicio de latitud. En los últimos 80 años, más o menos, este servicio fue basado principalmente en observaciones astronómicas. El primero de enero de 1988 el Servicio Internacional de la Rotación de la Tierra (IERS)(Boucher et al1988) adquirió esta tarea. Las principales técnicas de observación son usadas ahora como laser ranging para satélites y para la luna.

La grafica siguiente muestra la situación geométrica para la transformación, del sistema terrestre fijo es conocido a través de la orientación convencional de un sistema cartesiano (X, Y, Z). El eje Z_{cr} esta en dirección hacia el polo terrestre convencional CTP, y el eje X_{cr} hacia el meridiano de Greenwich. La posición relativa del polo verdadero instantáneo con respecto al polo terrestre convencional CTP es usualmente descrito a través de las coordenadas polares X_p, Y_p .



La orientación relativa del eje X_{cr} depende directamente en la rotación de la tierra y es determinada a través del aparente tiempo sideral de Greenwich. El símbolo θ es usado frecuentemente para denotar GAST. La matriz que transforma el sistema de espacio fijo instantáneo a un sistema convencional terrestre es:

$$S = R_2(-x_p)R_1(-y_p)R_3(GAST)$$

$$R_3(GAST) = \begin{pmatrix} \cos(GAST) & \text{sen}(GAST) & 0 \\ -\text{sen}(GAST) & \cos(GAST) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

y, para los ángulos pequeños:

$$R_2(-x_p)R_1(-y_p) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & x_p \\ 0 & 1 & 0 \\ -x_p & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & -y_p \\ 0 & y_p & 1 \end{pmatrix}$$

$$= \begin{pmatrix} 1 & 0 & x_p \\ 0 & 1 & -y_p \\ -x_p & y_p & 1 \end{pmatrix}$$

Para propósitos prácticos, el polo del sistema instantáneo ecuatorial de espacio fijo verdadero puede ser considerado idéntico al llamado “*Polo Celestial Efemérides*” (CEP).

El CEP es definido para ser el polo de referencia para la computación del movimiento polar y nutación y es libre de los términos nutación casi diurna con respecto a la corteza de la tierra y al espacio inercial. (USNO 1983). Hasta el presente día el *Origen Convencional Internacional* (CIO-polo) es usualmente seleccionado como CTP. Es definido como la orientación principal del eje de rotación entre 1900 y 1905. El meridiano principal de Greenwich, también es llamado el Observatorio Principal de Greenwich (GMO) es definido a través de longitudes nominales de todas las observaciones las cuales contribuyen al servicio de tiempo internacional Bureau International de Heure (BIH).

Los cambios de coordenadas, causados por el reciente movimiento de Crustal, son también consideradas. En 1984 el Bureau International de Heure (Bill) introduce un sistema de referencia terrestre, llamado BTS (BIH sistema Terrestre), y este sistema es ahora nominado como *International Terrestrial Reference Frame* (ITRF).

La ecuación puede ser resuelta solamente por iteración, porque ϕ y h también van en presenta el sentido de la mano derecha. La convergencia es referida desde $h < N$.

Un sistema elipsoidal local, unido a la vertical elipsoidal n en el punto de observación P , puede ser definido con las siguientes especificaciones:

- ✘ Origen en el punto de observación P
- ✘ El eje Z_e en la dirección de la vertical del elipsoide
- ✘ El eje X_e en dirección al norte (meridiano geodésico)
- ✘ El eje Y_e en dirección al este, completando un sistema de mano izquierda.

La localización de un segundo punto P_i , en el sistema elipsoidal local, puede ser determinado por las siguientes características (coordenadas polares)

- ✘ Slant range S
- ✘ Acimutes elipsoidales α
- ✘ Direcciones elipsoidales o ángulos horizontales $\Delta\alpha$
- ✘ Ángulos zenitales elipsoidales ζ

Las coordenadas esféricas locales son, α, ζ asignadas a las coordenadas cartesianas locales.

Sistema de Coordenadas de Referencia en el Campo de Gravedad de la Tierra

Las observaciones geodésicas terrestres, con la excepción slant ranges s , son relacionadas con el vector local de gravedad g . Ellos debido a eso pueden fácilmente ser descritos en un sistema de coordenadas de referencia local el cual es ligado a la dirección de la línea de la plomada h en el punto de observación P .

La orientación del vector n es usualmente determinado por las observaciones astronómicas y ser descritas como:

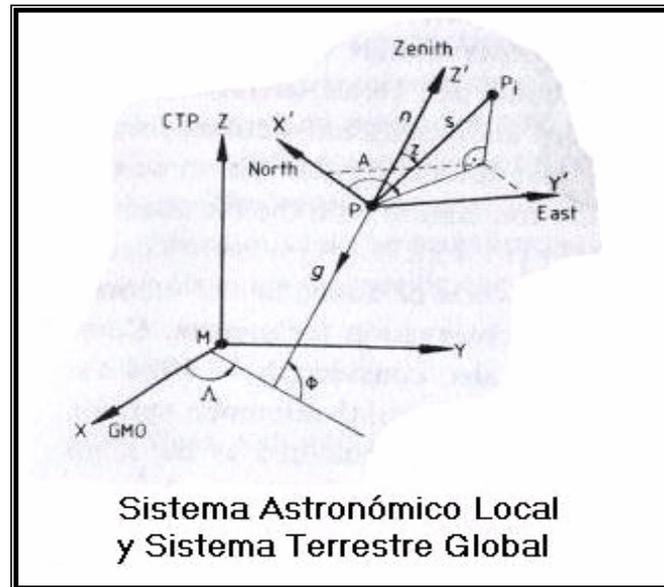
- ✘ Latitud astronómica $\phi \psi$
- ✘ La longitud astronómica Δ

$$h = \begin{pmatrix} \cos\phi & \cos\Delta \\ \cos\phi & \text{sen}\Delta \\ \text{sen}\phi \end{pmatrix}$$

La relación entre el sistema astronómico local, diferido con:

- ✘ El origen en el punto de observación P .
- ✘ El eje Z' en dirección al zenit astronómico
- ✘ El eje X' en dirección al norte (meridiano astronómico)
- ✘ El eje Y' en dirección al este.

Y es sistema convencional global (CTS), es mostrado en la siguiente figura.



La localización del punto P_i en el sistema astronómico local es derivado de observaciones terrestres:

- ✦ Azimut astronómico A
- ✦ Direcciones horizontales (diferencia de azimut)
- ✦ Slant ranger S
- ✦ Ángulo zenital X

y puede escribirse como:

$$X' = \begin{pmatrix} X' \\ Y' \\ Z' \end{pmatrix} = S \begin{pmatrix} \cos A & \text{sen}Z \\ \text{sen}A & \text{sen}Z \\ & \cos Z \end{pmatrix}$$

La diferencia de coordenadas observadas pueden ser transformadas del sistema local en el sistema global (CTS) usando:

$$\Delta X' = A \Delta X''$$

con

$$A = R_3(180^\circ - \Delta) R_2(90^\circ - \phi) S_2$$

La matriz S_2 cambia la orientación del eje Y u convierte un sistema de coordenadas de mano izquierda a uno de mano derecha. La formula explicita de A es:

$$A = \begin{pmatrix} -\operatorname{sen}\phi \cos \Delta & -\operatorname{sen}\Delta & \cos\phi \cos \Delta \\ -\operatorname{sen}\phi \operatorname{sen}\Delta & \cos \Delta & \operatorname{sen}\phi \\ \cos \phi & 0 & \operatorname{sen}\phi \end{pmatrix}$$

La formula inversa es:

$$\Delta X' = A' \Delta X$$

$$A^{-1} = \begin{pmatrix} -\operatorname{sen}\phi \cos \Delta & -\operatorname{sen}\phi \operatorname{sen}\Delta & \cos \phi \\ -\operatorname{sen}\Delta & \cos \Delta & 0 \\ \cos \phi & \cos \phi \operatorname{sen}\Delta & \operatorname{sen}\phi \end{pmatrix}$$

Sistema de Coordenadas Esféricas Elipsoidales

Los sistemas de coordenadas elipsoidales están aproximadamente mas cerca de la superficie de la Tierra, y ellas facilitan una separación de la posición horizontal y la altura. Usualmente un elipsoide en rotación es achatado en los polos lo cual es creado por la rotación del elipsoide meridiano cerca de su eje meor b.

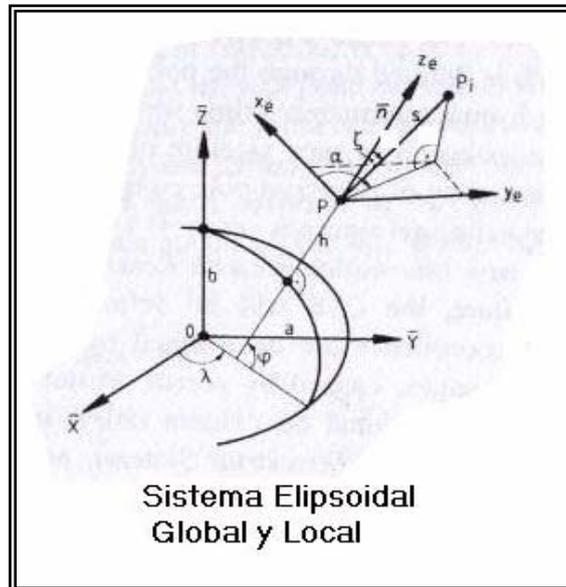
Los parámetros geométricos son:

$$\begin{array}{ll} \text{Semieje mayor:} & a \\ \text{Achatamiento} & f = \frac{a-b}{a} \end{array}$$

Alternativamente, la primera excentricidad numérica e es usada

$$e^2 = 2f - f^2 \quad ; \quad 1 - e^2 = (1 - f^2).$$

Una mejor aproximación en general de la tierra es un sistema elipsoidal global como lo muestra la figura siguiente:



Las coordenadas elipsoidales geográficas son:

- ϕ = latitud elipsoidal
- λ = longitud elipsoidal
- h = altura elipsoidal

Un sistema de coordenadas cartesianas X, Y, Z puede ser definido como el elipsoide

- ✘ Origen en el centro O del elipsoide
- ✘ Eje Z en dirección al polo norte elipsoidal (a lo largo del eje menor)
- ✘ Eje X en dirección al meridiano cero elipsoidal
- ✘ Eje Y completando el sistema de mano derecha.

La ecuación de transformación entre las coordenadas geográficas elipsoidales ϕ, λ, h y las coordenadas cartesianas X, Y, Z , es:

$$X = \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} (N + h) \cos \phi \cos \lambda \\ (N + h) \cos \phi \operatorname{sen} \lambda \\ (1 - e^2)N + h \operatorname{sen} \phi \end{pmatrix}$$

N es el radio de curvatura en la primera vertical

$$N = \frac{a}{\sqrt{1 - e^2 \operatorname{sen}^2 \varphi}} = \frac{a}{\sqrt{1 - f(2-f) \operatorname{sen}^2 \varphi}}$$

Una solución del problema inverso es

$$h = \frac{\sqrt{X^2 + Y^2}}{\cos \varphi} - N$$

$$\varphi = \arctan \frac{Z}{\sqrt{X^2 + Y^2}} \left(1 - e^2 \frac{N}{N + h} \right)$$

$$\lambda = \arctan \frac{Y}{X}$$

La ecuación puede ser resuelta solamente por iteración, porque ϕ y h también van en presenta el sentido de la mano derecha . La convergencia es referida desde $h < N$.

Un sistema elipsoidal local, unido a la vertical elipsoidal n en el punto de observación P, puede ser definido como:

$$n = \begin{pmatrix} \cos \varphi \cos \lambda \\ \cos \varphi \operatorname{sen} \lambda \\ \operatorname{sen} \varphi \end{pmatrix}$$

Con las especificaciones:

- ✘ Origen en el punto de observación P
- ✘ El eje Ze en la dirección de la vertical del elipsoide
- ✘ El eje Xe en dirección al norte (meridiano geodésico)
- ✘ El eje Ye en dirección al este, completando un sistema de mano izquierda.

La localización de un segundo punto P_i , en el sistema elipsoidal local, puede ser determinado por las siguientes características (coordenadas polares)

- ✧ Slant range S
- ✧ Azimuts elipsoidales α
- ✧ Direcciones elipsoidales o ángulos horizontales $\Delta\alpha$
- ✧ Ángulos zenitales elipsoidales ζ

Las coordenadas esféricas locales son s, α, ζ asignadas a las coordenadas cartesianas locales

$$x_e = \begin{pmatrix} x_e \\ y_e \\ z_e \end{pmatrix} = s \begin{pmatrix} \cos\alpha \sin\zeta \\ \sin\alpha \sin\zeta \\ \cos\zeta \end{pmatrix}$$

Para la transformación de diferencias de coordenadas del sistema local al sistema global elipsoidal, nosotros obtenemos la relación

$$\Delta X = R_3(180 - \lambda)R_2(\varphi)S_2\Delta x_e = A\Delta x_e$$

CAPITULO VI

CARTOGRAFÍA

La Cartografía es la ciencia que estudia los distintos métodos y sistemas para obtener la representación plana de una parte o de la totalidad de la superficie terrestre, de manera que las deformaciones que se produzcan sean conocidas y se mantengan dentro de los límites fijados por las necesidades y aplicaciones a las cuales el mapa se destine. La representación plana tiene, sin embargo, el inconveniente de no por ser una representación exacta, a escala, de la situación relativa de los elementos de la superficie terrestre.

Problema de la Cartografía

Si la Tierra fuera plana como se creía en la antigüedad el problema de hacer mapas correctos sería fácil. Sin embargo como la Tierra es esférica, la tarea de representar una superficie esférica en una superficie plana es difícil y esta sujeta a una gran cantidad de errores.

Todos los mapas no son más que aproximaciones de la superficie terrestre. Según el método de proyección, los mapas incluirán ciertas características que serán buenas mientras otras no lo sean.

Necesidad de una Proyección

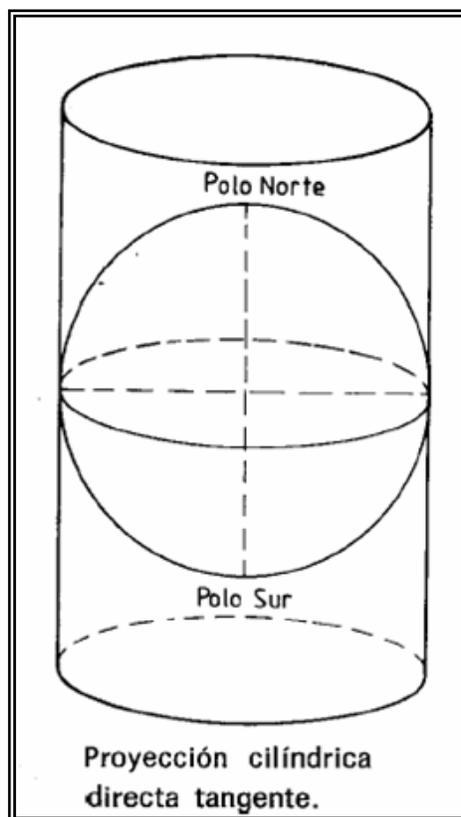
Lo único que nos proporciona una imagen fiel de la Tierra, cualquiera sea la extensión de la superficie a representar es un globo terráqueo; pero las dificultades que conlleva su construcción y manejo, unidas a las grandes dimensiones que habría que darles para obtener una representación precisa, ha obligado a desecharlos y en su lugar utilizar superficies planas de más fácil uso. La superficie plana es mucho más práctica para el usuario, pero los planos tienen el inconveniente de no poder ser una representación exacta a escala, de la situación relativa de los elementos de la superficie terrestre. Por tanto, la cartografía opta unas veces por la conservación de la representación, conservando el elemento lineal, angular o superficial que más interese a la finalidad que deba satisfacer el plano a construir, a costa de alterar en mayor o menor grado los otros elementos. Otras veces, admite la existencia de alteraciones en todos los elementos, pero imponiendo entonces la condición que sean mínimas.

Por tanto, podemos definir la cartografía como la ciencia que estudia los distintos métodos y sistemas para obtener la representación plana de una parte de la superficie o de la totalidad de la superficie terrestre, de manera que las deformaciones que se produzcan sean conocidas y se mantengan dentro de ciertos límites fijados por las necesidades y aplicaciones a los que se destine el mapa.

Las proyecciones más utilizadas son sistemas de **proyección por desarrollo**, en estos sistemas la Tierra se supone envuelta por una superficie desarrollable, como o cilindro, sobre cuya superficie se proyectan los diversos puntos de la Tierra.

Proyección Cilíndrica

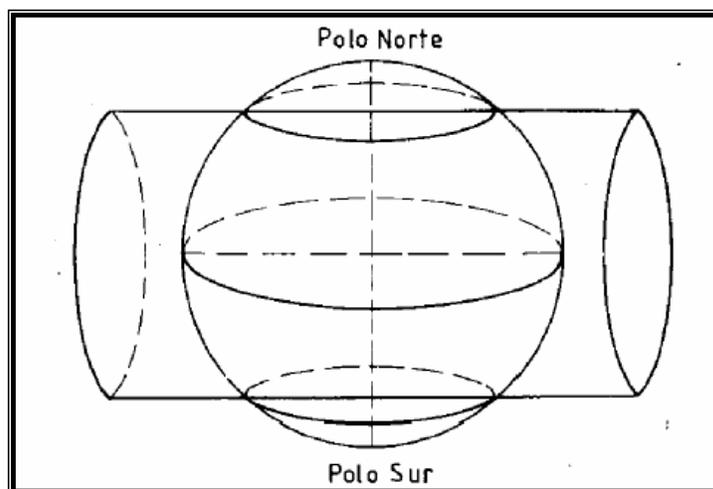
En el sistema de **proyección cilíndrica**, la esfera se supone envuelta por un cilindro de revolución cuyo eje coincide con un diámetro de la Tierra, por ejemplo el diámetro polar.



La proyección cilíndrica tiene como principal defecto, aumentar las dimensiones lineales a medida que se alejan del ecuador, haciéndose máximo en las regiones polares.

Otro sistema utilizado, es la proyección cilíndrica, donde el eje del cilindro coincide con el Ecuador, entonces la **proyección** se denomina **transversa**, y fue definida por Mercator. El cilindro en cualquiera de los casos puede ser tangente o secante a la superficie esférica.

En la proyección Mercator, se desarrolla un cilindro tangente en el Ecuador. Por tanto los meridianos son rectas verticales y paralelos, cortando en ángulo recto a los paralelos cuyo espaciado aumenta progresivamente hacia los polos para asegurar la conformidad. La separación entre meridianos varía en la tierra con la latitud, un arco de paralelo a una latitud dada tiene el mismo desarrollo que en el Ecuador multiplicado por el coseno de la latitud y se estará introduciendo una deformación igual a la secante de la latitud si se representan como rectas paralelas los meridianos. Para que la proyección sea conforme habrá que introducir la misma deformación a lo largo de los meridianos.



Proyección cilíndrica transversa

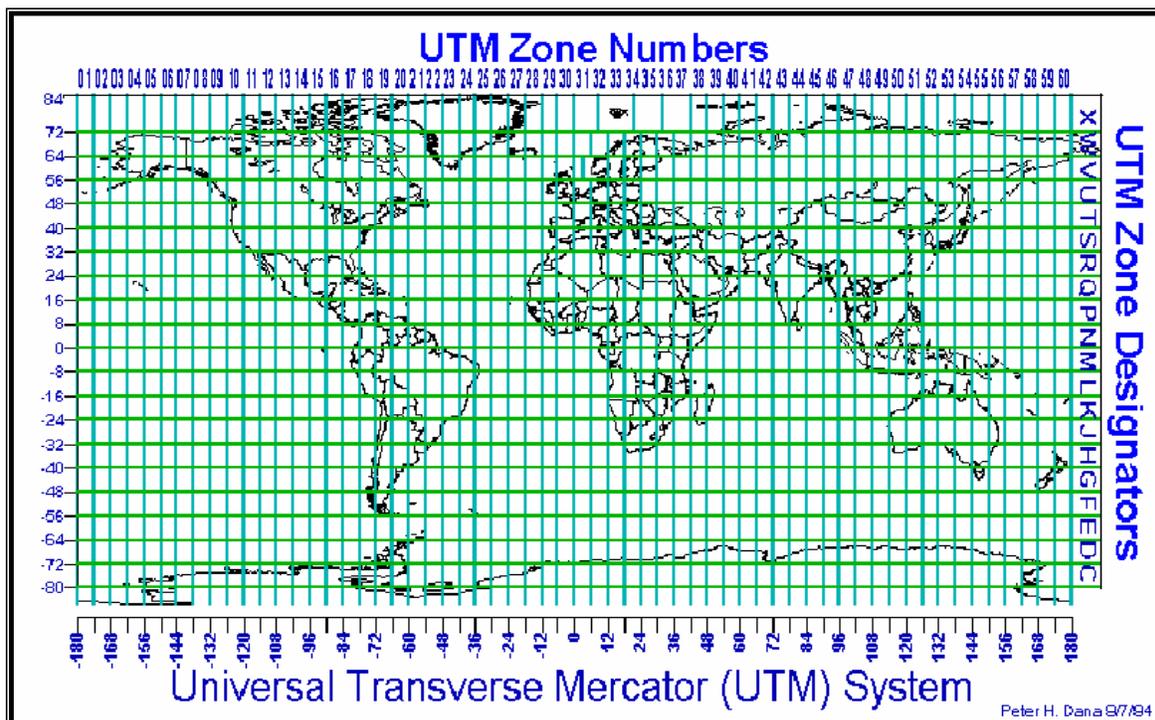
El interés de la proyección en navegación radica en que la línea recta que une dos puntos en la carta es la trayectoria sobre el globo terrestre con rumbo constante que corta a los meridianos bajo el mismo ángulo. Como datos anecdóticos, la cara visible de la Luna se representó en Mercator a 1:1000 000 en los años 60. En esta proyección, se cartografió detalladamente en 1972 el planeta Marte a escala 1:25000000 por el US Geological Survey, a partir de imágenes tomadas por el Mariner 9. Y también en esta misma proyección se cartografió Mercurio en 1974. Para realizar mapas conformes de zonas ecuatoriales es muy apropiada esta proyección.

Cuadrícula UTM

La cuadrícula UTM fue adoptada después de la 2ª Guerra Mundial, en 1947 por el ejército de los EE.UU, por ser el sistema que mejor se adaptaba a un empleo con carácter mundial, y la designaron con el nombre del que inventó la proyección Mercator, UTM11 (Universal Transverse Mercator). En el año 1954, la Asociación Internacional de Geodesia recomendaba el empleo de la proyección UTM para formar la cartografía de todo el mundo. Lo bueno de la cuadrícula UTM es la facilidad de su uso. Es sencillo medir coordenadas en una carta del INEGI o de otro país, sin necesidad de la ayuda de una regla. Sin embargo, hay elementos de la cuadrícula UTM que requieren más explicación, como por ejemplo, el origen del número de zona y de las letras para la zona.

Mercator es la versión latina del nombre holandés (flamenco) Kraemer. Fue quien inventó la proyección que lleva su nombre, en el siglo XVI cuando el latín era la lengua universal de la ciencia, y quedó su nombre así identificado para la posteridad.

Ahora bien, la cuadrícula UTM divide el planeta Tierra entre latitud 84° N y 80° S en 60 zonas, $360^{\circ}/60 = 6^{\circ}$, por tanto cada una de ellas es de 6° de amplitud. La zona 1 comienza en longitud 180° W, que es lo mismo que 180° E, de acuerdo a como se muestra en la Figura

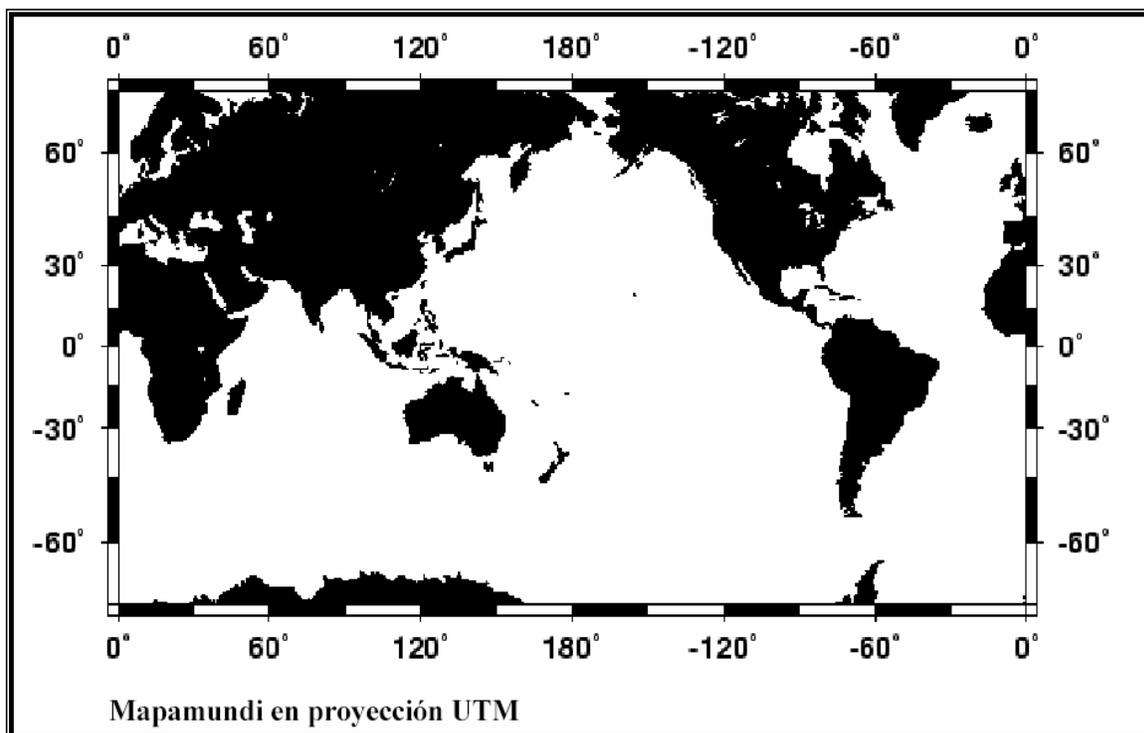


El número de zona aumenta en una unidad por cada 6° de intervalo, hasta cubrir toda la circunferencia y alcanzar la última zona, la número 60. Como cada zona representa una zona aplanada de la esfera terrestre, sufre una deformación y, por eso, las coordenadas UTM son llamadas falsas coordenadas, distinta de la cuadrícula de latitud y longitud, que se corresponde con coordenadas geográficas.

Cuadrícula UTM se constituye de la siguiente forma:

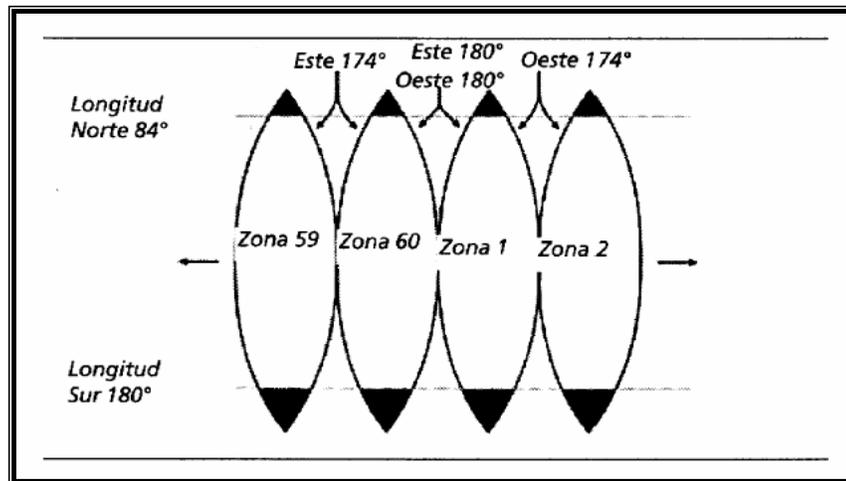
La Tierra entre las latitudes 84° N y 80° S está dividida en 60 zonas o husos de 6° de Longitud, numerados de 1 a 60 desde el meridiano de Greenwich de forma que el meridiano 0° separa los husos 30 y 31. A su vez, cada Huso se divide en Zonas de 8° de Latitud y cada franja es nombrada con una letra. Las zonas polares se representan en proyección estereográfica (Universal Polar Stereographic, UPS). Las coordenadas vienen dadas en **metros** y no en pies, a pesar de ser una proyección desarrollada por norteamericanos.

La proyección transversa de Mercator proporciona una cuadrícula uniforme para toda la Tierra, pero los mapas no cubren áreas de la zona Polar Norte ni Polo Sur. En efecto, a partir del 84° Norte y 80° Sur de latitud, estas zonas se representan mediante la proyección Estereográfica Polar Universal (UPS).

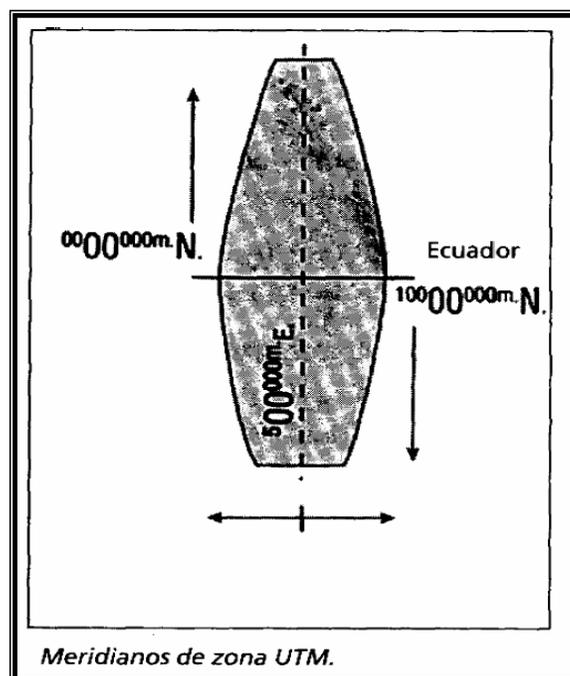


Mapamundi en proyección UTM

Cada zona UTM tiene líneas verticales y horizontales de referencia, las coordenadas X (eastings) se miden a partir de la línea vertical central de la zona, llamado meridiano de zona. Por tanto, cada zona de 6° está directamente dividida en dos mediante este meridiano.



La zona 1 tal como se muestra en la figura, está limitada por el meridiano de 180° a la izquierda y el de 174°W a la derecha.

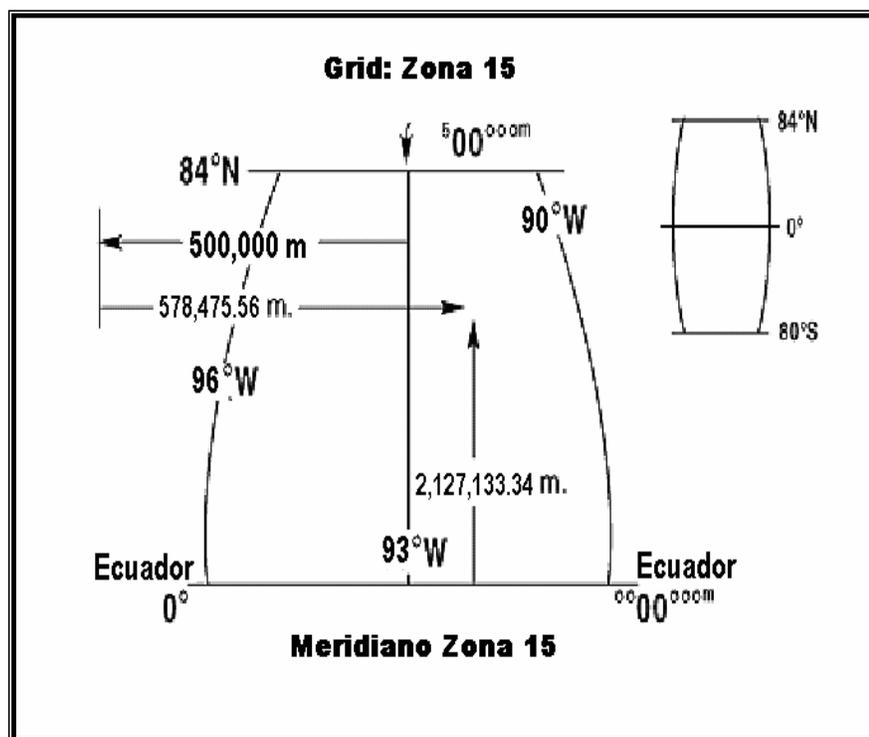


El meridiano central de cada zona va siempre etiquetado como 500 Km o sea 500000 m ., que se representan en las cartas como $500,000\text{ E}$. Hacia el Este del meridiano nos dará un valor superior a $500,000\text{ m}$, mientras que hacia el Oeste (W) los valores disminuyen, por lo cual el valor de la coordenada X (eastings) nos revelará la distancia en metros desde el meridiano central. Así por ejemplo, $502\ 150$ significa que estamos a $2.150, 2,15\text{ Km}$. al este del falso meridiano, ya que es mayor que $500,000$. Por otro lado, $485,500$ representa la distancia $500000 - 485,500 = 14,500\text{ m}$ al W del meridiano central.

Por tanto, las coordenadas aumentarán a medida que se desplace usted hacia el Este y disminuirán si se desplaza hacia el Oeste.

Las coordenadas al sur del ecuador definen también la distancia a éste, pero aquí **el ecuador tiene un valor de $10,000,000$ ($10,000,000\text{ N}$)**. El punto por ejemplo $6,197,000\text{N}$ se encuentra a $10,000,000 - 6,197,000 = 3,803,000\text{ m}$ al sur del ecuador. Las coordenadas válidas para el hemisferio sur estarán comprendidas entre $1,110,400\text{ N}$ en el extremo más al sur y $10,000,000\text{ N}$ en el ecuador.

La figura muestra el rango de longitud para la zona 15, 6° entre 96° W y 90° W y el falso Este se toma al medio del intervalo o sea 93° W , cuyo valor es 500 Km . o sea $500\ 000\text{ metros}$. **Meridiano de la zona 15.**



Las coordenadas hacia el norte, se miden siempre desde el ecuador, que es la línea horizontal de referencia en cada zona. El valor asignado en el ecuador es 0000 para el Hemisferio Norte y para no tener números negativos, hacia el hemisferio Sur, se arbitró *10,000 Km.* o sea *1, 000,000 S* para las posiciones hacia el Sur del ecuador. Por tanto, hacia el Norte del ecuador, una coordenada al Norte es simplemente la distancia sobre el ecuador, una coordenada *5, 897,000 N* significa que el punto está situado *5, 897,000 m* al norte del ecuador. Hay que tener presente que cada zona UTM es de hecho una proyección diferente que usa un sistema diferente de coordenadas, o sea que el sistema es un sistema rígido o inflexible. El origen de las abscisas se sitúa *500,000 m* al oeste del meridiano central de cada Huso, por tanto **habrá 60 puntos en todo el mundo con las mismas coordenadas UTM.**

CAPITULO VII

SISTEMA DE POSICIONAMIENTO GLOBAL (GPS)

Introducción

GPS es la abreviatura de NAVSTAR GPS. Este es el acrónimo en Inglés de **NA**avigation **S**ystem with **T**ime and **R**anking **G**lobal **P**osition **S**ystem (Sistema de Posicionamiento Global con Sistema de Navegación por Tiempo y Distancia).

El GPS ha sido respuesta para una de las incógnitas más antiguas que se ha planteado el hombre: al preguntarse ¿En que lugar de la Tierra me encuentro? Durante muchos siglos el hombre resolvió este problema empleando el Sol y las estrellas. Estos métodos cumplían su cometido dentro ciertos límites, pues el Sol y las estrellas no podían ser observados cuando el cielo estaba nublado.

Después de la Segunda Guerra Mundial, se hizo necesario que el Departamento de Defensa de los Estados Unidos de Norteamérica encontrara una solución al problema de determinar una posición absoluta y exacta. Durante los siguientes 25 años, se llevaron a cabo muy diversos proyectos y experimentos con este fin, entre los que se encuentran los sistemas Transit, Timation, Loran, Decca, etc. Todos determinaban la posición, pero continuaban siendo muy limitados en cuanto a precisión y funcionalidad.

El sistema GPS fue concebido en la década de los sesenta y representó la consolidación de otros proyectos para la navegación; inició su desarrollo bajo los auspicios de la U.S. Air Force. Pero fue a partir de 1974 cuando otros cuerpos militares de EEUU aunaron esfuerzos y rebautizaron el proyecto con el nombre NAVstar Global Position System. Este concepto prometía satisfacer todos los requerimientos del gobierno de los Estados Unidos, principalmente determinar (en cualquier momento y bajo cualquier condición atmosférica), una precisión precisa en cualquier punto de la superficie terrestre.

El sistema de Posicionamiento Global consiste en un conjunto de 24 satélites que circundan la Tierra y envían señales de radio a su superficie, para brindar al usuario una posición precisa.

El GPS fue diseñado originalmente para emplearse con fines militares, en cualquier punto de la superficie terrestre. Poco tiempo después de presentarse las propuestas originales de este sistema, resultaba claro que el GPS también podía ser utilizado en aplicaciones civiles.

Las dos primeras aplicaciones principales de tipo civil fueron para la navegación y topografía. Hoy en día tiene un alto rango de aplicaciones.

Los rusos en 1976 iniciaron la implementación de su propio sistema de navegación satelital, llamado GLONASS (*GLObal NAVigation Satellites System*). El sistema, también diseñado con fines militares, reservó un subconjunto de señales sin codificar para las aplicaciones civiles. Actualmente la responsabilidad del sistema es de la Federación Rusa. De los 24 satélites, distribuidos en tres planos orbitales inclinados 64.8° a 19100 Km. de altitud y periodo 11 h. 15 min. sólo funcionan 14.

En junio de 2003 la Agencia Europea del Espacio inicio el programa GALILEO, lanzando al espacio el primer satélite del sistema, el cual constará de 30 satélites y está previsto completar el programa para el 2008. El sistema GALILEO será compatible con el sistema norteamericano.

La navegación con GPS es extraordinaria, pero tiene sus limitaciones que debemos conocer. Así las radioseñales emitidas por los satélites no pueden penetrar una vegetación muy espesa o densa, rocas, edificios o accidentes geográficos. Por tanto, el receptor GPS no funcionará en selvas o bosques frondosos, en valles estrechos o entre rascacielos de una gran ciudad. Además, a pesar de que el sistema de posicionamiento global está diseñado para dar una cobertura total, algunas áreas remotas, a ciertas horas del día pueden tener una cobertura de tan sólo el mínimo de 4 satélites necesarios para tener una descripción de su ubicación sobre el terreno. Si la antena del receptor GPS no tiene suficiente sensibilidad para captar las señales de los satélites disponibles, no será capaz de obtener su posición en el planeta Tierra. Por ello se deben recurrir a las estaciones totales, los teodolitos, con distanciómetros, para realizar levantamientos topográficos, porque aún con la mejor y más moderna tecnología pueden surgir inconvenientes, y los viejos instrumentos y técnicas nos van a permitir resolver los problemas.

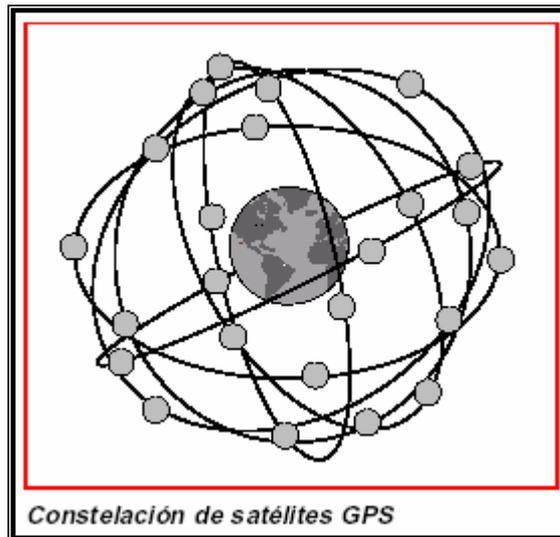
Señal GPS

El sistema GPS comprende tres segmentos diferentes:

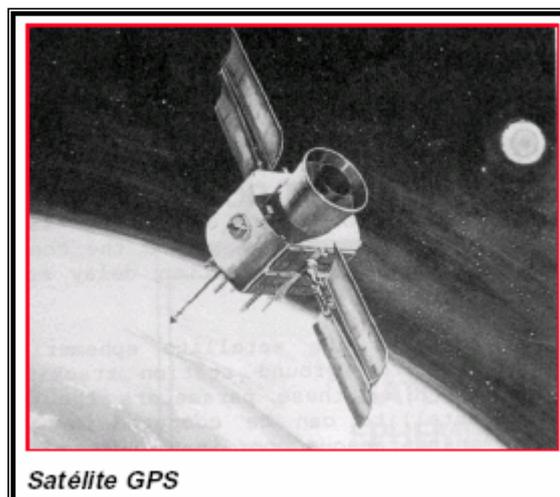
- ✘ **Segmento espacial:** satélites que giran alrededor de la Tierra
- ✘ **Segmento de control:** formado por estaciones ubicadas cerca del ecuador terrestre para controlar a los satélites.
- ✘ **Segmento de usuarios:** cualquiera que reciba y utilice las señales GPS.

Segmento espacial

El segmento espacial consiste en 24 satélites que giran en orbitas ubicadas aproximadamente a 20,200 Km y un periodo de 12 horas. El segmento espacial esta diseñado de tal forma que se pueda contar con un mínimo de 4 satélites visibles por encima de 15° en cualquier punto de la superficie terrestre, durante las 24 horas del día. Para la mayoría de las aplicaciones, el número mínimo de satélites visible deberá ser de cuatro.



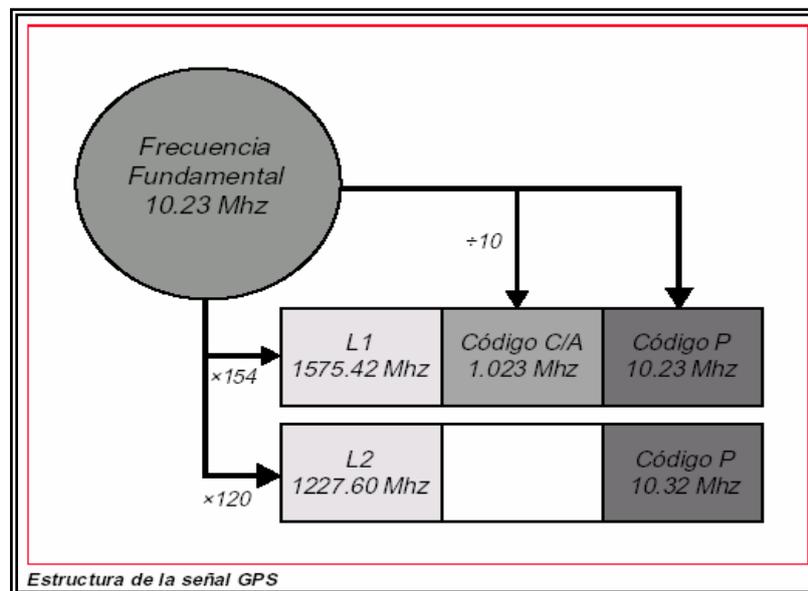
Cada satélite GPS lleva a bordo relojes atómicos precisos. Estos relojes operan una frecuencia fundamental de 10.23 MHz, la cual se emplea para generar las señales transmitidas por el satélite.



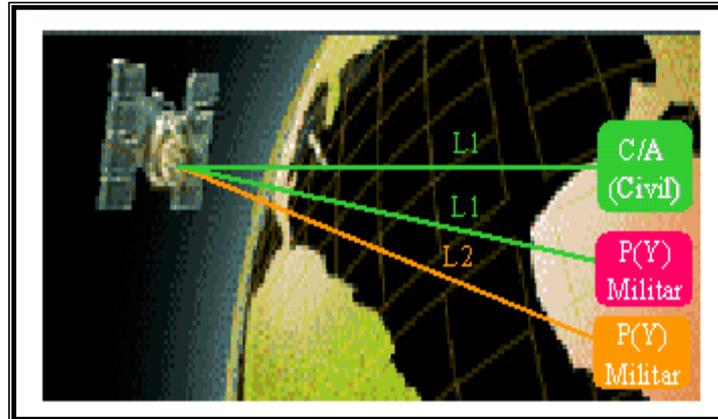
Los satélites emiten las señales utilizadas por los receptores GPS para calcular la posición. Cada satélite envía hacia la Tierra una onda de radio que transporta secuencias de números llamados **códigos**, el **C/A** (Coarse / Acquisition) y el **P** (Precise). El código C/A es accesible a todos los usuarios y modula sobre la portadora L1. En cambio el código P, se genera en forma similar y modula sobre las portadoras L1 y L2.

Dichas ondas portadoras se derivan de la frecuencia fundamental, generada por el reloj atómico muy preciso.

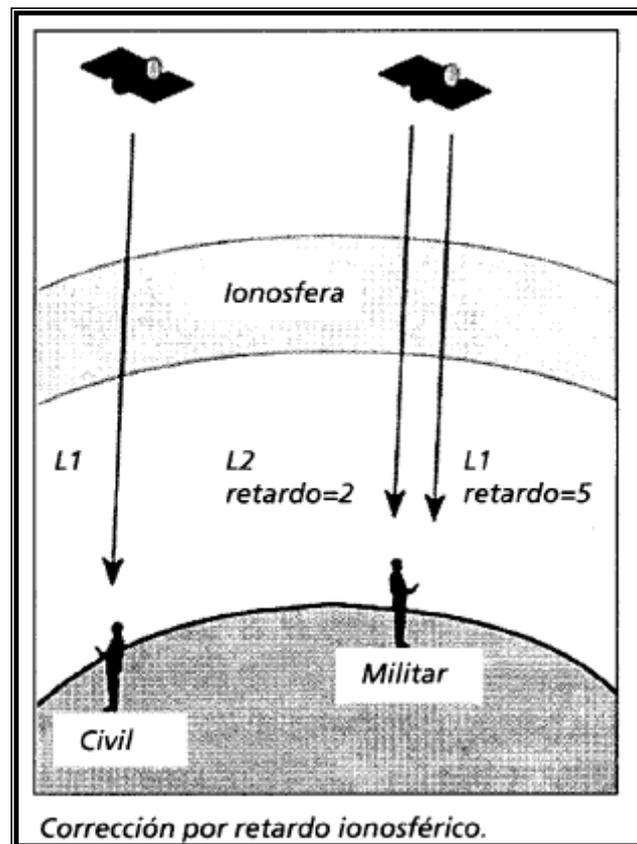
- ✘ La portadora L1 es transmitida a 1575.42 MHz.
- ✘ La portadora L2 es transmitida a 1227.60 MHz.



Además de los dos códigos el satélite envía un mensaje con: información del sistema, almanaque, estado de los satélites, etc. Los satélites GPS envían dos secuencias de números: una de precisión P y otra de adquisición común CA. Por tanto cada satélite tiene un único código P y CA, de manera que cada receptor puede tener la diferencia entre señales enviadas por diferentes satélites. El código P se repite una vez cada siete días, en cambio el código CA se repite en pulsos de microsegundos. El código P con su valor de modulación es el que proporciona un mayor grado de precisión a los receptores militares, siendo los receptores civiles incapaces de entenderlo o de utilizarlo. Los satélites emiten en dos frecuencias L_1 y L_2 , el código P es transmitido en ambas frecuencias, mientras que el código CA se transmite (modula) sólo en la frecuencia L_1 .



Como el código P se emite en dos frecuencias de radio diferentes, los receptores militares pueden medir y eliminar interferencias ionosféricas. Las ondas de radio al viajar por la atmósfera se “ralentizan” ligeramente (disminuye su velocidad) motivando que el receptor crea que los satélites están más lejos de lo que realmente están en realidad. El código P es enviado en dos frecuencias al mismo tiempo y debería llegar a la misma hora, pero la ionosfera hace que el código P llegue antes con una frecuencia que con la otra.



Segmento de control

El segmento de control consiste de una estación de control maestra, 5 estaciones de observación y 4 antenas de tierra distribuidas entre 5 puntos muy cercanos al ecuador terrestre.

El segmento de control rastrea los satélites GPS, actualiza su posición orbital, calibra y sincroniza sus relojes.

Otra función importante consiste en determinar la órbita de cada satélite y predecir su trayectoria para las siguientes 24 horas. Esta información es cargada a cada satélite y posteriormente transmitida desde allí. Esto permite al receptor GPS conocer la ubicación del satélite.

Las señales de los satélites son leídas desde las estaciones: Ascensión, Diego y García y Kwajalein. Estas mediciones son entonces enviadas a la Estación de Control Maestro en Colorado Springs, donde son procesadas para determinar cualquier error en cada satélite. La información es enviada posteriormente a las cuatro estaciones de observación equipadas con antenas de tierra y de allí cargada a los satélites.



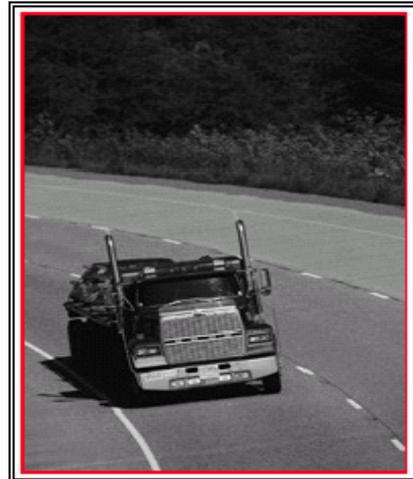
Las estaciones terrestres rastrean los satélites para verificar sus órbitas exactas y enviar toda la información orbital a cada satélite, de manera que pueda emitirse a receptores en tierra. El control terrestre sincroniza también los relojes atómicos que lleva cada satélite, la hora se la llama hora GPS, pero puede ser convertida fácilmente en Tiempo Universal Coordinado (UTC = Universal Time Coordinated).

Segmento de usuarios

El segmento de usuarios comprende receptores civiles y militares capaces de recibir las señales GPS, decodificarlas y usarlas para calcular la posición geográfica de la antena receptora. Existe un rango muy amplio de receptores que varía entre receptores simple frecuencia de navegación, de costo reducido, a receptores de muy alta precisión y alto costo, multifrecuencia (capta L1 y L2) y que hacen el máximo aprovechamiento de la información que transmiten los satélites.

Algunas aplicaciones típicas dentro del segmento de usuarios son: la navegación en tierra, ubicación de vehículos, topografía, navegación aérea y marítima, control de maquinaria, etc.

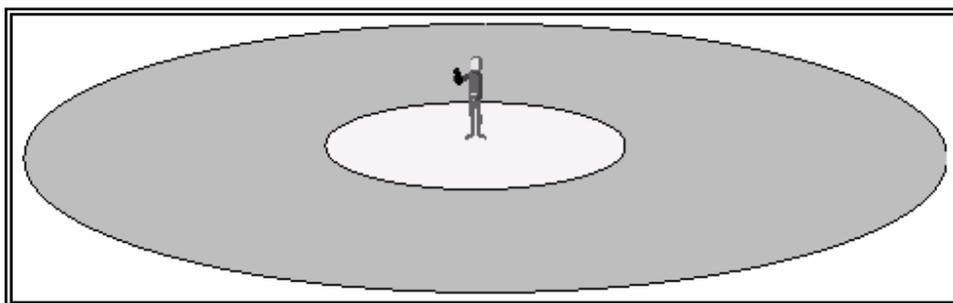




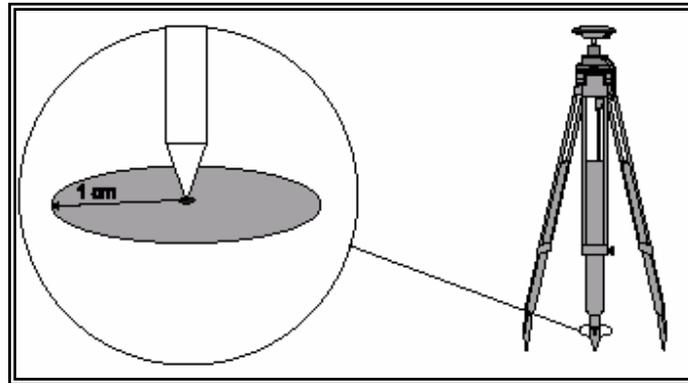
Funcionamiento del sistema GPS

Existen diferentes métodos para obtener una posición empleando GPS. El método a utilizar depende de la precisión requerida por el usuario y el tipo de receptor disponible. Estas técnicas pueden clasificarse básicamente en tres clases:

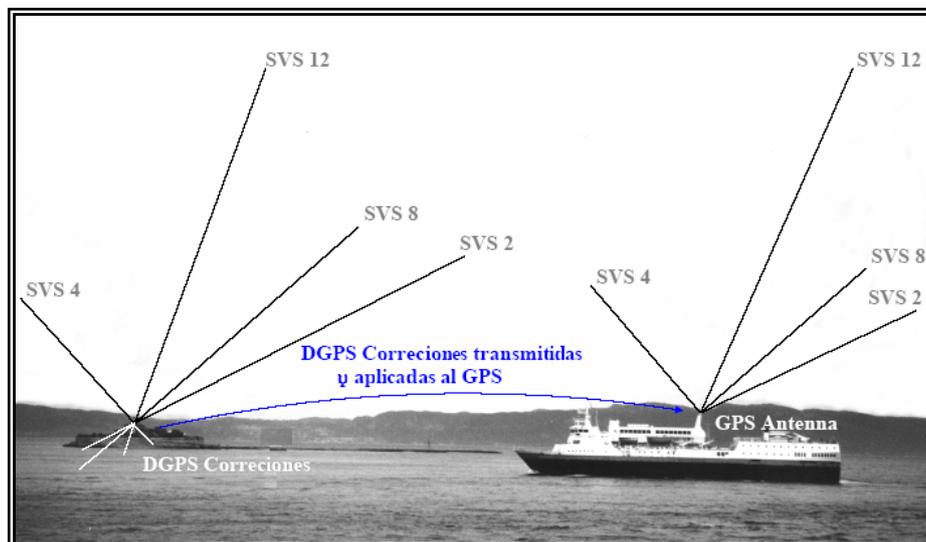
Navegación autónoma: Empleando solo un receptor simple. Utilizado por excursionistas, barcos en altamar y las fuerzas armadas. La precisión de la posición es mejor de 100 m para usuarios civiles y alrededor de 20 m para usuarios militares.



Posicionamiento Diferencial de Fase: Este método ofrece una precisión de 0.5-20 mm. Utilizado para diversos trabajos de topografía, control de maquinaria, etc.



Posicionamiento Diferencial Corregido: Mas comúnmente conocido como DGPS, el cual proporciona precisiones del orden de 0.5- 5 m. Utilizado para navegación costera, adquisición de datos para los SIG (Sistemas de Información Geográfica), agricultura automatizada, etc.



El principio básico de la medición de la distancia es el principio de “velocidad por tiempo”. El sistema GPS funciona tomando el tiempo que tarda una señal de radio emitida por un satélite hasta llegar al receptor, y de esa forma calcular la distancia. En términos sencillos, la señal GPS son códigos de tiempo que se usaran para calcular distancias desde los satélites hacia el receptor.

Distancia= Velocidad x tiempo

$$D = c \times dT$$

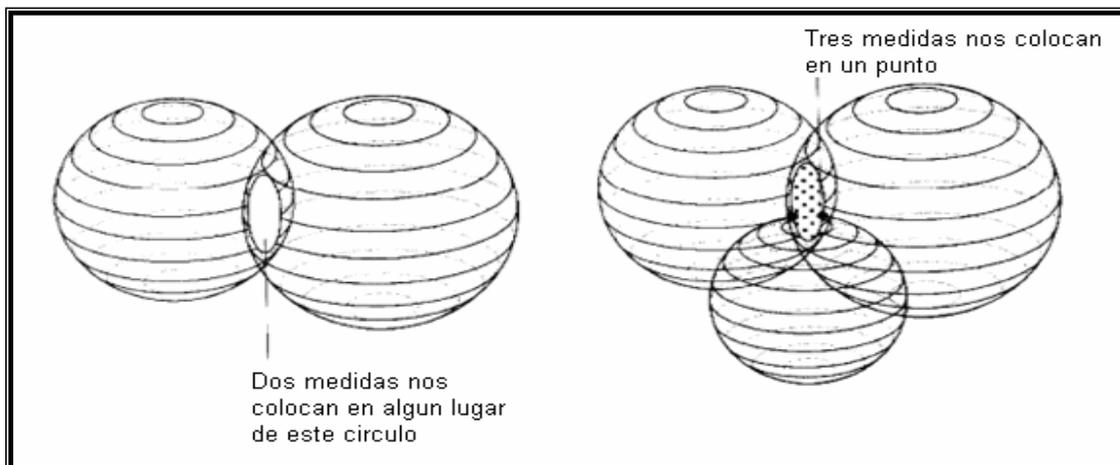
D = distancia satélite- antena

dT = retardo

c = velocidad de la luz

Pero en realidad como no conocemos el estado del reloj del receptor, esta distancia no es la distancia verdadera y se llama pseudo distancia. En efecto, sabiendo que las ondas de radio viajan a la velocidad de la luz $300,000,000 \text{ m/s}$, más precisamente **$299,792,458 \text{ m/s}$** , si se conoce el tiempo exacto en que salió la señal del emisor y el tiempo de llegada al receptor, se puede calcular por diferencia el tiempo de viaje de la señal y por ende la distancia. De aquí se deduce que los relojes deben ser bastante precisos en tiempos pequeños, porque la señal de un satélite que esté perpendicular al receptor sólo tarda $6/100$ de segundo en llegar.

Para poder calcular el tiempo de viaje de la señal de radio, tanto el satélite como el receptor generan códigos sincronizados; esto es que ambos generan el mismo código al mismo tiempo. Entonces cuando llega una onda al receptor este determina el tiempo transcurrido desde que este generó el mismo código, la diferencia de tiempo es lo que tardó la onda en llegar. Tanto el satélite como el receptor generan un juego de códigos digitales que responden a un código binario. Este juego de códigos digitales llevan el nombre de **pseudo-random** (pseudo-aleatorios) y están diseñados de forma tal que puedan ser fácilmente comparados, en forma rápida y sin ambigüedades. La frecuencia **pseudo-aleatorio** se repite en el orden de los milisegundos. Como ya se señaló, la luz viaja a casi $300,000 \text{ Km/s}$ lo cual implica que si los relojes del satélite y del receptor están desfasados tan sólo $1/100$ segundo, las medidas de distancia tendrían un error de $3,000 \text{ Km}$. Este problema se resolvió utilizando la medición desde un cuarto satélite y mediante trigonometría se puede localizar un punto con tres medidas exactas y que cuatro o más medidas imperfectas pueden eliminar la falta de sincronización del tiempo.



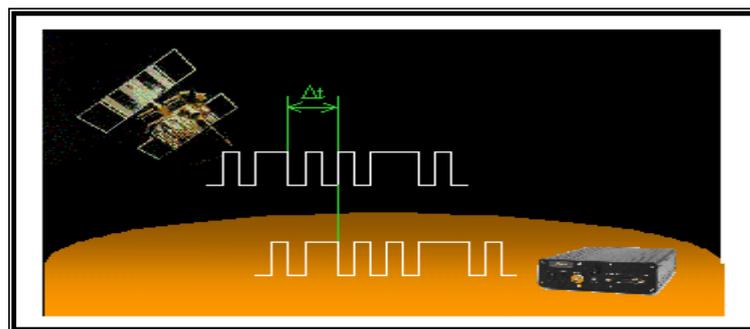
Las computadoras en los receptores están programadas para que en el caso que obtengan una serie de medidas que no puedan realizar la resección (intersección) en un único punto, reconozcan que hay algún error y asuman que su reloj interno está desfasado.

El funcionamiento del Sistema se monitorea a través de un sistema de control, el cual consiste de una estación de control master localizada en Colorado Springs, EEUU, 5 estaciones de monitoreo repartidas por el mundo, y 3 antenas. A través del procesamiento de la información en la estación de control master se calculan las efemérides y parámetros de los relojes de los satélites NAVSTAR. La información sobre efemérides y relojes son periódicamente transmitidas en forma de mensajes de navegación a los satélites desde las antenas en la Tierra, para su transmisión posterior desde los satélites a los usuarios. El segmento de control también tiene a cargo el funcionamiento apropiado de los satélites.

Los equipos receptores constan básicamente de una antena, un receptor, capacidad para procesamiento de señales y almacenamiento de datos. La señal de radio transmitida por cada satélite es recibida por el equipo conociendo el código de la señal PRN (ruido pseudoaleatorio), obteniendo de esta manera la información de la pseudodistancia y detectando el mensaje de navegación. La información obtenida de 4 satélites permite calcular la posición tridimensional, la velocidad y la hora.

Cálculo de la pseudodistancia

Los receptores usan la interferometría, retrasando un replica del código PRN de los satélites almacenados en la memoria y luego lo compara con el código de entrada. En una sincronización precisa, el código desaparece dejando sólo la onda portadora. Asimismo, la cantidad de retardo puede convertirse en una medición de distancia entre el satélite y el receptor. A esta distancia se le conoce como medición de pseudodistancia ya que tiene un margen de error, principalmente debido a error en la sincronización del reloj del receptor. Para la medición de estas pseudodistancias, todos los receptores emplean el código C/A; el cual no posee restricciones para su uso.



El código C/A se transmite con una frecuencia de 1.023 Mhz y se repite cada 1/1000 de segundo. Considerando que la señal viaja a la velocidad de la luz, cada elemento del código tendrá una longitud aproximada de 300 metros. Las fracciones se pueden estimar en el orden del 1% de la unidad de medida o + 3 metros. Esto es adecuado para Navegación pero no para Geodesia.

El código P se genera para un ciclo de 267 días y se transmite con una frecuencia de 10.23 Mhz, por lo que cada elemento del código tiene una longitud aproximada de 30 metros. Su precisión es 10 veces mayor que el código C/A, es decir, de unos 30 cms. En cada satélite se graba una porción de una semana del código P total. Este código está destinado al uso militar, por lo cual se dificulta descifrarlo con el objetivo de evitar que usuarios no autorizados hagan uso de él o generen intencionalmente interferencias. Así es como actualmente este código se oculta a través de un código denominado Y.

Posición del receptor

Las mediciones de pseudodistancia se utilizan para localizar la posición del receptor en el espacio. Si el receptor usara un reloj atómico sincronizado con los relojes atómicos de los satélites, se podría intersectar las mediciones de distancias a 3 satélites, cuyas posiciones son obtenidas por los datos de las efemérides, y así determinar la posición (X, Y, Z) del receptor. Debido a que se usan distintos relojes, es necesario un cuarto satélite para que el reloj del receptor pueda ser sincronizado con la hora GPS, y de esta forma se pueda resolver el error del receptor.

Las ecuaciones utilizadas para resolver este problema son las siguientes:

$$R_{j,i}(t) = \rho_{j,i}(t) + c \Delta\delta_{j,i}(t)$$

$$\rho_{j,i}(t) = \sqrt{((X_j(t) - X_i)^2 + (Y_j(t) - Y_i)^2 + (Z_j(t) - Z_i)^2)}$$

$$\delta_j(t) = a_0 + a_1(t - t_c) + a_2(t - t_c)^2$$

donde:

$R_{j,i}(t)$: es la pseudodistancia medida entre el sitio de observación i y el satélite j .

$\rho_{j,i}(t)$: es la distancia geométrica entre el satélite y el punto de observación

c : es la velocidad de la luz.

$\Delta\delta_{j,i}(t)$: representa el desfase en tiempo GPS entre el satélite y el receptor.

Los términos a_0 , a_1 y a_2 corresponden a coeficientes polinomiales transmitidos en el mensaje de navegación y que representan información del reloj del satélite con respecto al tiempo de referencia t_c , y que permite relacionar las observaciones hechas una época t .

Debido a que existen 4 incógnitas X_i , Y_i , Z_i y *tiempo* será necesario 4 ecuaciones para resolver la posición del receptor. La solución como se observa corresponden a coordenadas cartesianas geocéntricas, las que pueden ser transformadas a coordenadas geodésicas.

Técnica diferencial

Los receptores GPS de mapeo sirven también para establecer el posicionamiento diferencial (DGPS). Las posiciones diferenciales pueden calcularse en tiempo real o mediante técnicas de post-procesamiento. No hay que confundir esta técnica de posicionamiento con la técnica de procesamiento de la línea base. El posicionamiento diferencial emplea pseudodistancias procedentes de dos receptores para calcular y corregir la localización de un receptor. El procesamiento topográfico de la línea base emplea observables de la fase portadora para calcular la localización en relación a otro. El posicionamiento diferencial utiliza la posición de los puntos obtenidos de las pseudodistancias del código C/A o del as de código P y aplica correcciones a esa posición. Estas correcciones son generadas por un receptor referencia y las utiliza un segundo receptor para corregir su posición generada internamente. Puesto que el receptor de referencia "conoce" su posición (ocupa una estación topográfica de posición conocida), calcula los errores entre la posición conocida y su posición calculada, y pasa las diferencias (o correcciones) al otro receptor. Se supone que los dos receptores sufren (aproximadamente) los mismos errores de magnitud de geometría y de tiempo, y que la mayoría de los errores comunes se cancelan empleando esta técnica de corrección. La precisión del posicionamiento diferencial utilizando pseudodistancias de código C/A es generalmente del orden de submetro a 3 metros, y las fórmulas que expresan este cálculo son las siguientes:

$$R_{j,A}(t_0) = \rho_{j,A}(t_0) + \Delta\rho_{j,A}(t_0) + c \delta j(t_0) - c \delta A(t_0)$$

En esta primera expresión se obtiene la pseudodistancia a una época t_0 . El error en distancia está dado por $\Delta\rho_{j,A}(t_0)$. Debe notarse que $\rho_{j,A}(t_0)$ es conocido. La corrección en pseudodistancia para el satélite j referido a la época t_0 es obtenido por esta segunda fórmula:

$$\begin{aligned} PRC_j(t_0) &= -R_{j,A}(t_0) + \rho_{j,A}(t_0) \\ PRC_j(t_0) &= -\Delta\rho_{j,A}(t_0) - c \delta j(t_0) + c \delta A(t_0) \end{aligned}$$

Para una serie de observaciones a diferentes tiempos el valor de la corrección de la pseudodistancia $RRC_j(t_0)$ puede ser evaluada por diferenciación numérica. En esta expresión se observa la aproximación de esta corrección a una época t . El término $(t - t_0)$ tiene gran importancia en la precisión de la corrección.

$$PRC_j(t) = PRC_j(t_0) + RRC_j(t_0)(t - t_0)$$

La pseudodistancia para una estación remota B medida a una época t puede ser modulada mediante la siguiente ecuación.

$$R_{j,B}(t) = \rho_{j,B}(t) + \Delta\rho_{j,B}(t) + c\delta_j(t) - c\delta_B(t)$$

Aplicando la corrección a la pseudodistancia se obtiene

$$R_{j,B}(t)_{corr} = R_{j,B}(t) + PRC_j(t)$$

$$R_{j,B}(t)_{corr} = \rho_{j,B}(t) + (\Delta\rho_{j,B}(t) - \Delta\rho_{j,A}(t)) - (c\delta_B(t) - c\delta_A(t))$$

Se observa en esta última expresión que el error del reloj del satélite desaparece

$$R_{j,B}(t)_{corr} = \rho_{j,B}(t) - c\Delta\delta_{AB}(t)$$

Técnica diferencial por observación de fase

La obtención de la pseudodistancia mediante la observación en fase en la estación A para la época t_0 puede ser modelada por

$$\lambda\phi_{j,A}(t_0) = \rho_{j,A}(t_0) + \Delta\rho_{j,A}(t_0) + \lambda N_{j,A} + c\delta_j(t_0) - c\delta_A(t_0)$$

donde:

$N_{j,A}$ es la desconocida ambigüedad de fase.

La corrección por fase a la pseudodistancia en la época de referencia t_0 queda expresada por la siguiente fórmula.

$$PRC_j(t_0) = -\lambda\phi_{j,A}(t_0) + \rho_{j,A}(t_0)$$

$$PRC_j(t_0) = -\Delta\rho_{j,A}(t_0) - \lambda N_{j,A} - c\delta_j(t_0) + c\delta_A(t_0)$$

y la corrección de la pseudodistancia por fase en una época arbitraria t se calcula de la siguiente manera

$$PRC_j(t) = PRC_j(t_0) + RRC_j(t_0)(t - t_0)$$

La corrección por fase a la pseudodistancia por fase a un receptor remoto en una época t es obtenida de la siguiente manera:

$$\lambda \phi_{j,B}(t)_{corr} = \rho_{j,B}(t) + \lambda \Delta N_{j,AB} - c \Delta \delta_{AB}(t)$$

Método de las diferencias para la solución de la ambigüedad de la fase

El cálculo de la posición del receptor no implica únicamente el cálculo de los componentes de la línea de base. El programa de procesamiento ha de resolver también las ambigüedades del entero. Se debe recordar que la fase portadora continua está formada por una parte fraccionaria y una parte entera. El componente entero en la primera medición se desconoce y el procesador de la línea base debe resolverlo. De hecho, el procesador de la línea base debe resolver la parte entera cada vez que ocurra un deslizamiento de ciclo, ya que la fase portadora continua se restablece a su valor inicial. Por consiguiente, habrá muchas ambigüedades de entero que resolver durante una sección en terreno.

Se habla mucho del procesamiento de las líneas base GPS, especialmente respecto a cómo se realiza el procesamiento. En general, las observaciones, que son simplemente mediciones en fase portadora, se transforman en combinaciones lineales de las mediciones brutas para una mayor conveniencia y uniformidad. Los modelos matemáticos de estas mediciones se basan en la combinación de las mediciones en bruto entre los receptores y los satélites. Estas mediciones se conforman en varias combinaciones de fase portadora L1 y L2 además de pseudodistancias. Cada una de estas combinaciones tiene propiedades propias y exclusivas que ayudan a solucionar, modular o mitigar diversos parámetros, incluidos los efectos de la ionosfera y la troposfera, así como los rebotes de la señal (multipath).

El procesador emplea algoritmos de mínimos cuadrados para resolver las ambigüedades de longitud de onda enteras y la posición desconocida del receptor, utilizando una o más de estas combinaciones de mediciones. Muchos procesadores son también capaces de modelar los efectos de la atmósfera y otras fuentes de interferencia de la señal, aunque, para la mayoría de las aplicaciones topográficas, estas correcciones no son necesarias. A continuación se tratarán distintos modos de procesamiento, describiendo que hacen cada uno de ellos.

Diferencias simples (entre receptores): una diferencia simple se obtiene hallando la diferencia entre las mediciones adquiridas por dos receptores mientras observan el mismo satélite en una misma época en particular. Por lo tanto, las ambigüedades del entero asociadas con cada receptor se combinan entre sí. Si ocurre un deslizamiento de ciclo, el procesador tiene que recalcular este término entero combinado igual que en el modelo no diferenciado.

Las diferencias simples eliminan muchos errores comunes de los satélites tales como los errores de reloj de los satélites y, en gran parte, los errores orbitales y los retardos atmosféricos.

$$\lambda \phi_{1,AB} = \rho_{1,B} - \rho_{j,A} + c t_B - c t_A + \lambda N_{1,B} - \lambda N_{1,A}$$

Diferencias dobles: una diferencia doble se origina hallando la diferencia entre dos diferencias simples. Esto implica dos satélites y dos receptores. Por lo tanto, esta combinación de mediciones funde en una sola, cuatro mediciones independientes y cuatro ambigüedades del entero distintas. En este caso, el cálculo del valor del entero se hace más complejo porque cada ambigüedad del entero es ahora una combinación de dos satélites y dos receptores. Las diferencias dobles eliminan la mayoría de los efectos de la deriva de los relojes de satélite y receptor.

$$\lambda \phi_{1-2,AB} = \rho_{1-2,AB} + \lambda (N_{2,B} - N_{1,B} - N_{2,A} + N_{1,A})$$

Diferencias triples (entre satélite, receptor y hora): la diferencia triple combina dos diferencias dobles respecto a la hora (entre dos épocas). Utilizando este modelo desaparecen las ambigüedades del entero. Puesto que se supone que en un mundo perfecto no cambia la ambigüedad del entero, esta ambigüedad se cancela diferenciando entre dos épocas.

La diferenciación triple se emplea a menudo para encontrar deslizamientos de ciclos, puesto que éstos sí hacen que cambie la ambigüedad del entero. Por consiguiente, un gran salto en el valor de la diferencia triple significa que ha ocurrido un deslizamiento de ciclo.

Receptores GPS

Hay una gran cantidad de receptores GPS en el mercado y cada año se introducen nuevos modelos, con diferentes prestaciones y virtudes. Un receptor GPS podría asimilarse a una calculadora electrónica de navegación, pero hay elementos importantes comunes a todos los receptores, como son la sensibilidad de la antena, la precisión, los datum y las cuadrículas que maneje en el caso de los navegadores. La clave del receptor está en la antena, sin duda la parte más importante de un receptor. Poco importará el peso, cuántos canales tiene o de que otras prestaciones dispone, si su antena no puede detectar las señales de los satélites, el receptor no podrá empezar a calcular su posición.

Las antenas pueden ser internas o externas, estas últimas son necesarias si el receptor se usa dentro de un habitáculo, como por ejemplo una embarcación, el interior de un avión o un coche.

Las antenas externas son más sensibles que las internas y hacen posible captar señales de satélites en lugares en los que una antena interna no podría trabajar.

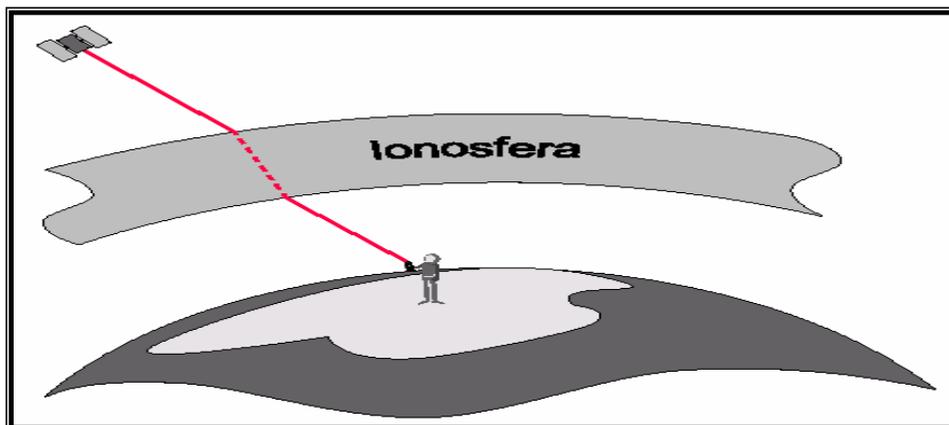
Fuentes de error

Existen diversas fuentes de error que degradan la posición GPS desde algunos metros en teoría, hasta algunas decenas de metros. Estas fuentes de error son:

1. *Retrasos ionosféricos y atmosféricos*
2. *Errores en el reloj del Satélite y del Receptor*
3. *Efecto Multitrayectoria*
4. *Dilución de la Precisión*
5. *Disponibilidad Selectiva (S/A)*
6. *Anti Spoofing (A-S)*

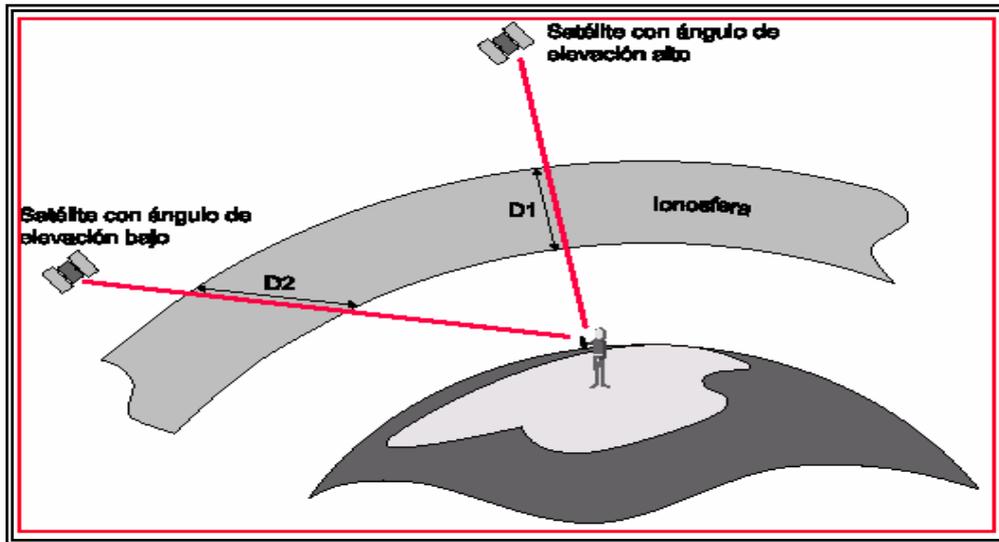
1. Retrasos ionosféricos y atmosféricos

Al pasar la señal del satélite a través de la ionosfera, su velocidad puede disminuir, este efecto es similar a la refracción producido al atravesar la luz un bloque de vidrio. Estos retrasos atmosféricos pueden introducir un error en el cálculo de la distancia, ya que la velocidad de la señal se ve afectada. (La luz solo tiene una velocidad constante en el vacío).



La ionosfera no introduce un retraso constante de la señal. Existen diversos tipos que influyen en el retraso producido por la ionosfera.

- a) *Elevación del satélite*: Las señales de los satélites que se encuentran en ángulo de elevación bajo se verán más afectadas que las señales que se encuentran en ángulo de elevación mayor. Esto es debido a la mayor distancia que la señal tiene que viajar a través de la atmósfera.



- b) *La densidad de la ionosfera esta afectada por el Sol:* Durante la noche, la influencia ionosférica es mínima. Durante el día, el efecto de la ionosfera se incrementa y disminuye la velocidad de la señal. La densidad de la ionosfera varía con los ciclos solares (actividad de las manchas solares). Los errores debidos a la ionosfera pueden ser mitigados empleando uno de los métodos siguientes:
- ✘ El primer método supone la toma de un promedio del efecto de reducción de la velocidad de la luz causada por la ionosfera. Este factor de corrección puede ser entonces aplicado a una serie de cálculos. Sin embargo, esto depende de un promedio y obviamente esta condición promedio no ocurre todo el tiempo. Por lo tanto, este método no es la solución óptima para la mitigación del error ionosférico.
 - ✘ El segundo método supone el empleo de los receptores de "doble frecuencia". Tales receptores miden las frecuencias L1 y L2 de la señal GPS. Es sabido que cuando la señal de radio viaja a través de la ionosfera, esta reduce su velocidad en una relación inversamente proporcional a su frecuencia. Por lo tanto si se comparan los tiempos de arribo de las señales, se puede estimar el retraso con precisión.
- c) *El vapor de agua también afecta la señal GPS:* El vapor de agua contenido en la atmósfera también puede afectar las señales GPS. En efecto, el cual puede resultar una degradación de la posición, puede ser reducido utilizando modelos atmosféricos.

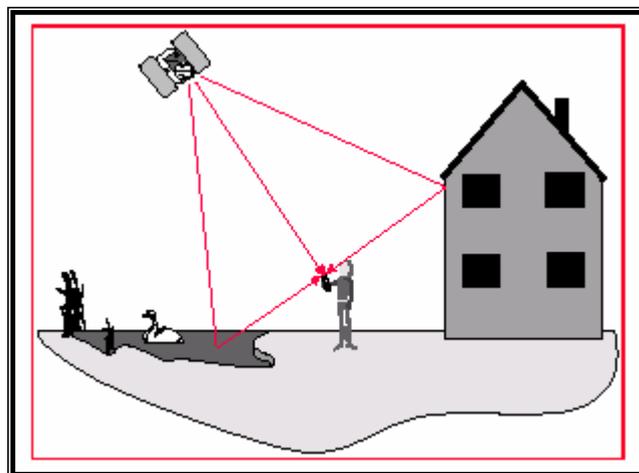
2. Errores en el reloj del Satélite y del Receptor

Aunque los relojes en los satélites son muy precisos. Algunas veces presentan alguna pequeña variación en la velocidad de la marcha y producen pequeños errores, afectando la exactitud de la posición. El Departamento Defensa de los Estados Unidos de Norteamérica, observa permanente los relojes de los satélites mediante el segmento de control y puede corregir cualquier deriva que pueda encontrar.

3. Efecto Multitrayectoria

El error multitrayectoria se presenta cuando el receptor esta ubicado cerca de una gran superficie reflectora, tal como un lago o un edificio. La señal del satélite no viaja directamente a la antenna, si no que llega primero al objeto cercano y luego es reflejada a la antenna provocando una medición falsa.

Este tipo de errores pueden ser reducidos utilizando la antena GPS especiales que incorporan un plano de tierra, el cual evita que las señales con poca elevación lleguen a la antena.

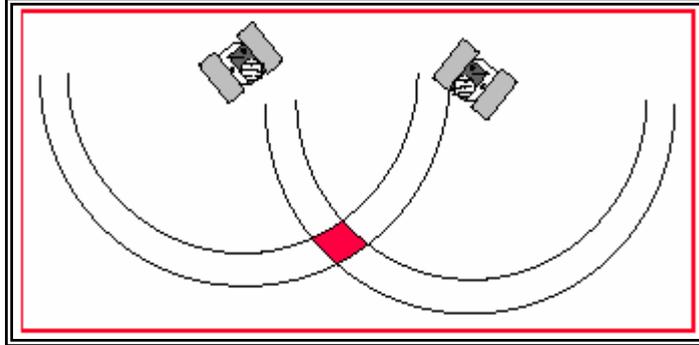


4. Dilución de la Precisión

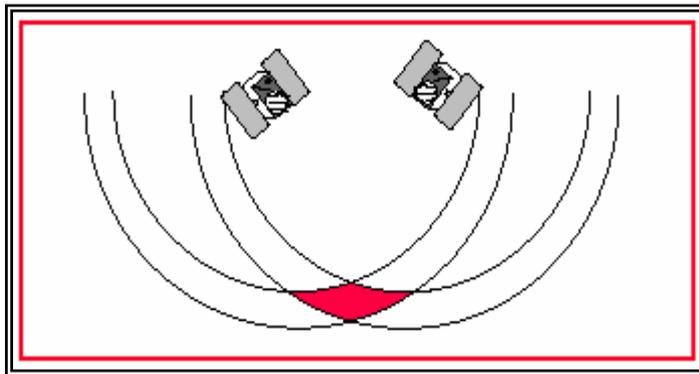
La Dilución de la Precisión (DOP) es una medida de fortaleza de la geometría de los satélites y esta relacionada con la distancia entre estos y su posición en el cielo. DOP puede incrementar el efecto de error en la medición de distancia a los satélites.

Este principio puede ser ilustrado mediante los siguientes diagramas:

Satélites con buena distribución, poca incertidumbre en su posición.



Satélites con mala distribución, alta incertidumbre en su posición.



La distancia hacia los satélites se ve afectada por los errores en la distancia previamente descritos. Cuando los satélites están bien distribuidos, la posición se puede determinar dentro del área sombreada del diagrama y el margen de error posible es menor.

Cuando los satélites están muy cerca unos de otros, el área sombreada aumenta su tamaño, incrementando también su incertidumbre en la posición.

Dependiendo de la dimensión, se pueden calcular diferentes tipos de Dilución de la Precisión.

- ✘ VDOP - Dilución Vertical de la Precisión. Proporciona la degradación de la exactitud en la dirección vertical.
- ✘ HDOP - Dilución Horizontal de la Precisión. Proporciona la degradación de la exactitud en la dirección horizontal.

- ✘ PDOP - Dilución de la Precisión en la Posición. Proporciona la degradación de la exactitud en posición 3D.
- ✘ GDOP - Dilución de la Precisión Geométrica. Proporciona la degradación de la exactitud en posición 3D y en tiempo.

El valor DOP más útil a conocer es el GDOP, ya que es una combinación de todos los factores. Sin embargo algunos receptores calculan el PDOP o HDOP, valores que toman en consideración a la componente del tiempo.

La mejor manera de minimizar efecto del GDOP es observar tantos satélites como sean posibles.

5. Disponibilidad Selectiva (S/A)

La Disponibilidad Selectiva es un proceso aplicado por el Departamento de Defensa de los Estados Unidos a la señal GPS. Tiene como finalidad denegar, tanto a usuarios civiles como potencias hostiles, el acceso a toda la precisión que brinda el GPS, sometiendo a los relojes del satélite a un proceso conocido como "dithering" (dispersión), el cual altera el tiempo ligeramente. Además, las efemérides (o trayectoria que el satélite seguirá), son transmitidas ligeramente alteradas respecto a las verdaderas. El resultado final es una degradación en la precisión de la posición.

5. Anti-Spoofing (A-S)

El efecto Anti-Spoofing es similar al efecto S/A, ya que ha sido concebido con la idea de no permitir que los usuarios civiles y las fuerzas hostiles tengan acceso al código P de la señal GPS, obligando a emplear el código C/A, el cual se aplica el efecto S/A. El efecto Anti-Spoofing encripta el código P en una señal conocida como Y. Solo los usuarios con receptores GPS militares (EEUU y sus aliados) pueden descifrar el código Y.

Los receptores militares son más precisos por que no utilizan el código C/A para calcular el tiempo que tarda en llegar la señal desde el satélite al receptor GPS. Únicamente ocupan el código P.

Precisión

El tema de la precisión está vinculado con los errores, existiendo varias fuentes de errores en la tecnología y vinculados especialmente con los receptores. La precisión razonable con los navegadores se obtiene para las coordenadas planas x, y, el valor z es totalmente descontrolado.

La precisión del GPS, con un solo receptor, oscila entre 20 a 10 metros según características del equipo receptor y algún otro detalle; se podría señalar la precisión típica en 15 metros, de un navegador. Se podrían establecer arbitrariamente tres o cuatro categorías de GPS, de menores a mayor precisión, navegadores, aptos para GIS, topográficos y geodésicos. La precisión especificada anteriormente, significa que en el 95% del tiempo se estará ubicado en un punto +/- un radio de 15 metros o menos en general, en otros en el 95% del tiempo usted estará ubicado en un punto +/- un radio de 2 metros. La degradación de la señal intencional que existió hasta el año 2000, era una degradación aleatoria, con una variación no uniforme, existen otras formas o variables que afectan la precisión de las medidas de posición de un punto sobre la Tierra, y la mejor manera de incrementar la precisión es a través del método diferencial (DGPS).

Básicamente existen dos formas separadas de realizar DGPS, uno a través de una estación base (otro receptor) fija en una posición de coordenadas conocidas, en **tiempo diferido** (post-procesamiento). La otra forma de realizar DGPS es a través de información en **tiempo real**, que puede provenir de un radio-faro por señal de FM u otra y otros sistemas muy actuales como el WAAS.

El sistema WAAS

La "Federal Aviation Administration" (FAA) implementó el programa WAAS para ser utilizado en el aterrizaje de los aviones y en la navegación aérea en general. La tecnología GPS no se ajusta a los requerimientos de seguridad y confiabilidad de las normas de circulación aérea. El sistema WAAS corrige los errores en las señales GPS debido a la ionósfera, los desajustes del tiempo y errores de la órbita de los satélites. A la fecha de escribir este artículo, WAAS no es un sistema aprobado por la FAA, sin embargo el sistema está disponible para los usuarios en Norteamérica navegantes, excursionistas y profesionales. El sistema está operacional en los EEUU y algunas zonas de América, pero se espera que esté disponible, en la medida que se integren estaciones a la red norteamericana, para el resto de América en la medida que se apruebe para la navegación aérea, como sistema confiable y certificado, lo cual se cumplió en este año 2003.

Como funciona el WAAS

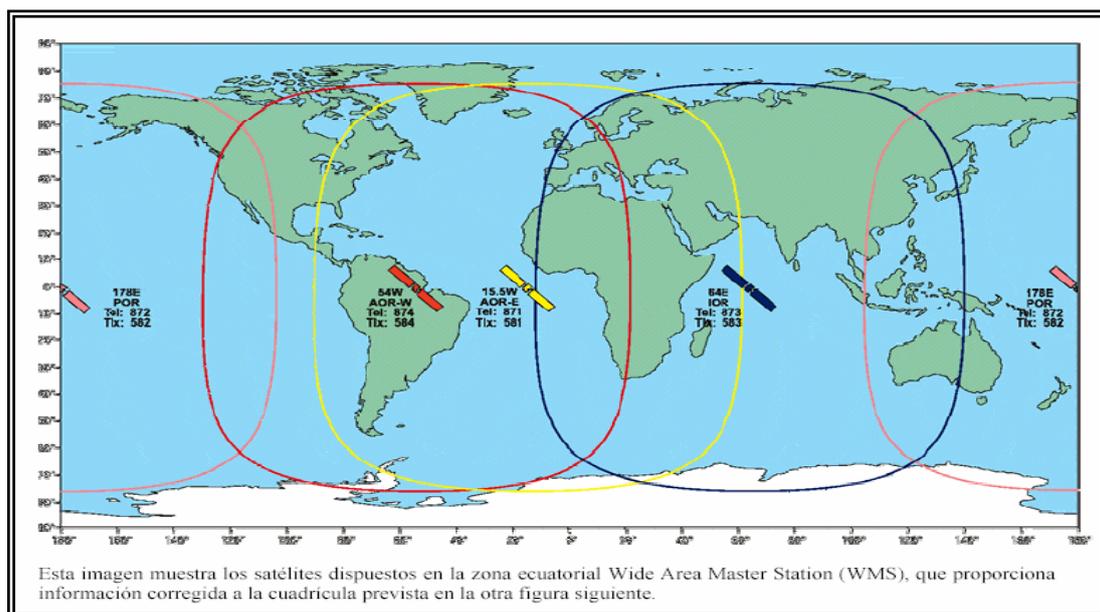
El sistema está integrado por aproximadamente 25 estaciones de referencia sobre la Tierra, distribuidas a lo largo y ancho de los EEUU, "monitoreando" la información satelital GPS, y creando a su vez mensajes de corrección. El sistema WAAS (Wide Area Augmentation System) es una forma de hacer GPS diferencial(DGPS) generando información corregida para la navegación aérea, pero que podrá ser utilizada por cualquier usuario, con posibilidad de canales adicionales en su receptor para acceder a esta información.

El sistema WAAS corrige los errores de la señal GPS, causados por la ionósfera y estratosfera, el error de tiempo y las efemérides, y aunque a la fecha de este artículo el sistema no está aprobado para la navegación aérea, el sistema es de uso común civil en los EEUU y Centro América.

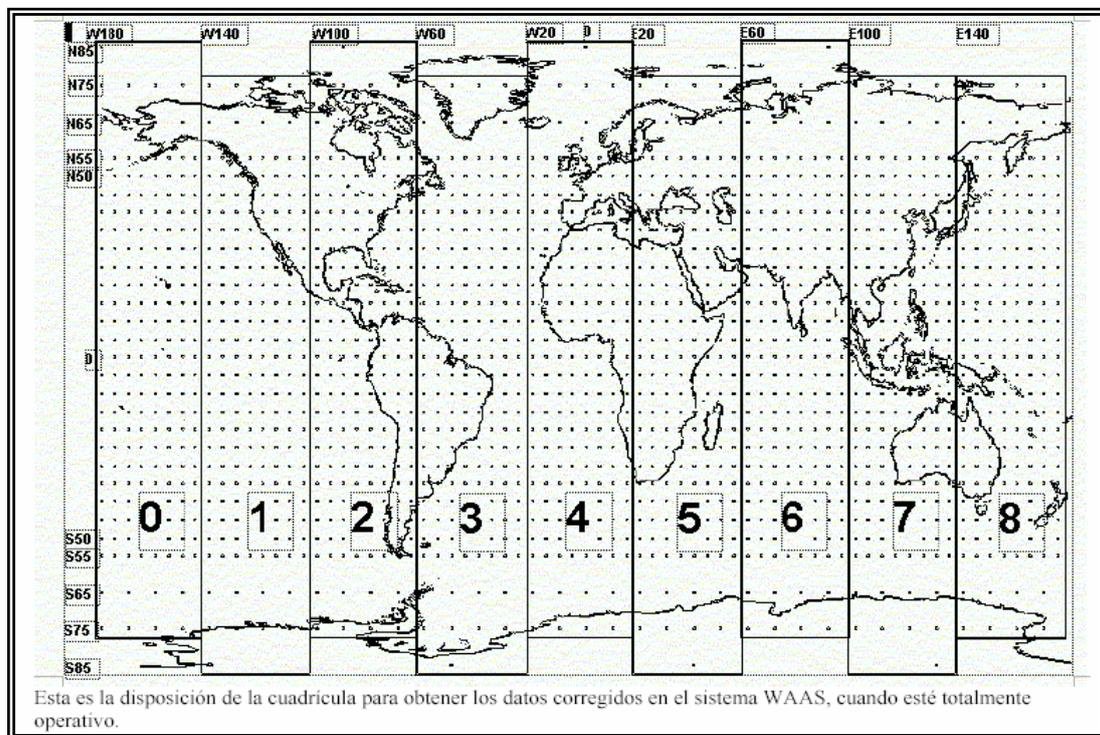
Cada estación de referencia terrestre "Wide Area Reference Station" (WRS) proporciona información corregida a una red satelital principal sobre el Ecuador "Wide Area Master Station" (WMS), la cual genera información de corrección para una red dispuesta alrededor del planeta.

En América del Norte, WAAS proporciona corrección de navegación de satélite, haciendo por lo menos cinco veces más precisos a los receptores con habilitación WAAS-. El sistema no necesita de una cuota de suscripción, como por ejemplo el sistema de radio-faro (RTCM). Están desarrollándose las actualizaciones del sistema que proporcionará en un futuro próximo, la exactitud dentro de un metro.

Los satélites geoestacionarios transmiten datos de corrección y datos de navegación al usuario del GPS, en la frecuencia común L1 (1575.42 MHz). En definitiva, el usuario del GPS usa el "enganche" de los datos WAAS para corregir sus datos de navegación recibidos, y es un nuevo sistema diferencial en tiempo real. El objetivo del sistema WAAS era por lo menos obtener un error menor a 7-metros en la horizontal, en la fijación de un punto. De hecho ya se alcanzó y superó ese objetivo, porque los receptores que pueden trabajar en este sistema, procesan errores menores a 5 metros y generalmente en el 95% del tiempo menor a 3 metros.



Esta imagen muestra los satélites dispuestos en la zona ecuatorial Wide Area Master Station (WMS), que proporciona información corregida a la cuadrícula prevista en la otra figura siguiente. En el continente asiático el sistema GPS-diferencial japonés es MSAS (Multi-Functional Satellite Augmenter System). En el continente europeo, se trabaja en un sistema de corrección, o sistema diferencial similar complementario, el sistema EGNOS. Para el sistema EGNOS (Euro Geostationary Navigation System) se fija el 2004 para el comienzo de su funcionamiento y representa el primer paso hacia el *sistema GALILEO* de Europa, el cual será el sistema de navegación que estará operativo totalmente hacia el 2008. En efecto, el sistema GALILEO será el sistema GPS europeo, que constará de 30 satélites más tres de repuesto, ubicados en una altura orbital algo más alta que el sistema norteamericano, algo así como 23,000 km.



Esta es la disposición de la cuadrícula para obtener los datos corregidos en el sistema WAAS, cuando esté totalmente operativo.

Un receptor GPS ubicado en una posición conocida de la Tierra calcula su distancia a un conjunto de satélites; la diferencia entre la posición calculada y la localización exacta del receptor constituye el error en la medida. Este error se transmite en un código predefinido (RTCM *Radio Technical Commission Maritime*) y cualquier usuario-receptor con capacidad de corrección diferencial puede acceder a él para corregir su posición.

Esta técnica elimina prácticamente los errores S/A siempre que el receptor diferencial esté próximo a la base emisora de la corrección. Las correcciones pueden enviarse desde una estación base propiedad de los usuarios, desde una estación base virtual (por ejemplo el servicio Omnistar) y vía estaciones de radio comerciales (Rasant). En todos estos casos el modo de operación del DGPS se denomina de área global (WADGPS) ya que el error debido a cada satélite se procesa de modo individual.

En resumen, DGPS usa dos métodos para corregir errores de posición:

- ✘ Correcciones en tiempo real
- ✘ Correcciones a posteriori

Las **correcciones en tiempo real** se usan especialmente en la navegación marítima y aérea. Las correcciones pueden ser *por posición* o *por tiempo*. Las correcciones por tiempo son más precisas y permiten su transmisión en un área mayor que las correcciones de posición. Cuando la corrección es transmitida a una gran área mediante satélites, recibe el nombre de WAAS. Para recibir la información de corrección por radio, el receptor debe ser capaz de entender la información en formato RTCM, o un convertidor para pasar la señal de corrección a RTCM y antena Loran-C para captar las señales de radio.

El DGPS en tiempo real, no está limitado a zonas costeras, hay muchas compañías privadas que transmiten datos de corrección en muchas partes de EEUU y Canadá, también en Sudamérica. Sin embargo hay que pagar una cuota anual o semestral, para que su receptor pueda captarlos. Otra posibilidad del DGPS, más reciente, es el sistema WAAS, útil en los aeropuertos porque disminuye el costo de los equipos requeridos para el aterrizaje, proporcionando también información para la gestión del tráfico aéreo. Las **correcciones a posteriori**, tal y como lo indica su nombre, no se aplican en campo, sino en la oficina después de echo un levantamiento. Es un sistema más económico que permite disfrutar de la precisión DGPS, ahorrándose los gastos que conllevan las correcciones en tiempo real y eventualmente es la única posibilidad de realizar la técnica DGPS. Como el receptor almacena la información con la hora exacta y los satélites que la brindaron, cuando uno regresa a la oficina, tranquilamente procesa la información. El software de corrección, considera cada coordenada, la hora y los satélites, y a continuación puede averiguar los datos de corrección si dispone del servicio de un radio-faro, y con ello recalculan las coordenadas con tanta precisión como lo permitan los datos de corrección. Por ello en realidad, en nuestras condiciones, y con trabajos profesionales de precisión, se requiere otro receptor en una base de coordenadas conocidas para realizar DGPS.

En términos muy generales, podríamos asignar los siguientes valores métricos a cada una de las fuentes de error, (asumiendo una buena visión del espacio satelital y una buena geometría).

Error	Valor
Ionosfera	4 m
Tropósfera	0,7 m
Efemérides	2,1 m
Receptor	0,5 m
Reloj	2,1 m
"Multipath"	1,0 m
Total	10,4 m

Cuantificación de la incertidumbre en localización GPS

Debido a las múltiples fuentes de error, los receptores GPS posicionan con un cierto grado de incertidumbre. Ofrecen una estimación de la posición, valor medio, a lo largo de un intervalo de tiempo con una determinada dispersión. De forma estándar se puede caracterizar esta dispersión mediante el error cuadrático medio (ECM) definido como la raíz cuadrada de la media de los errores al cuadrado, pudiendo referirse a una, dos o tres dimensiones.

En receptores GPS/GLONASS y DGPS los errores de posicionamiento, en un intervalo de horas se ajustan a una distribución normal, no ocurriendo así con el GPS en modo absoluto debido al error S/A. En los dos primeros casos, el error en las medidas sigue una distribución de probabilidad normal en cada eje, por lo que se pueden deducir las probabilidades asociadas a los mismos. Para análisis unidimensional, el valor de una medida se encuentra en el intervalo [valor medio +/- 2σ] en el 95% de los casos. En el caso bidimensional (ejes norte y este), el porcentaje de dispersión que está dentro de un círculo de radio ECM depende de la distribución, siendo del 98% en el caso circular.

Para las medidas GPS y GPS/GLONASS la distribución es elíptica, por lo que se aproxima a una distribución unidimensional, con probabilidad asociada del 95%. Siendo σ la desviación típica de la distribución. Los fabricantes de GPS definen la precisión de las medidas de posición obtenidas con sus receptores mediante el Error Circular Probable (CEP), que se define como el radio del círculo en el que se encuentra la estimación más probable de la posición en un porcentaje del 95% o CEP 95%, en asociación con el ECM y del 50% o CEP 50%.

Aplicaciones de los GPS

Son múltiples los campos de aplicación de los sistemas de posicionamiento tanto como sistemas de ayuda a la navegación, como en modelización los espacios atmosféricos y terrestres o aplicaciones con requerimientos de alta precisión en la medida del tiempo. A continuación se detallan algunos de los campos civiles donde se utilizan en la actualidad sistemas GPS:

- ✘ **Estudio de fenómenos atmosféricos.** Cuando la señal GPS atraviesa la troposfera el vapor de agua, principal causante de los distintos fenómenos meteorológicos, modifica su velocidad de propagación. El posterior análisis de la señal GPS es de gran utilidad en la elaboración de modelos de predicción meteorológica.
- ✘ **Localización y navegación en regiones inhóspitas.** El sistema GPS se utiliza como ayuda en expediciones de investigación en regiones de difícil acceso y en escenarios caracterizados por la ausencia de marcas u obstáculos. Un ejemplo son los sistemas guiados por GPS para profundizar en el conocimiento de las regiones polares o desérticas.
- ✘ **Modelos geológicos y topográficos.** Los geólogos comenzaron a aplicar el sistema GPS en los años 80 para estudiar el movimiento lento y constante de las placas tectónicas, para la predicción de terremotos en regiones geológicamente activas. En topografía, el sistema GPS constituye una herramienta básica y fundamental para realizar el levantamiento de terrenos y los inventarios forestales y agrarios.
- ✘ **Ingeniería civil.** En este campo se utiliza la alta precisión del sistema GPS para monitorizar en tiempo real las deformaciones de grandes estructuras metálicas o de cemento sometidas a cargas.
- ✘ **Sistemas de alarma automática.** Existen sistemas de alarma conectados a sensores dotados de un receptor GPS para supervisión del transporte de mercancías tanto contaminantes de alto riesgo como perecederos (productos alimentarios frescos y congelados). En este caso la generación de una alarma permite una rápida asistencia al vehículo.
- ✘ **Sincronización de señales.** La industria eléctrica utiliza el GPS para sincronizar los relojes de sus estaciones monitoras a fin de localizar posibles fallos en el servicio eléctrico. La localización del origen del fallo se realiza por triangulación, conociendo el tiempo de ocurrencia desde tres estaciones con relojes sincronizados.

- ❖ **Guiado de disminuidos físicos.** Se están desarrollando sistemas GPS para ayuda en la navegación de invidentes por la ciudad. En esta misma línea, la industria turística estudia la incorporación del sistema de localización en guiado de visitas turísticas a fin de optimizar los recorridos entre los distintos lugares de una ruta.
- ❖ **Navegación y control de flotas de vehículos.** El sistema GPS se emplea en planificación de trayectorias y control de flotas de vehículos. La policía, los servicios de socorro (bomberos, ambulancias), las centrales de taxis, los servicios de mensajería, empresas de reparto, etc. organizan sus tareas optimizando los recorridos de las flotas desde una estación central. Algunas compañías ferroviarias utilizan ya el sistema GPS para localizar sus trenes, máquinas locomotoras o vagones, supervisando el cumplimiento de las señalizaciones.
- ❖ **Sistemas de aviación civil.** En 1983 el derribo del vuelo 007 de la compañía aérea coreana al invadir cielo soviético, por problemas de navegación, acentuó la necesidad de contar con la ayuda de un sistema preciso de localización en la navegación aérea. Hoy en día el sistema GPS se emplea en la aviación civil tanto en vuelos domésticos, transoceánicos, como en la operación de aterrizaje [16]. La importancia del empleo de los GPS en este campo ha impulsado, como se verá en la siguiente sección, el desarrollo en Europa, Estados Unidos y Japón de sistemas orientados a mejorar la precisión de los GPS.
- ❖ **Navegación desasistida de vehículos.** Se están incorporando sistemas DGPS como ayuda en barcos para maniobrar de forma precisa en zonas de intenso tráfico, en vehículos autónomos terrestres que realizan su actividad en entornos abiertos en tareas repetitivas, de vigilancia en medios hostiles (fuego, granadas, contaminación de cualquier tipo) y en todos aquellos móviles que realizan transporte de carga, tanto en agricultura como en minería o construcción. La alta precisión de las medidas ha permitido importantes avances en el espacio en órbitas bajas y así tareas de alto riesgo de inspección, mantenimiento y ensamblaje de satélites artificiales pueden ahora realizarse mediante robots autónomos.

El futuro de los Sistemas de Posicionamiento Global

En 1996 la normativa de regulación de los sistemas GPS determinó la supresión, en el 2006, de la Disponibilidad Selectiva y la incorporación de una frecuencia más para uso civil. Esto significa que dentro de unos años los satélites GPS transmitirán código civil en las frecuencias L2 y L1, redundancia que permitirá estimar los errores ionosféricos, proporcionando una precisión en modo absoluto similar a la obtenida con técnicas diferenciales.

La señal en la frecuencia L1 permanecerá invariable, lo que permitirá a los actuales receptores seguir operativos. El segmento de control se mejorará con la puesta en marcha de un nuevo sistema de control, actualmente en fase de diseño, para la estación experta que contempla hasta un total de veinte estaciones monitoras, lo que supondrá un control más preciso de las efemérides y de los relojes de los satélites.

Con los sistemas de navegación actuales GPS, GLONASS, GPS/GLONASS no es posible cumplir los estándares rigurosos de seguridad que algunas aplicaciones civiles, como la navegación aérea, requieren. En concreto, la notificación de errores al usuario sobre el funcionamiento del sistema puede llevar desde un segundo, cuando el error se produce en el satélite, hasta varias horas, en aquellos casos en los que es el segmento control el que detecta el fallo. Con el fin de resolver estos inconvenientes, Europa está desarrollando EGNOS (*European Geostationary Navigation Overlay Service*) que estará operativo en el año 2003. Este sistema reducirá los errores en posicionamiento para alcanzar los estándares de seguridad en la navegación aérea con la instalación en tierra de una red de 34 antenas receptoras fijas (RIMS) que recibirán las señales GPS enviándolas a un centro de control donde se calibrará la información del satélite midiendo el posible error para corregirlo y enviarlo de nuevo a 10 estaciones en tierra. Además se enviarán estas señales a dos nuevos satélites INMARSAT geostacionarios situados a una altura de 35000 Km., que actuarán como repetidores enviando las señales a los usuarios. Servicios similares se están desarrollando en Estados Unidos (WAAS: *Wide Area Augmentation System*) y en Japón (MTSAS: *MTSAT Satellite Based Augmentation System*). Así mismo, Europa pondrá en marcha un sistema global de navegación por satélite (GNSS-1: *Global Navigation Satellite System 1*) que integrará los servicios de GPS, GLONASS y de las redes EGNOS, WAAS y MTSAS. Este será el paso inicial hacia la consecución de un sistema europeo de posicionamiento (GNSS-2 o Galileo) que utilizará una constelación de satélites europeos.

CAPITULO VIII

POSICIONAMIENTO GEODESICO

Desde del inicio operacional en la Región Marina de la Sonda de Campeche del Golfo de México, Petróleos Mexicanos ha mantenido una tendencia en el incremento de la infraestructura para la exploración, explotación, transporte y manejo de hidrocarburos, lo que hizo prioritario y absolutamente indispensable el contar con equipos y sistemas que permitieran conocer con precisión, la ubicación de cada una de las instalaciones que se han construido, causando mayor grado de dificultad los ductos y válvulas que se encuentran en el lecho marino, debido a las condiciones físicas adversas del medio.

Para conocer la posición geográfica donde se encuentran las infraestructuras, ductos y válvulas submarinas, etc. A partir de 1978, se iniciaron actividades con sistema de radio posicionamiento denominado “ARGO” con precisión operacional de ± 20 metros.

Posteriormente de 1981 a 1993, Petróleos Mexicanos utilizo en el Área Marina sistemas de radioposicionamiento de largo alcance denominado “MAXIRAN” y de corto alcance denominado “DEL NORTE”, ambos con precisión operacional de ± 10 metros, este ultimo para posicionar (fondear) en el lecho marino las anclas de las embarcaciones y operado por personal profesionalista de Petróleos Mexicanos, para salvaguardar la integridad de las instalaciones marinas.

Con el paso de los años y gracias a los avances tecnológicos en materia electrónica, PEMEX Exploración y Producción, a partir de 1994 se esta trabajando con el sistema de posicionamiento “DGPS” (Sistema de Posicionamiento Global Diferencial) con precisión operacional de ± 5 metros, esto fue al inicio, pues ahora con los nuevos equipos se cuenta con *corrección diferencial en tiempo real* se logran precisiones de ± 0.300 metros.

VIII.1 EQUIPO

El equipo de posicionamiento necesario para posicionar las diferentes embarcaciones varia de acuerdo a la característica de estas, pero a continuación se enlista el equipo más relevante:

CANTIDAD	DESCRIPCION
1	COMPUTADORA PENTIUM IV 1.7 GHZ HD 40GB, 256 MB RAM CON SISTEMA OPERATIVO WINDOWS NT 4.0 U OFFICE 2000 PROFESIONAL
1	TECLADO
1	MOUSE
1	IMPRESORA DE INYECCIÓN DE TINTA C/Cab.USB. Y ELIMINADOR.
1	FUENTE DE ALIMENTACIÓN
1	UPS
4	MONITOR DE 15" LCD C/CABLE DE ALIM.
1	MULTIPUERTOS CON INTERFACE.
1	LLAVE DE ACCESO AL SOFTWARE USB V 7.X
1	VIDEO SPLITER CON ELIMINADOR
2	MULTICONTACTOS
2	EXTENSIONES
1	MANUAL C-Nav, CABLE (bypass-Y).
1	CD SOFTWARE AND MANUAL VERSIÓN 2.0
2	CABLE VGA 20 Mts.
1	UNIDAD DE DISPLAY C-NAV
1	RECEPTOR GPS F/W 14.3
1	CD CON BASE DE DATOS RMSO
1	REGULADOR
1	CONVERTIDOR RS-232 A RS-485/422
1	SISTEMA DE ENERGIA INTERRUPIBLE UPS
1	ADAPTADOR DVI A VGA
1	TRANSFORMADOR DE VOLTAJE 220/110 V. DE 1000 W

Herramientas indispensables para la colocación del equipo.

CANTIDAD	DESCRIPCIÓN
2	PINZAS DE CORTE
1	PINZA TIPO ELECTRICISTA.
1	CUTTER
1	CINTA DE AISLAR
1	CINTA GRIS.
1	CINCHOS SUJETABLES.
1	CINTA METRICA 30 Mts.
1	CAUTIN TIPO LAPICERO
1	PINZA DE PUNTA
1	MARTILLO
1	DESARMADOR DE CRUZ MEDIANO
1	DESARMADOR DE CRUZ PEQUEÑO
1	DESARMADOR CON SEIS PUNTAS
1	JUEGO DE INTERFACES

C-Nav



Gyro S-Brown



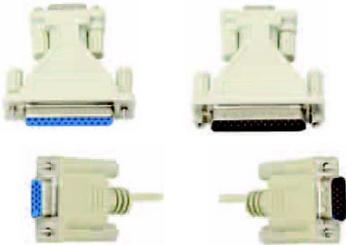
Multimetro

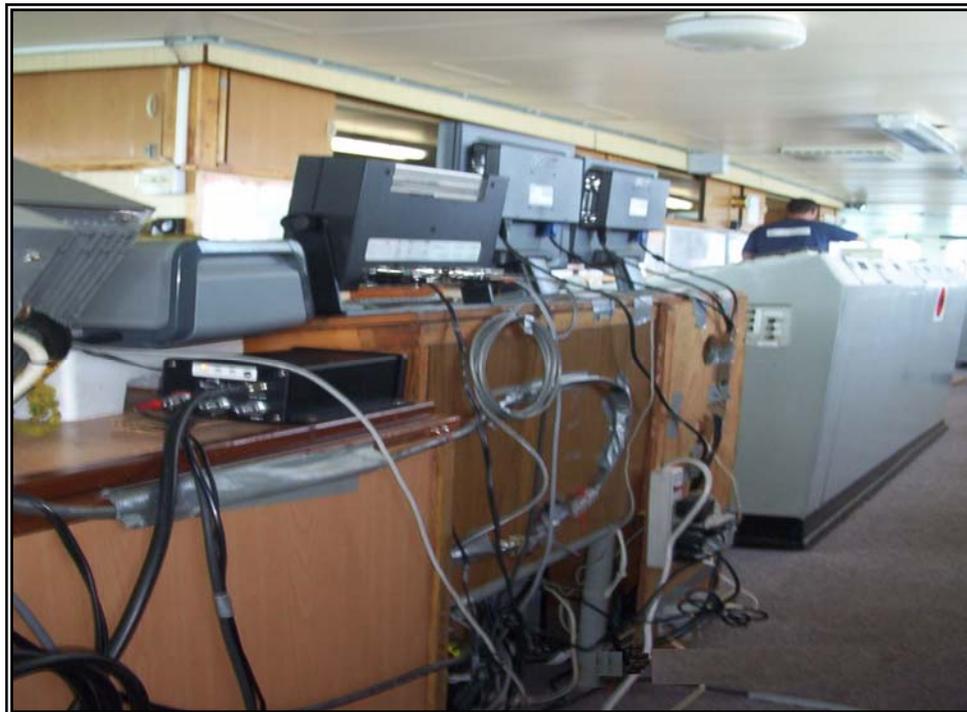
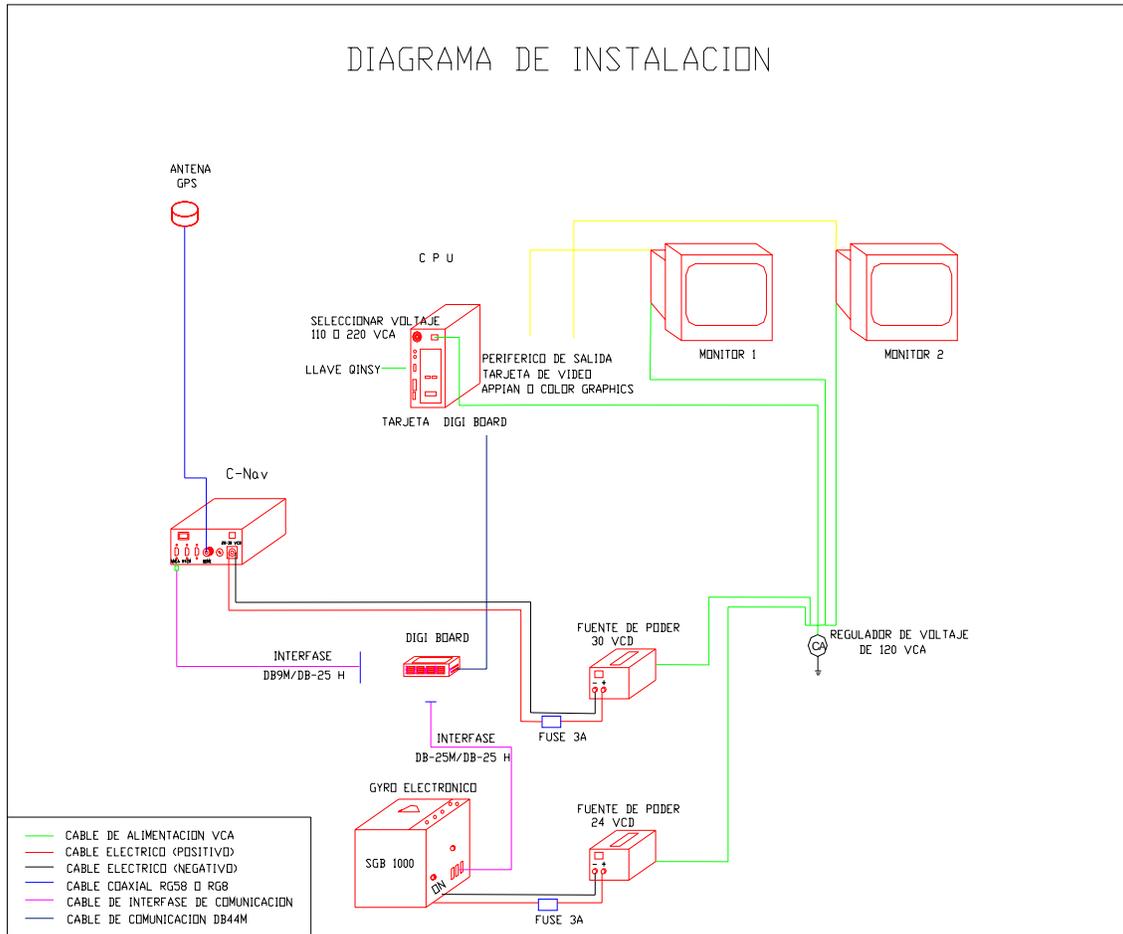


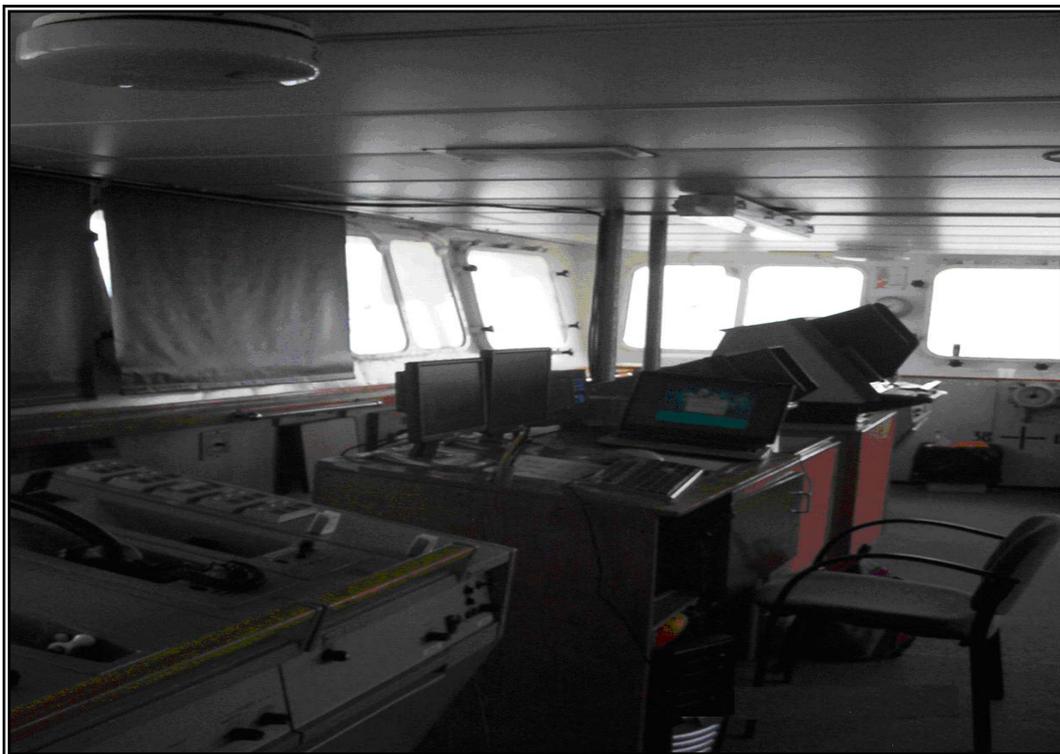
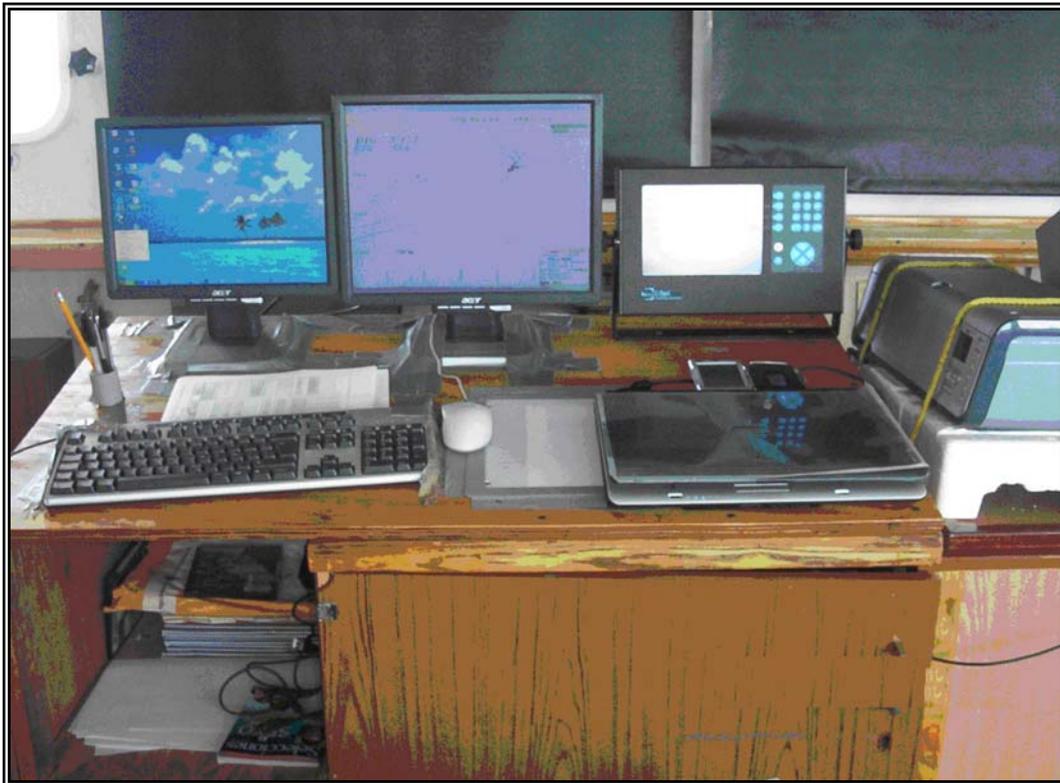
Interfaces



DB25 y DB9 conector para cable (RS232).



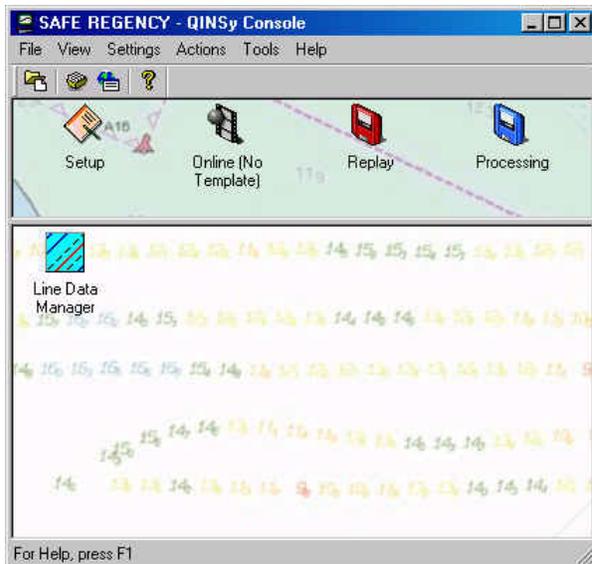




VIII.2 SOFTWARE

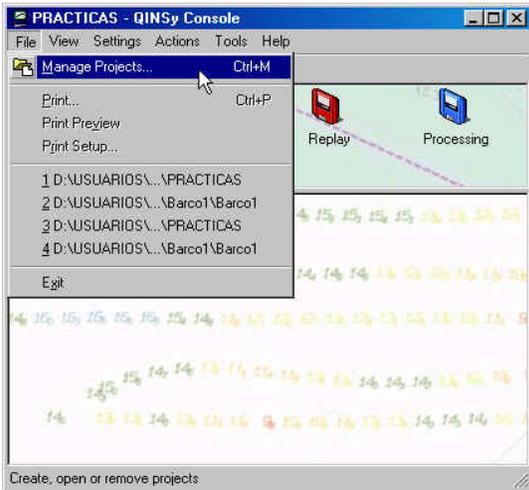
El software de navegación que se utiliza para el posicionamiento geodésico es el **QINSy 7.0** a continuación se describe la forma de programar el software para comenzar el trabajo:

QINSy 7.0 integra dentro de una misma ventana, conocida como Qinsy Console, todos sus programas auxiliares tales como Line Data Manager, I/O Tester, DXF Converter, etc. Desde Qinsy Console se Abren o se Crean proyectos.



Como crear una Base de Datos

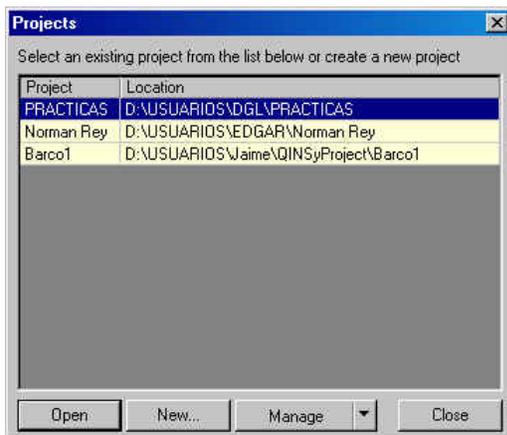
Desde Qinsy Console, se selecciona Manage Projects del menú File (Ctrl+M). Esto es para direccionar la base de datos.



Aparece la siguiente ventana, en la cual se puede abrir o crear proyectos.

Open para abrir un proyecto existente y previamente seleccionado.

New para crear uno nuevo.



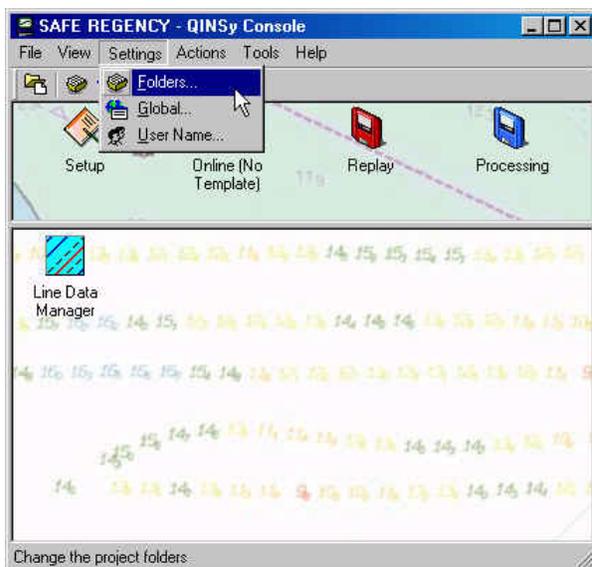
Si se selecciona *New*, se abrirá una pequeña ventana, en la cual se asignará el nombre de la base de datos (se recomienda usar el nombre de la embarcación).



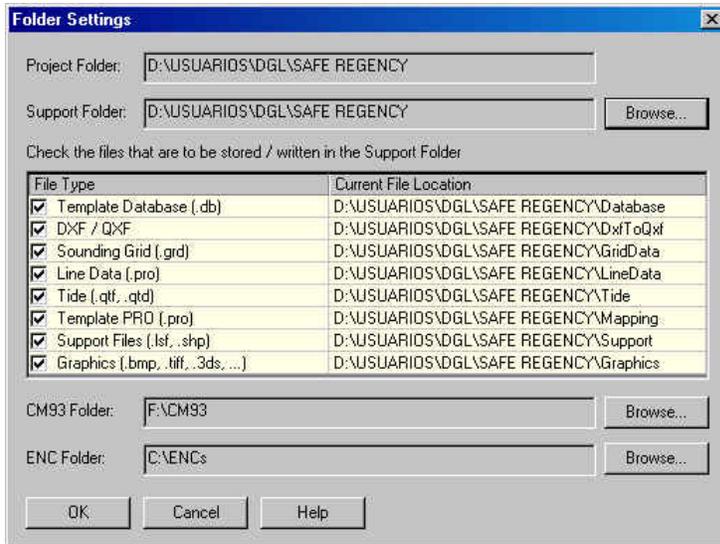
Al aceptar aparece una ventana donde se pregunta si se desea crear las carpetas faltantes. Para proceder se acepta (no es necesario crear previamente las carpetas desde el explorador).



Archivos con información relevante para varios proyectos, pueden ser guardados en una carpeta general, esto se hace desde Support Folder. Se tiene que seleccionar el proyecto creado esto es desde Projects en Qinsy Console, como se explico previamente. También se requiere direccionar el fólder donde se va a almacenar la información común. Esto es desde Folders en el menú Settings.



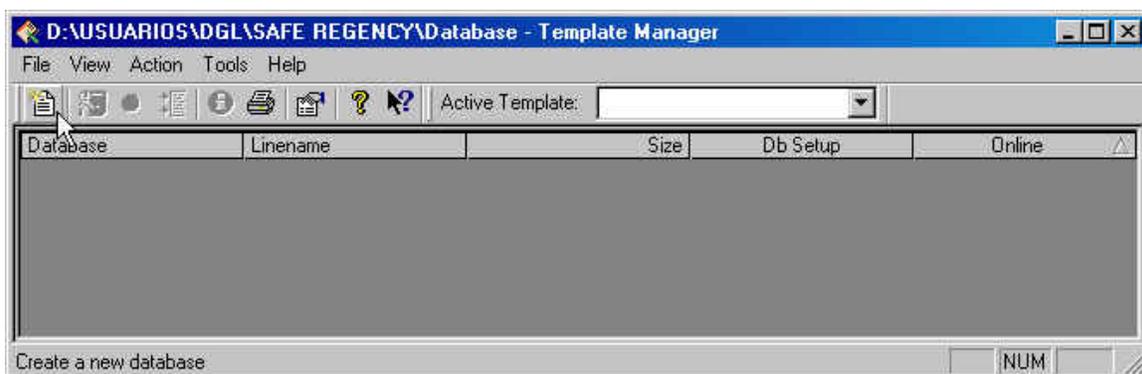
Aparece la siguiente ventana desde donde se direcciona el almacenamiento de los datos y se selecciona la información que se quiere compartir.



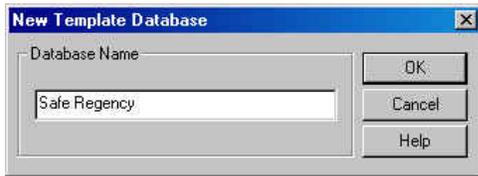
Se procede a la configuración del proyecto (Base de datos). Esto es desde el Setup de Qinsy Controler.



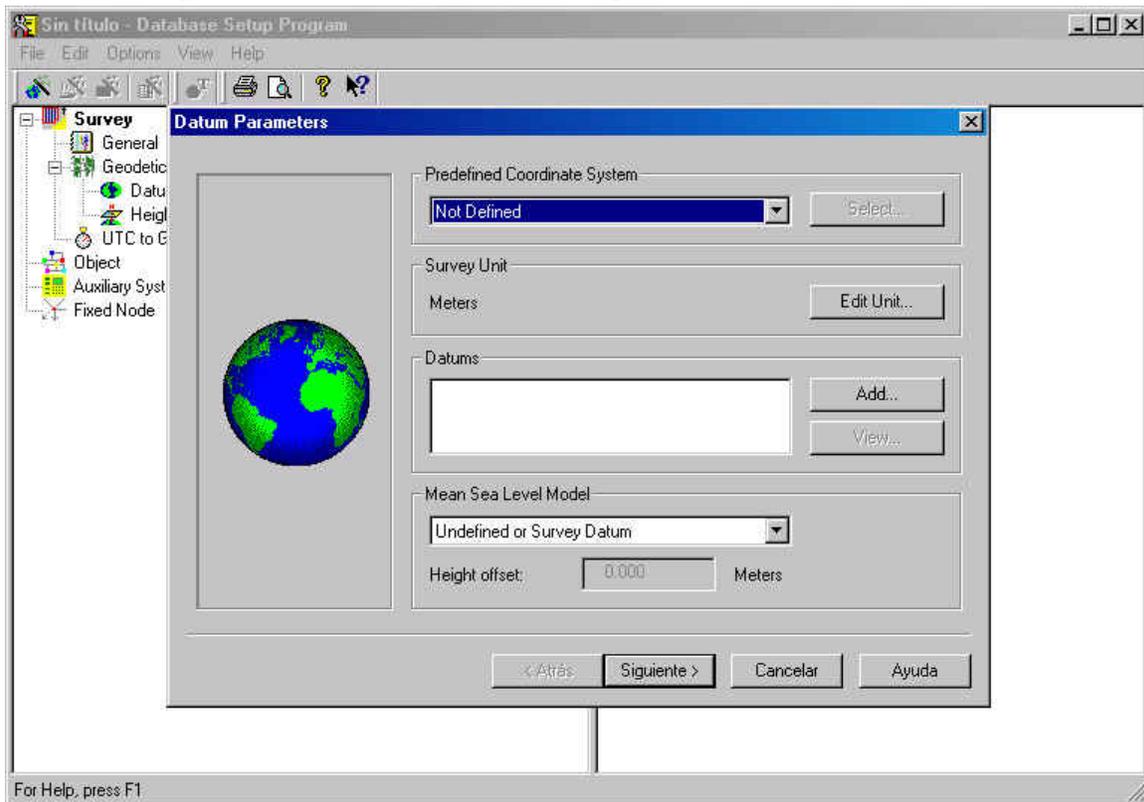
Aparece la ventana de Template Manager, desde la cual se configura la base de datos. Se da clic en New Template Database. En el icono que se muestra en la imagen siguiente o desde el menú de File.



Aparece una ventana en la cual se asigna el nombre a la base de datos.

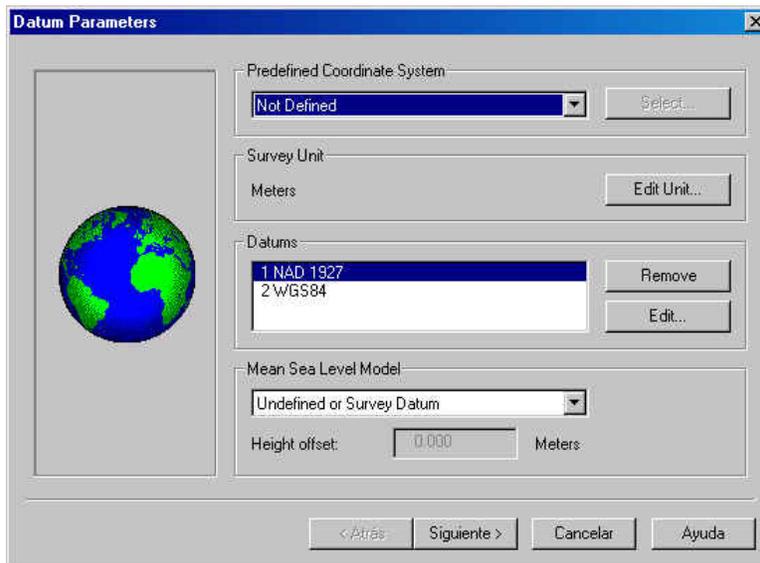
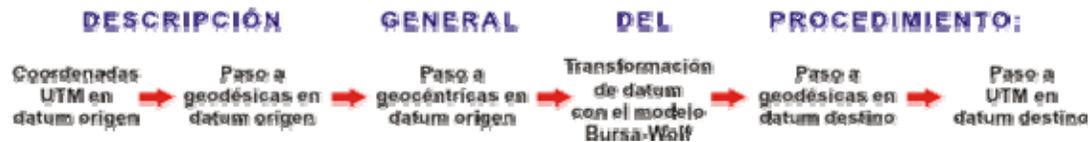


Posteriormente aparecen las siguientes ventanas, en las cuales se editan los parámetros geodesicos tanto del datum origen como del datum destino.



Datum Parameters

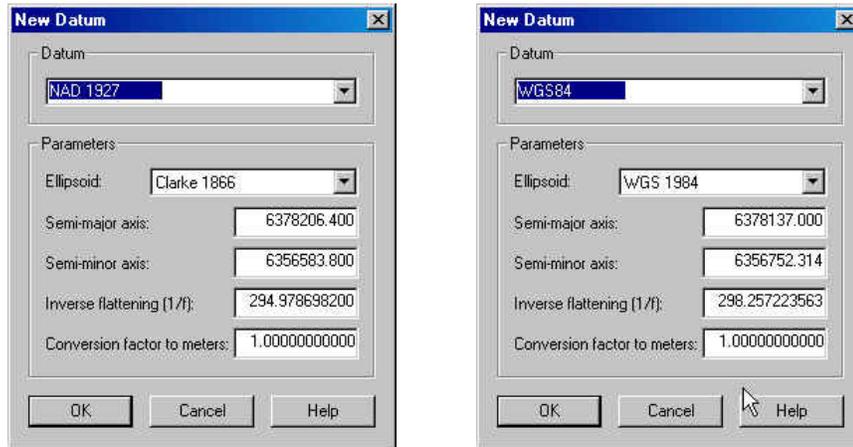
Cuando se utiliza el GPS, las coordenadas de las posiciones calculadas están basadas en el datum WGS84, estas coordenadas hay que transformarlas al sistema local, en el campo de ejercicio se procede de la siguiente manera: cambiar coordenadas UTM en WGS84 a coordenadas UTM pero a un datum destino NAD27. Para hacer este proceso, necesitamos realizar la siguiente secuencia general:



Predefined Coordinate System: Not defined.

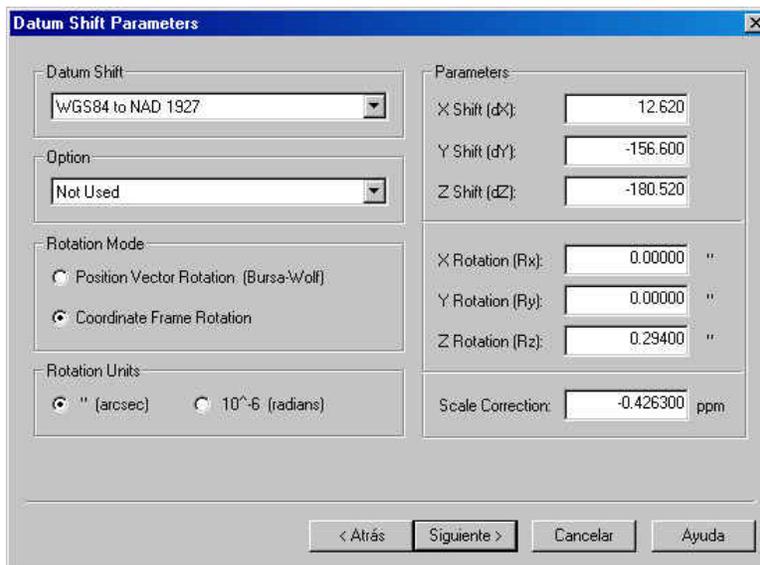
Survey Unit: Meters (unidad de medida en la que se trabaja).

Datums: se dan de alta dos tipos de datum, el datum destino: **NAD 1927** con su respectivo elipsoide **Clarke 1866** y el datum origen: **WGS 84** con su respectivo elipsoide **WGS84** en ese orden. Al dar click en Add aparece la siguiente ventana en la que se selecciona el Datum. Los datos en la sección de Parameters aparecen automáticamente.



Al presionar OK aparece la ventana **Datum Shift Parameters**.

Dentro de las transformaciones de 7 parámetros usadas en geodesia, existen dos alternativas de formulación y una cierta confusión de nombres. Las dos formulaciones, casi idénticas, son las ecuaciones de Bursa-Wolf y la transformación de Helmert. Son prácticamente iguales y sólo presentan diferencias en la forma de plantear la matriz de rotaciones y sus signos. En cuanto a los nombres, existen denominaciones alternativas que crean una cierta confusión. Así, hay fuentes que atribuyen la expresión *Coordinate Frame* a la transformación de Bursa-Wolf y el nombre alternativo *Position Vector* a la de Helmert, en nuestro caso utilizamos el método de Bursa-Wolf.



Datum Shift: **WGS 84 to NAD 1927** (los sistemas GPS registran lecturas de posición en WGS 84 y se transforman al datum local NAD 1927).

Option: Not Used

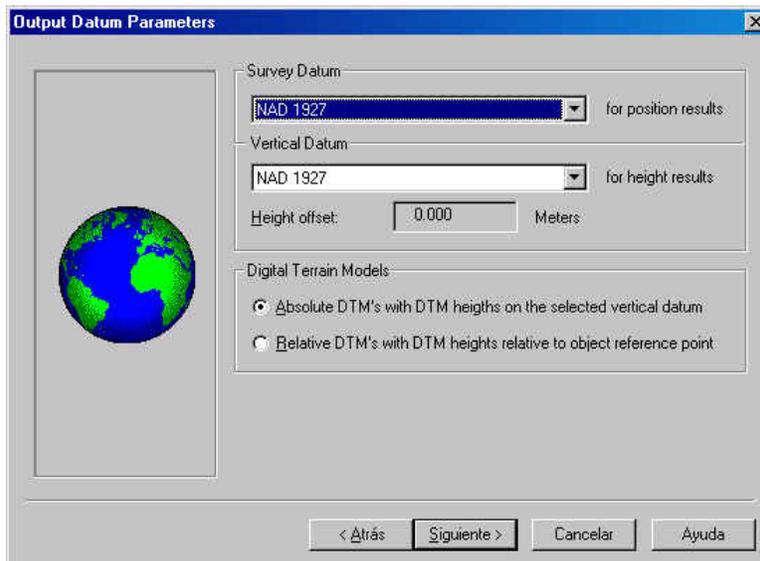
Rotation Mode: Coordinate Frame Rotation

Rotation Units: " (arcsec)

Parameters:

X Shift [dX]: 12.6200 X Rotation [Rx]: 0.0000 "
Y Shift [dY]: -156.600 Y Rotation [Ry]: 0.0000 "
Z Shift [dZ]: -180.520 Z Rotation [Rz]: 0.2940 "
Scale Correction: -0.426300 ppm

Al presionar Siguiente aparece la ventana **Output Datum Parameters**.



Survey Datum: NAD 1927

Vertical Datum: NAD 1927

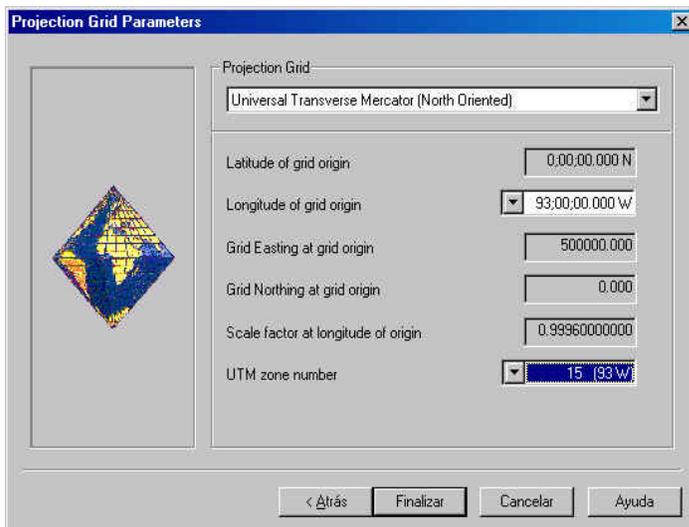
Digital Terrain Models: Absolute DTM's with DTM heights on the selected vertical datum.

Al presionar Siguiete aparece la ventana **Projection Grid Parameters**.

En esta ventana se configura la proyección en la cual vamos a trabajar. En el campo de trabajo se utiliza la Proyección Transversa de Mercator, esta es una proyección conforme. Esto significa que las mediciones angulares realizadas sobre la superficie de la proyección son verdaderas.

La Proyección Transversa de Mercator se define por:

- ✘ Latitud de origen
- ✘ Meridiano central
- ✘ Falso Este y Falso Norte
- ✘ Factor de escala
- ✘ Zona UTM



Projection Grid: Universal Transverse Mercator (North Oriented)

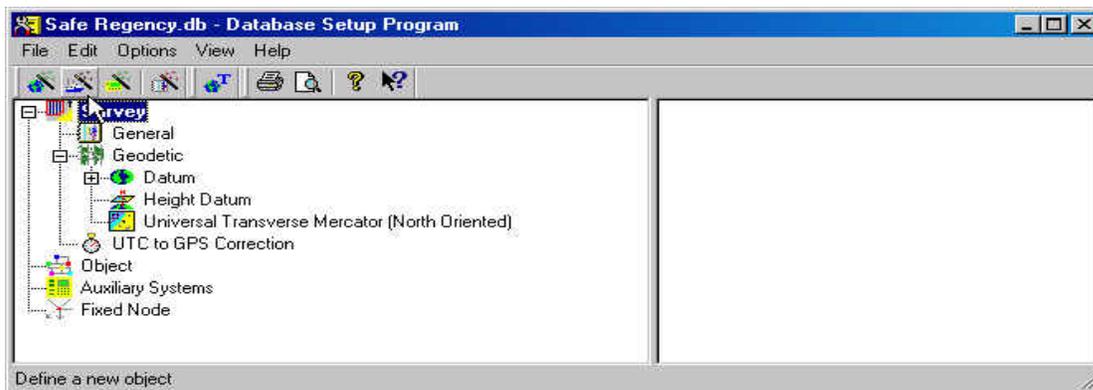
UTM zone number: 15 (93 W)

Al seleccionar alguna opción en UTM zone number los demás datos aparecen automáticamente.

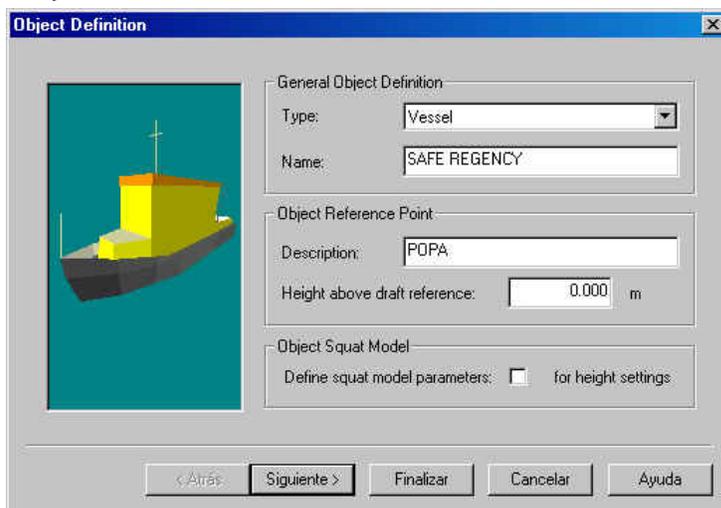
Definir Objetos

Al presionar Finalizar queda la ventana **Database Setup Program**. En la cual se procede a **definir los objetos** de la base de datos. Es decir, el nombre y tipo de embarcación o embarcaciones, nodo de referencia, etc.

El este proceso deberá repetirse para cada objeto que tengamos.



Object Definition



Se define el tipo de objeto que vamos a configurar, nombre, nodo de referencia.

General Object definition:

Type: se elige el tipo de objeto a crear, en este caso es una embarcación y se selecciona vessel.

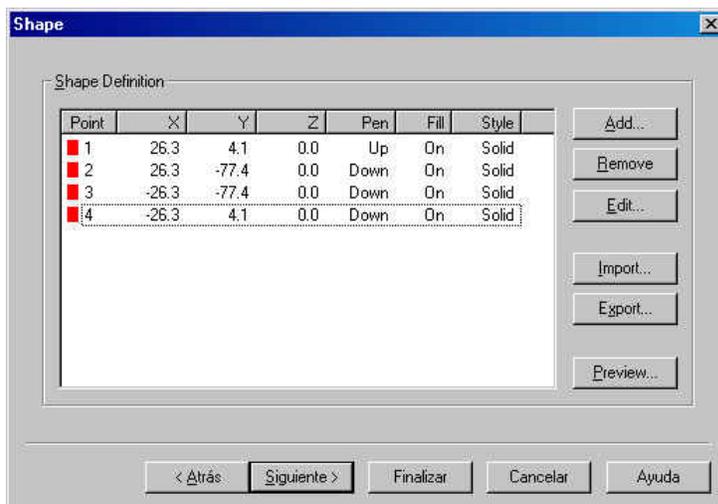
Name: nombre de la embarcación. Ejemplo. Safe Regency.

Object Reference Point:

Description: POPA HD (breve descripción del punto de referencia, por lo general la popa, y abreviación del nombre de la embarcación).

Height above draft reference: distancia del punto de referencia a la marca cero del calado del barco. Si el punto de referencia esta arriba de la marca cero, el valor es positivo. Si el punto de referencia esta por de bajo de la marca, el valor es negativo.

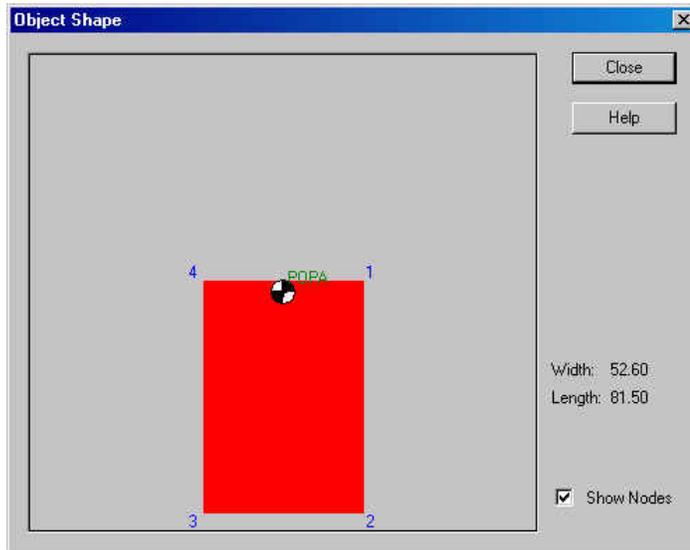
Height above sea level: se da el valor de la altura de la popa sobre el nivel medio del mar.

Shape

Correspondiente a la forma del barco. Aquí es donde se debe de configurar la embarcación, alimentando las coordenadas de cada uno de los puntos que forman el contorno de al embarcación, en relación al nodo de referencia (la popa), y dando los valores en metros. La popa se toma como el punto (0,0).

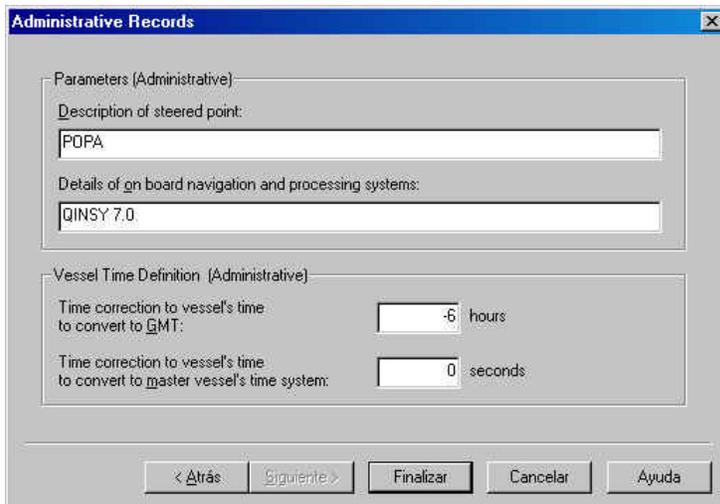
Dentro de esta configuración se pueden tener diferentes alternativas como dibujar únicamente el contorno, dibujar la figura rellena, dar diferentes colores, se pueden borrar puntos con Remove o se pueden modificar con Edit.

También se pueden importar figuras de otros archivos, o exportar la figura que se crea a otro archivo o a la impresora; y finalmente se puede ver un avance o el trabajo final del contorno de la embarcación con Preview.



Una vez conforme con los resultados se da clic en Next y aparecerá la pagina siguiente:

Administrative Records.



Parameters (Administrative):

Description of Steered Point: se anotará de preferencia la popa o algún otro offset (antena de GPS).

Details of Onboard Navigation and Processing Systems: se anotaran los sistemas de proceso y navegación que se encuentran a bordo, en nuestro caso puede ser QINSy.

Vessel Time Definition (Administrative):

Time correction to vessel's time to convert to GMT: se anota -6.00 que es el tiempo de diferencia con el meridiano de Greenwich.

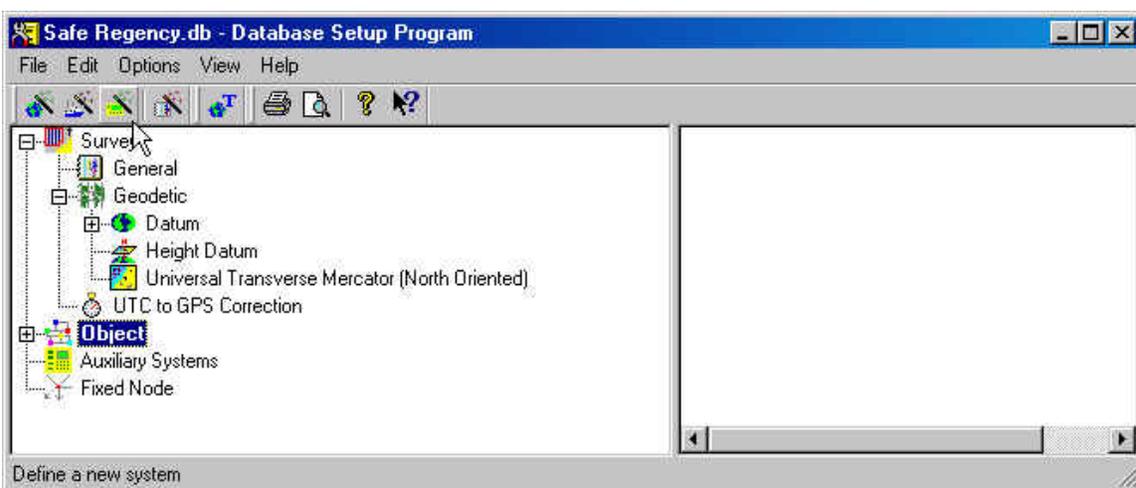
Time Correction to vessel's time to convert to master vessel's time system: se anotará 0.000

NOTA:

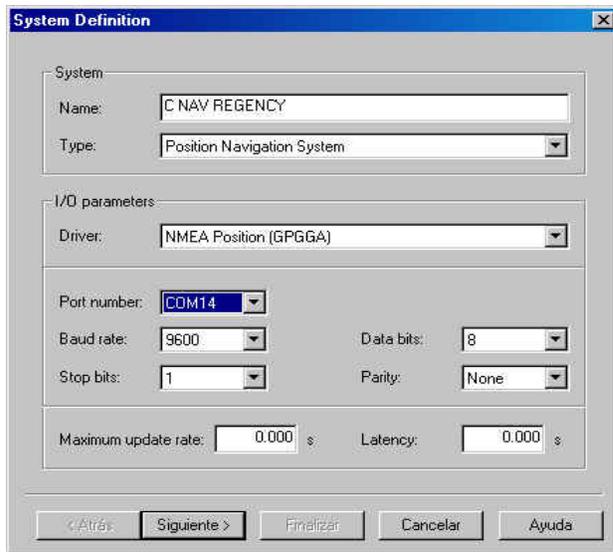
La ventana anterior es de carácter administrativo, por lo que los datos ahí almacenados no intervienen con los cálculos del programa.

Definir Sistemas

Al presionar Finalizar queda la ventana **Database Setup Program**. En la cual se procede a **definir los sistemas** de la base de datos.



Al dar clic en el icono de New System aparece la ventana de **System Definition**.



System

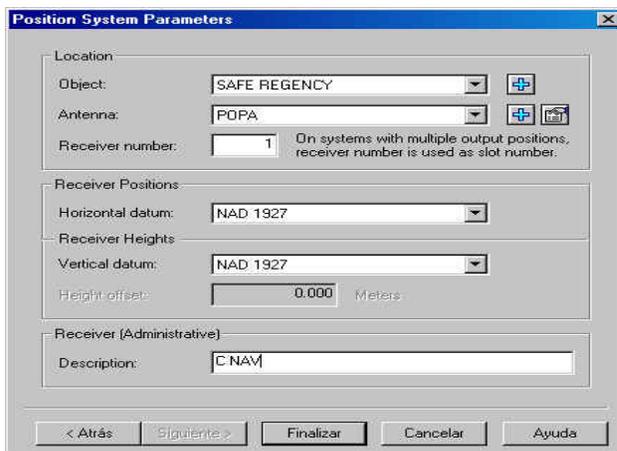
Name: se da el nombre del sistema en este ejemplo será C NAV en Regency

Type: se elige Position Navigation system.

I/O parameters

Driver: se elige NMEA Position (GPGGA) y se designa el puerto, en el que estará conectado el sistema al DIGIBOARD.

Se da clic en Next y se presenta la ventana de **Position System Parameters**.



Location:

Object: aparece por default el Objeto.

Antena: se selecciona GPS Ant.

Receiver number: se da un numero secuencial (1).

Receiver Position:

Horizontal datum: se elige el NAD 1927.

Receiver Height,

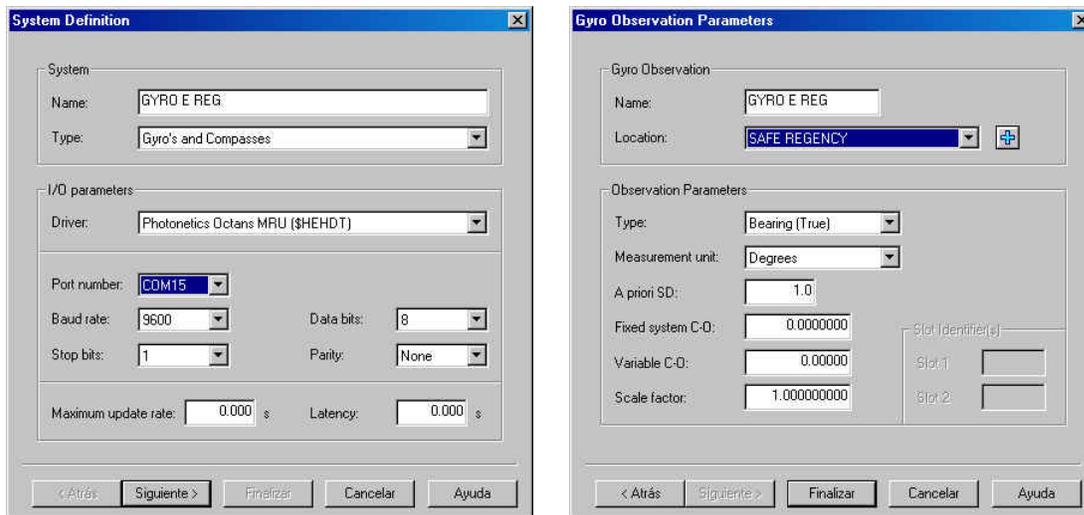
Vertical datum: se elige el NAD 1927.

Receiver (Administrative)

Description: se colocan las características del receptor en este caso es un C NAV (este dato es de tipo administrativo).

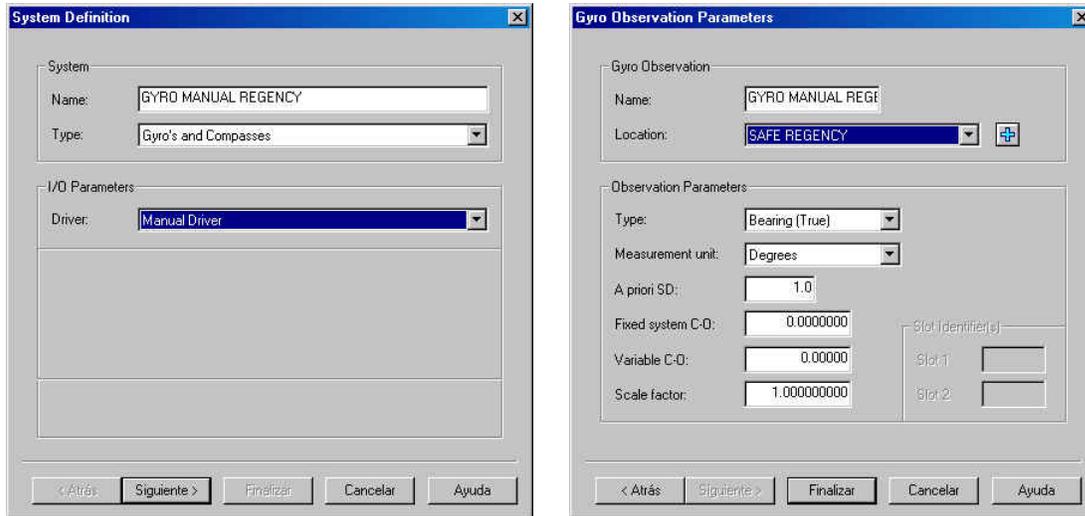
Se da clic en Finalizar. Para crear un nuevo sistema se repite el procedimiento anterior. Con el icono de New System de barra de herramientas del Database Setup Program.

Al dar clic en el icono de **New System** aparece nuevamente la ventana de **System Definition**. A continuación se llenará par un **Gyro electrónico**.



Se da clic en Finalizar y se elige un nuevo Sistema de la misma forma que el anterior. Con el icono de New System de barra de herramientas del Database Setup Program.

Al dar clic en el icono de New System aparece nuevamente la ventana de System Definition. A continuación se llenará par un *Gyro manual*.

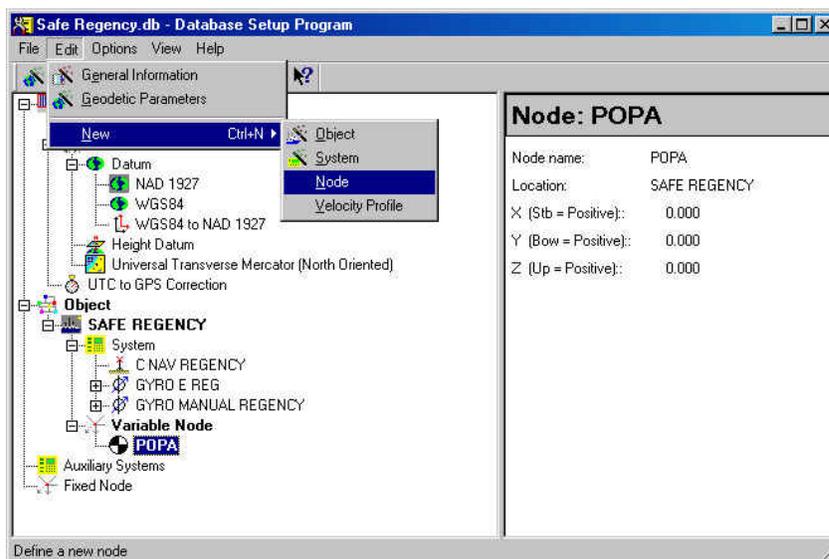


De esta manera se configuran todos los sistemas necesarios.

Configurar Nodos

Una vez configurados todos los sistemas necesarios para nuestra base de datos, se procede a **configurar los nodos**.

Los nodos se agregan desde el menú Edit > New > Node. Como se muestra la siguiente imagen.



Aparece la ventana de New Variable Node.

Node:

Name: nombre que identifique el nodo.

Location:

Object: objeto en el que se localiza el nodo.

Offset from Object Reference Point:

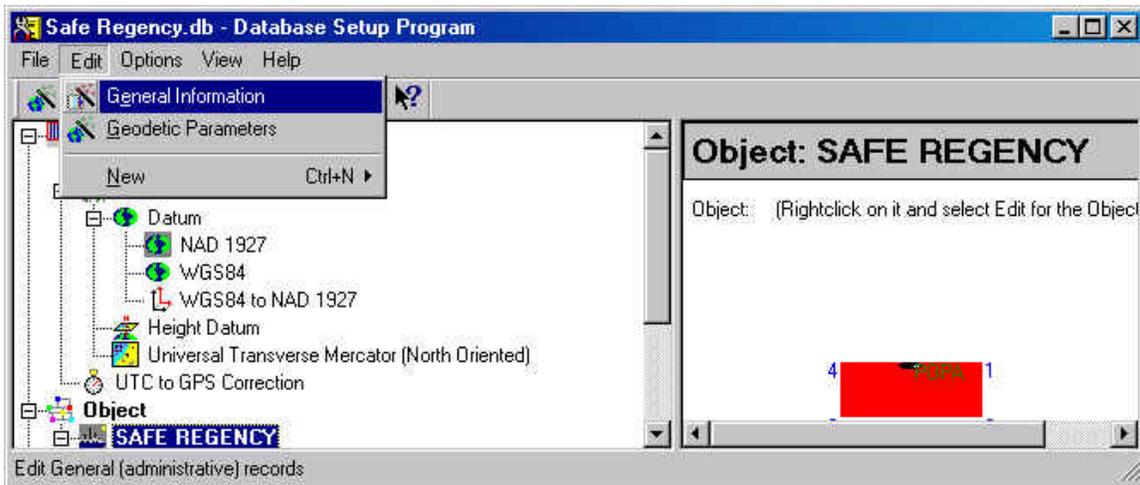
Son las coordenadas del nodo con respecto al punto de configuración inicial (se considera este punto como la coordenada 0,0) que en este caso fue la popa.

De esta forma se pueden editar tantos nodos como se requieran para el objeto en cuestión. Los nodos que se refieren anteriormente son denominados nodos variables ya que pueden cambiar de posición sobre el objeto. Dentro de estos nodos se encuentra el punto de posición de la antena del GPS, los winches, la campana de buceo, el hidrófono de Trackpoint, etc. Al terminar de editar los nodos variables, se pueden revisar con el Object Preview para ver si no están desfasados.

Cuantas veces se requiera editar un nuevo objeto se hará a través de New Object, para desplegar nuevamente desde la ventana de Object Definition hasta llegar al paso anterior es decir se tiene que editar: Su figura, sistemas y Nodos

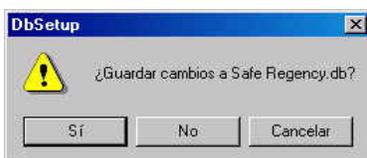
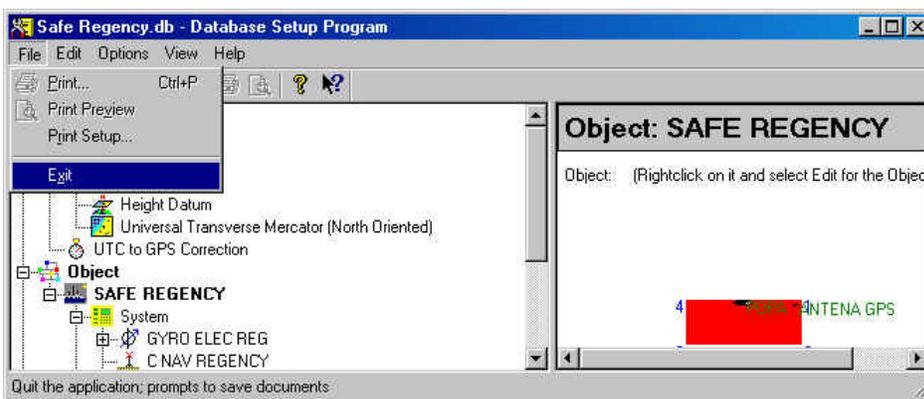
Con relación al Auxiliary Systems, este renglón se utilizara para la inspección de tuberías, aquí se puede colocar sistemas como el CP (Protección Catódica). El sistema de cámaras de un ROV, alguna otra antena adicional de corrección diferencial, etc.

Información General



Esta parte de la base de datos (Data Base Setup) consiste en llenar información de tipo administrativo, entre otros contiene información sobre el nombre de la línea, target o lugar, fecha de inicio de los trabajos, fecha de suspensión de labores, datos del proyecto, nombre de la obra, etcétera. Esto se hará con Edit y General Information.

Al terminar de configurar la base de datos se cierra el programa y se guardan los cambios.



Una vez guardados los cambios, se recomienda hacer un respaldo o imprimir la base de datos creada desde el Database Setup Program menú File > Print.

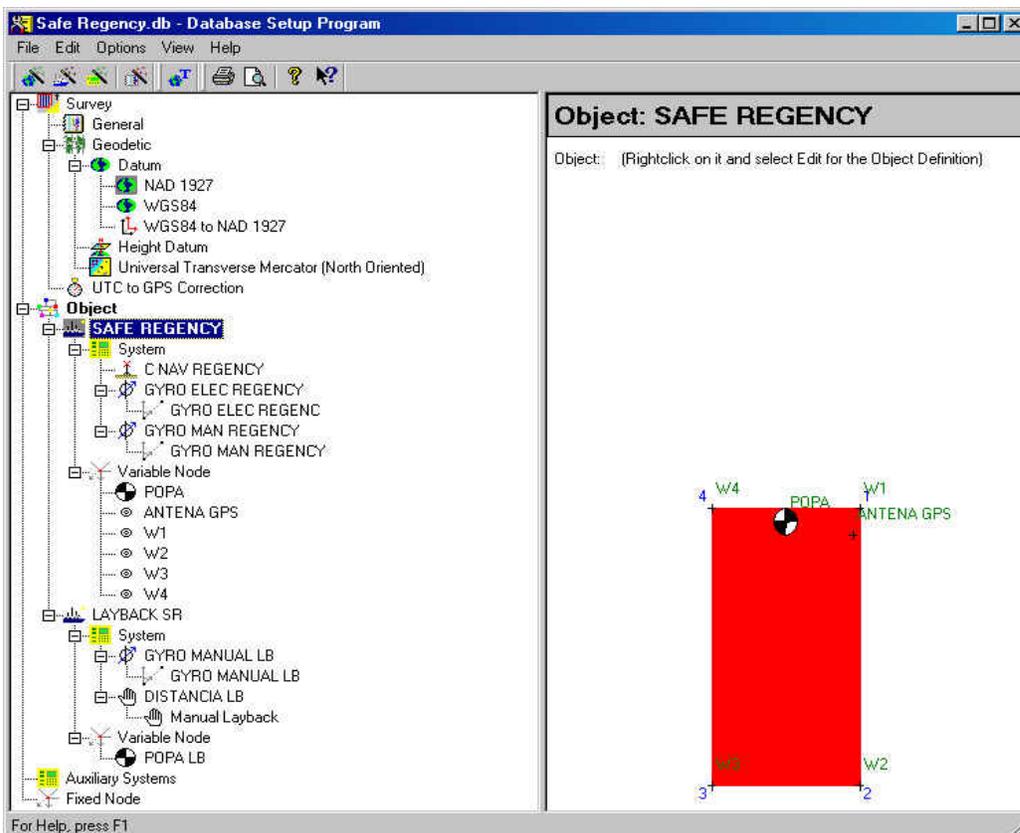
Al término de esto se procederá a configurar el Controller.

Notas:

Si se encuentra abierta alguna base de datos con su display del Controller, display de navegación o display alfanumérico, y si se desea corregir algún dato en la base, se deberá cerrar el Controller, de lo contrario se permite ingresar a la base de datos, mas no se podrá hacer ninguna modificación.

Cuando se desee hacer algún cambio en la base de datos, ir al renglón de la base de datos que se va a modificar, dar clic con el botón derecho y seleccionar Edit, esto desplegara una ventana para modificar los datos.

Una vez completa la configuración de la base de datos la ventana Database setup Program luce de la siguiente manera.



NOTAS:

Para guardar los cambios en la base de datos, desde Database Setup Program Menú File > Exit

En Qinsky 7.0 no es necesario dar de alta el sistema de señal diferencial.

El controlador

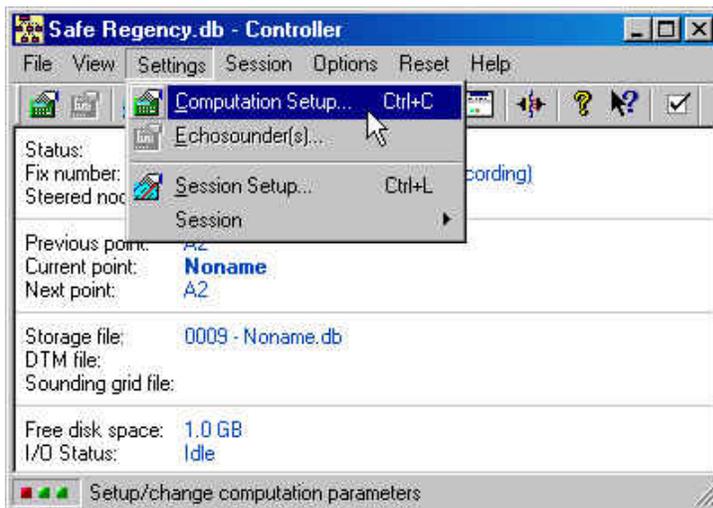
El **controlador** permite crear y configurar los displays requeridos para un trabajo determinado. Displays principales: el de navegación y el alfanumérico.

Una vez que esta activa la base de datos a utilizar se procede a abrir el controlador desde Qinsky Console dando click en el icono Online.



Computation Setup

Antes de crear los displays habrá que realizar los ajustes necesarios de los sistemas dados de alta en la base de datos para cada objeto creado. Esto es desde Controller > Settings > Computation Setup (Ctrl+C) o el icono

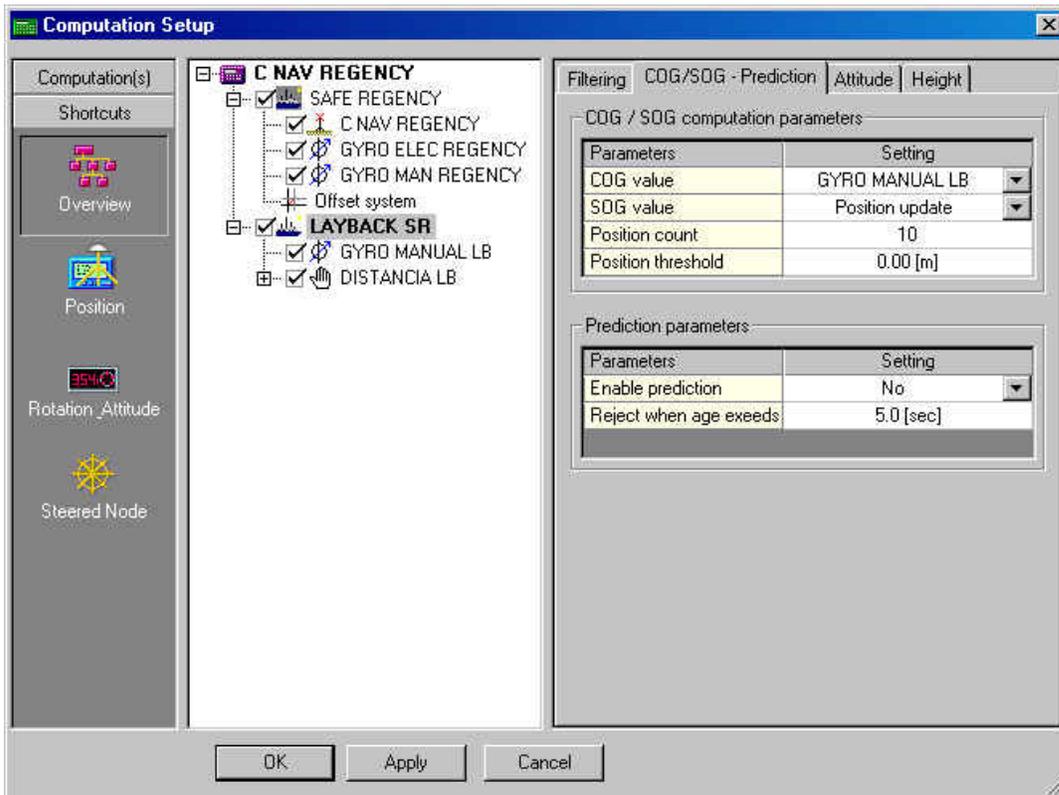


Aparece la ventana de **Computation Setup**. Se divide básicamente en tres partes. De derecha a izquierda se encuentran:

Una barra de menú con dos secciones divisiones principales *Computations* y *Shortcuts*.

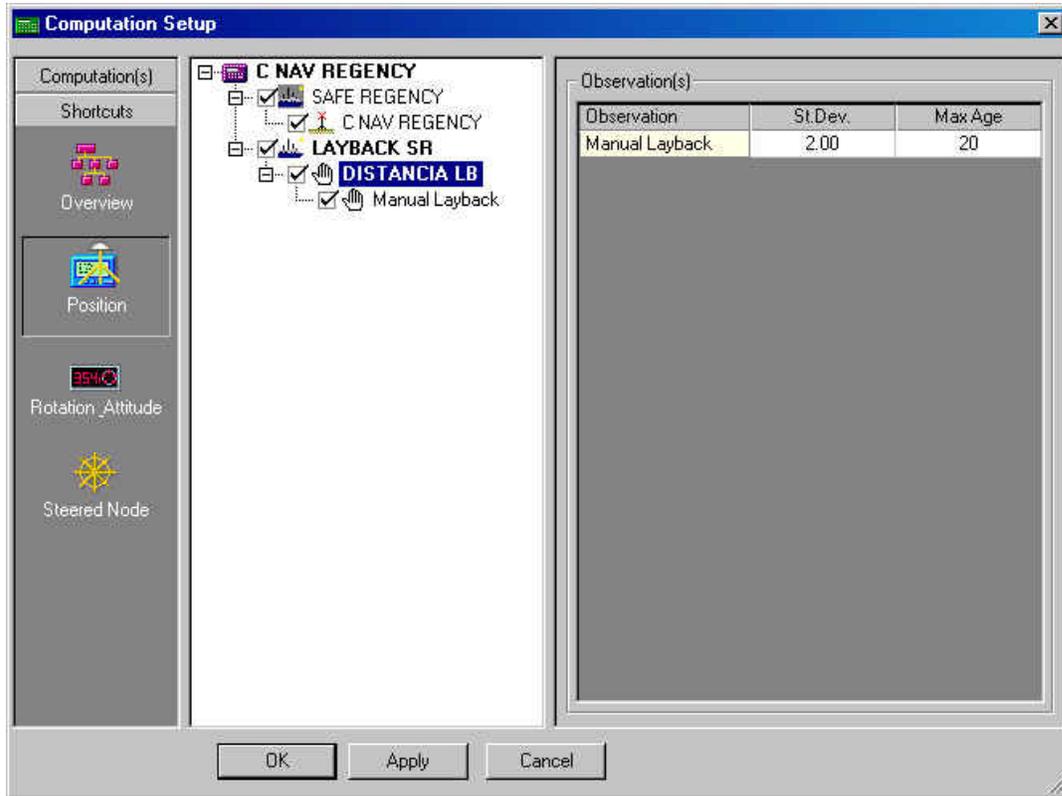
Un sección de la ventana parecida al explorador de Windows, en donde de despliegan los objetos de la base de datos y otra sección en donde se muestran los datos e información sobre los objetos, sistemas, nodos, etc. dependiendo de la selección que se realice en las dos secciones anteriores. Aquí es donde se pueden realizar ajustes a los datos.

Shorcuts - Overview



Se pueden observar para cada objeto los sistemas dados de alta en la base de datos. Es importante que para cada objeto este dado de alta el *Gyro Manual* en la sección COG Value. Todos los sistemas a utilizar deberán estar dados de alta.

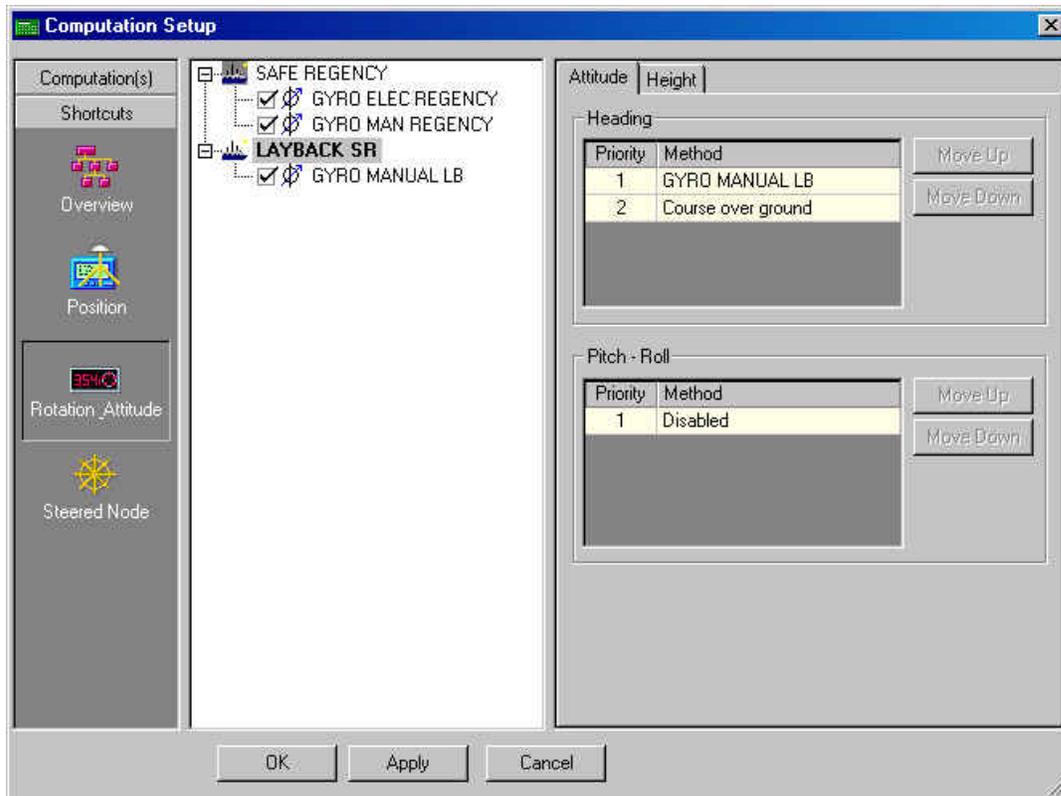
Shorcuts - Position



Todo debe estar referenciado al receptor GPS, apareciendo para cada objeto todos sus sistemas de posición.

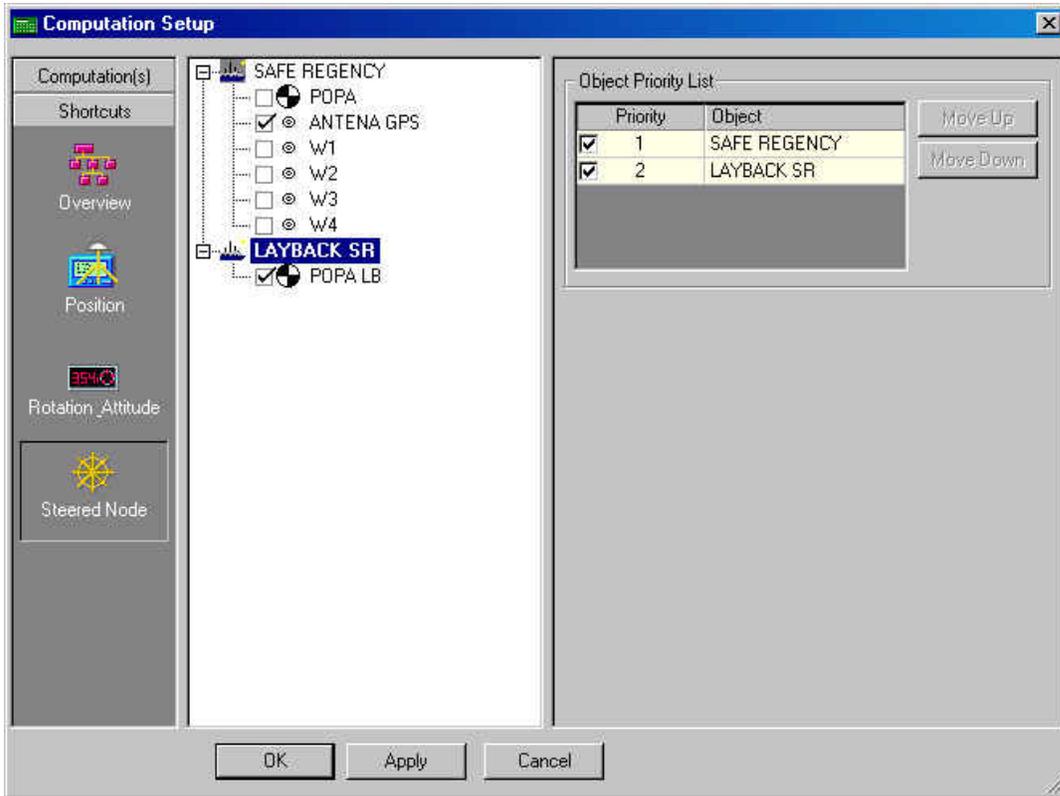
Es importante que en COG Value, para casa objeto, se encuentre el Gyro Manual.

Shorcuts - Rotation Attitude



en esta ventana para cada objeto se encuentran todos los sistemas de Gyros and Compases dados de alta en la base de datos. En la parte derecha de esta venta, puede cambiarse para cada uno de los objetos la prioridad de los gyros, de acuerdo a las necesidad es que se tengan para realizar el trabajo.

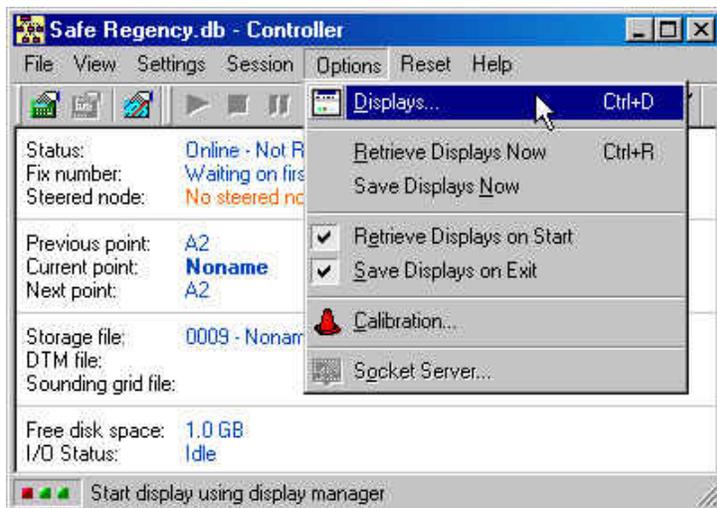
Shortcuts - Steered Node



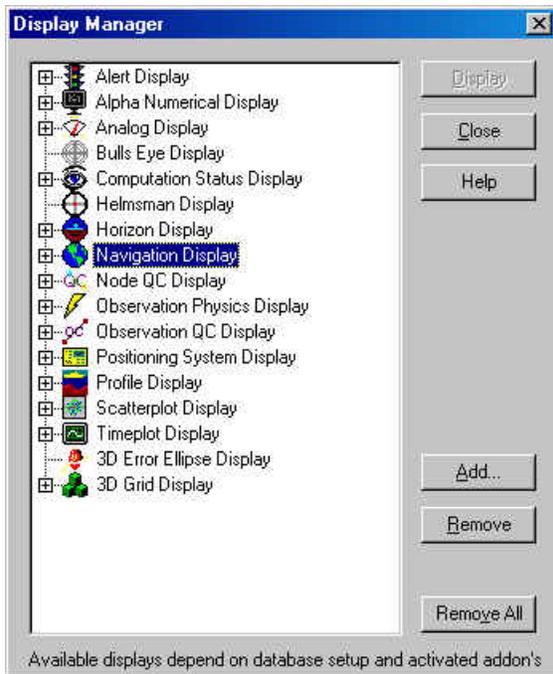
Se da de alta para cada objeto el nodo de interés por ejemplo para la embarcación principal damos de alta el nodo en donde se encuentre la antena receptora GPS, mientras que para un remolcador, en este caso virtual o layback es importante dar de alta el nodo de la popa.

Displays

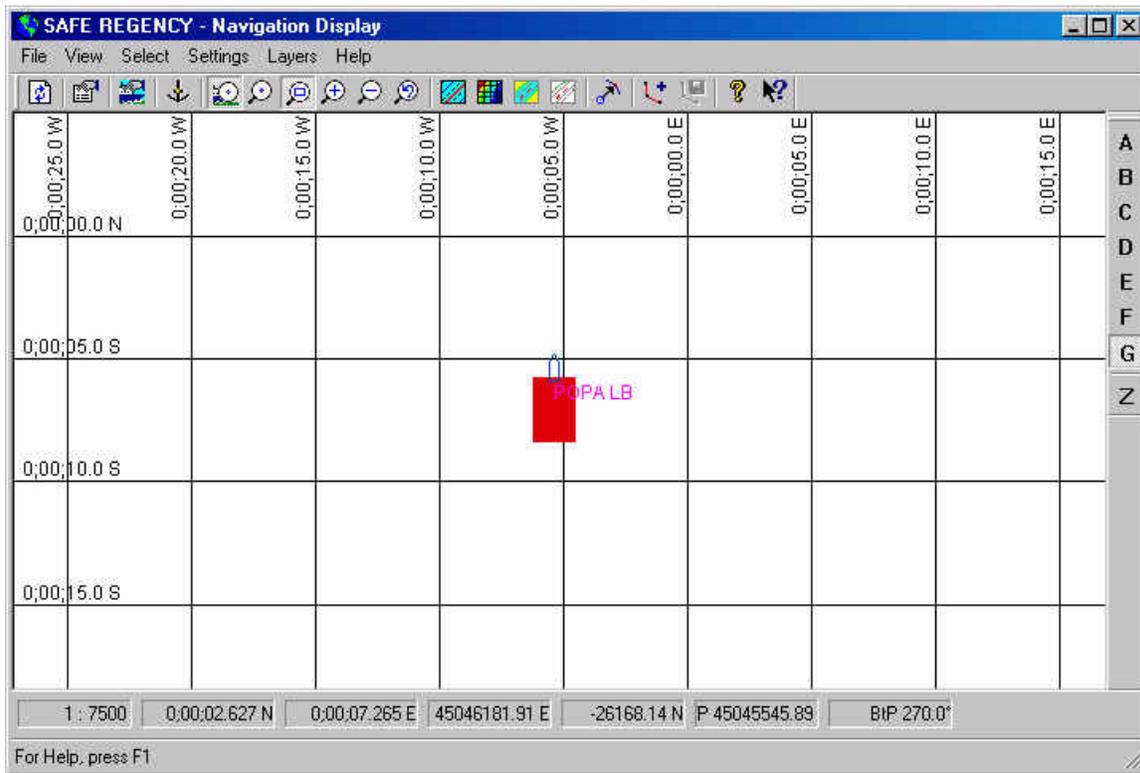
Para crear los displays. Desde El controller menú Options > Displays (Ctrl+D).



Displays de Navegación

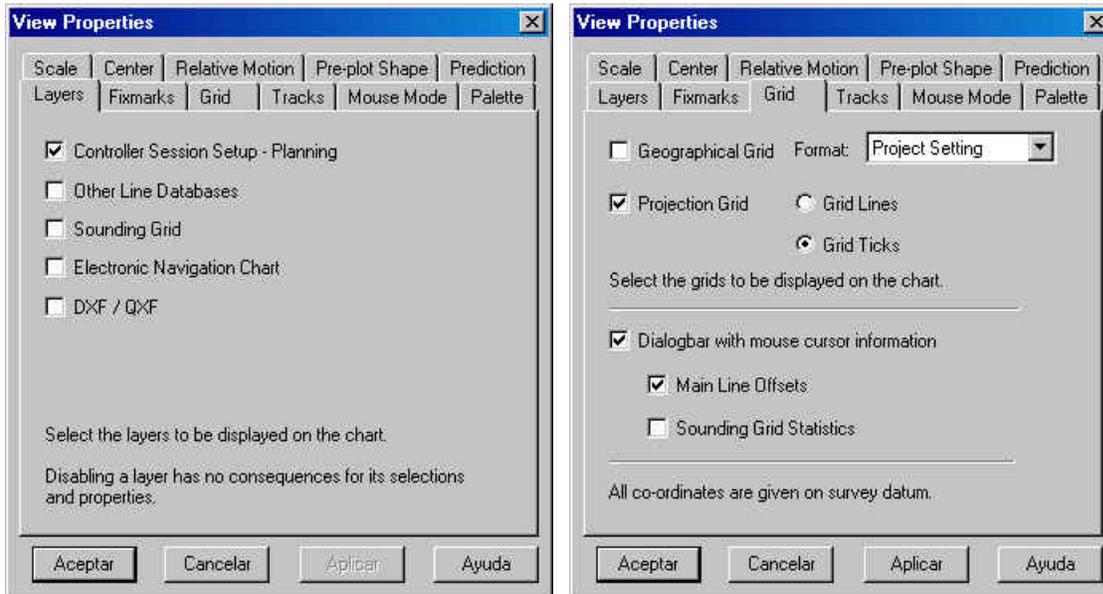


Una vez creado para nuestra base de datos, el display de navegación es una ventana con menú y barra de herramientas, en la cual posteriormente deberán aparecer desplegados a nuestra vista los objetos creados en la base de datos.

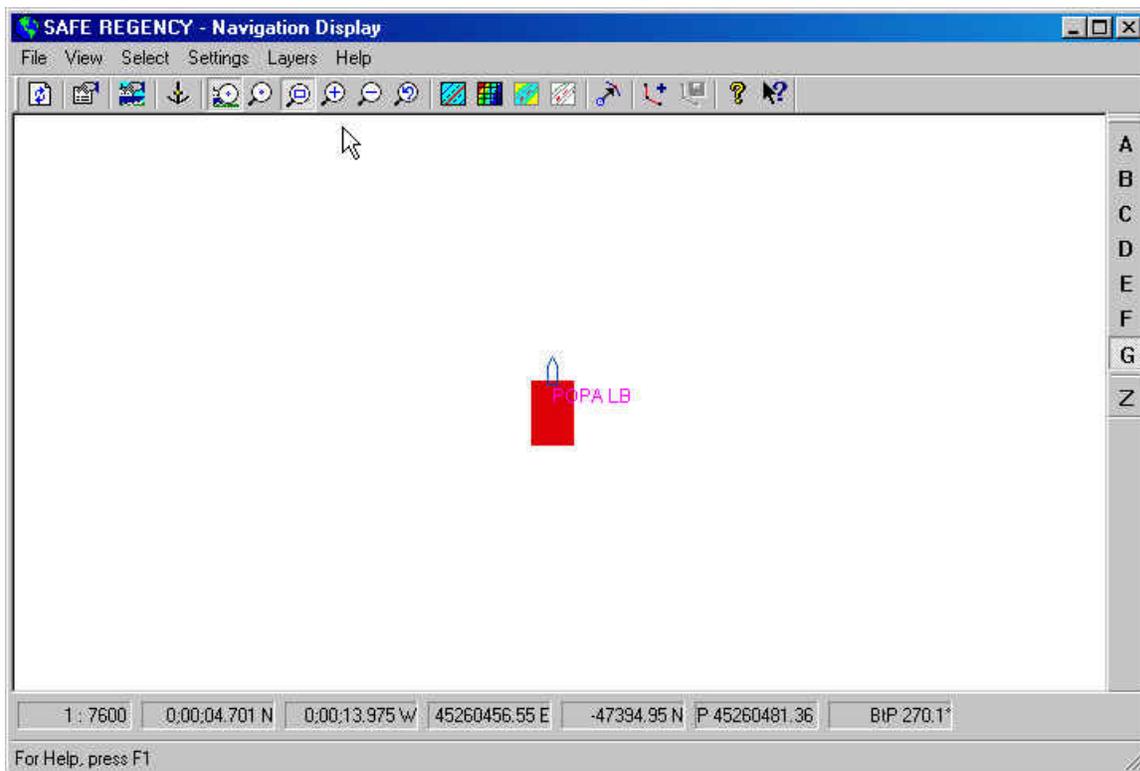


Como puede observarse, el display muestra de entrada los objetos creados. La embarcación principal y el remolcador (layback). Las coordenadas mostradas son geográficas y el grid está en forma de cuadrícula. Para fines de nuestros trabajos habrá que cambiar estas dos condiciones, convirtiendo a coordenadas rectangulares (x,y) o UTM y el desplegado a solo puntos (ticks). Esto se hace desde Navegation Display menú View > Properties.

Aparece la venta de View Properties donde se seleccionan las opciones mostradas en las siguientes imágenes.

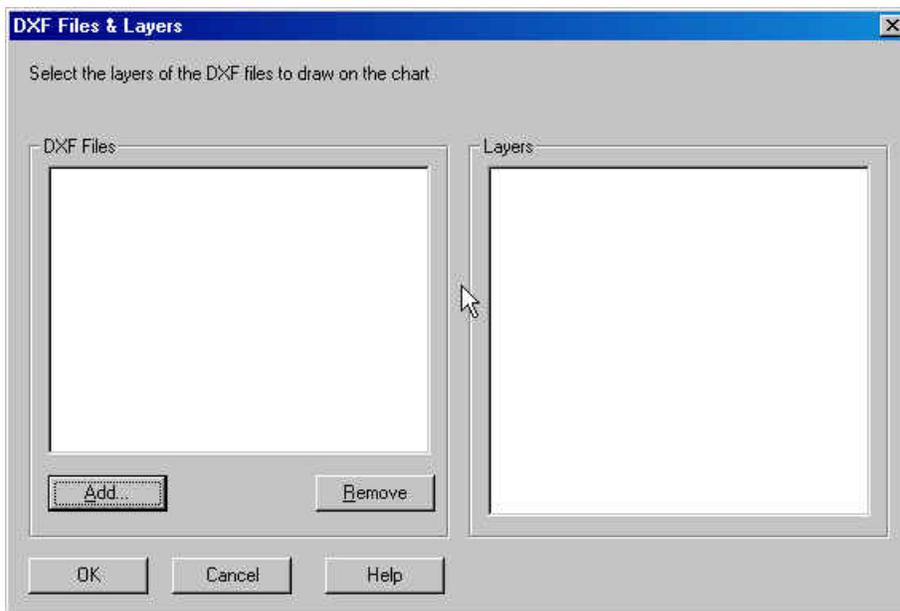


El display de navegación deberá verse de la siguiente manera:

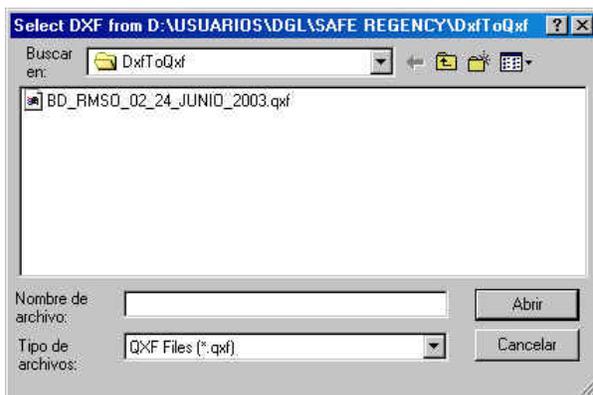


Es importante darnos cuenta que los objetos están desplegados de acuerdo a la señal GPS recibida y que por lo tanto el punto de coordenadas (x,y)-(latitud,logitud)-(este,norte) en el que aparecen, corresponde al punto actual en el que se encuentre instalado el sistema GPS en la embarcación principal.

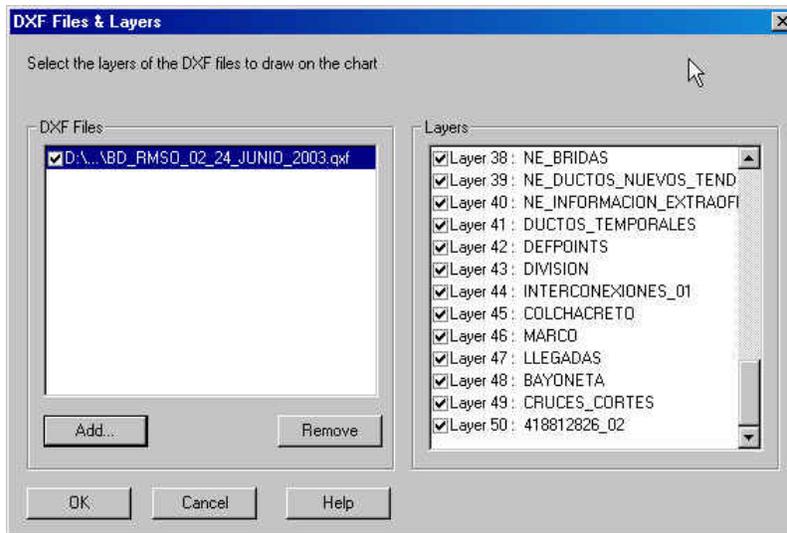
Para continuar, habrá que desplegar la red de ductos y líneas correspondientes a la RMSO del complejo de la sonda de Campeche, la cual debe ser la más actual posible y convertida a un archivo QXF. Esto se hace desde Navigation Display menú Layers > DXF/QXF (Ctrl+D). Aparece la siguiente ventana:



Para agregar un archivo se da clic en Add y aparece la siguiente ventana:



Se selecciona el archivo y se abre.



En esta ventana se puede hacer una revisión de todo el dibujo y los elementos que serán desplegados. Se seleccionan todos los elementos (Layers).

El display de navegación deberá lucir de la siguiente manera (siempre de acuerdo a la señal GPS que se recibe).

Navigation Display

En estos momentos tenemos desplegados en el display los elementos más importantes necesarios para realizar un trabajo de posicionamiento.

Notas:

Para hacer visibles todos los nodos dados de alta de cada objeto, habrá que acceder al menú del Display de Navegación Select > Vessel y dar de alta los nodos requeridos. Es importante que siempre estén dados de alta en la lista Track Object y Show Node Labels. Los objetos pueden ser activados o desactivados (Enable/Disabled).

En la ventana de View Properties existe un menú de funciones para el Display de Navegación. Las más usadas son:

Scale: para cambiar la escala del display. Los iconos de la derecha (ABCDEFGZ) permiten distintas vistas de la escala.

Center: Coordenadas centrales en el momento actual del display de navegación

Grid: Cambio en el formato de las coordenadas, etc.

Mouse Mode: permite adaptar diferentes funciones al mouse (Zoom, Center, etc.).

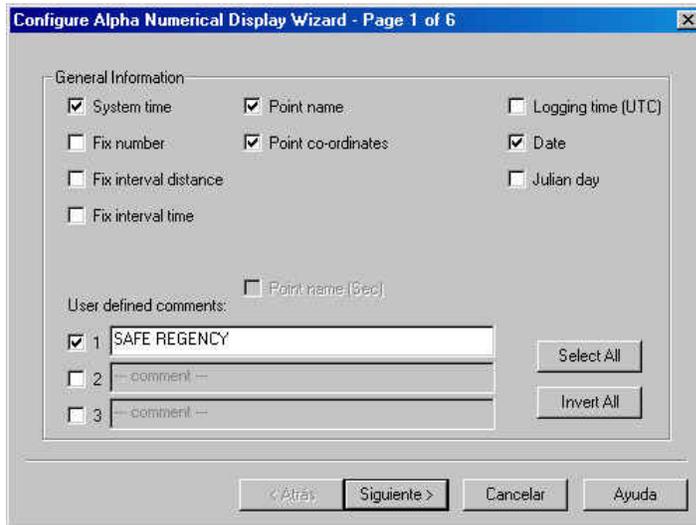
Display Alfanumérico



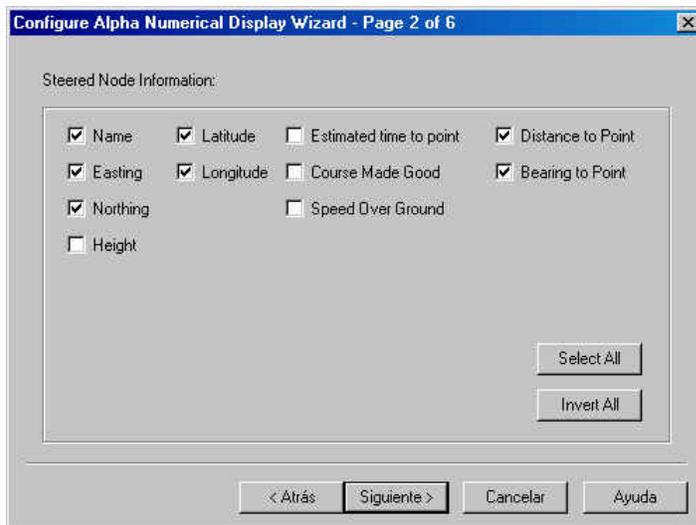
Es el complemento del display de Navegación. Se deberá crear uno para cada objeto (embarcación) que lo requiera.

Para crear los es desde Display Manager > Alpha Numerical Display > Add. Se asigna un nombre acorde a la embarcación para la cual es creado el display.

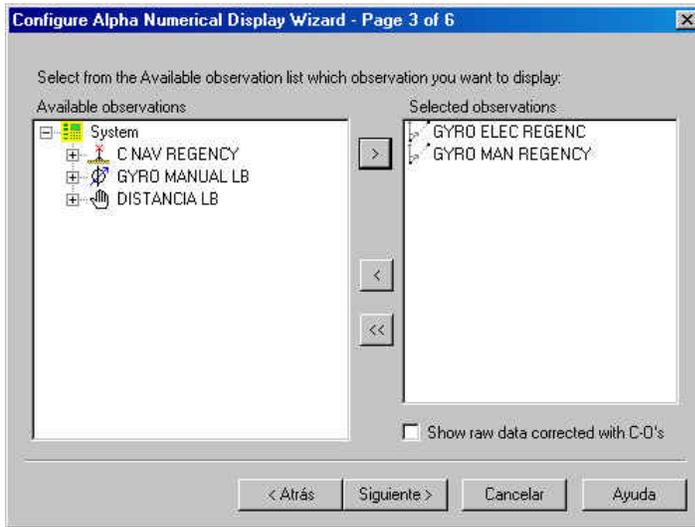
Aparece una secuencia de ventanas en la cual se configura el display alfanumérico.



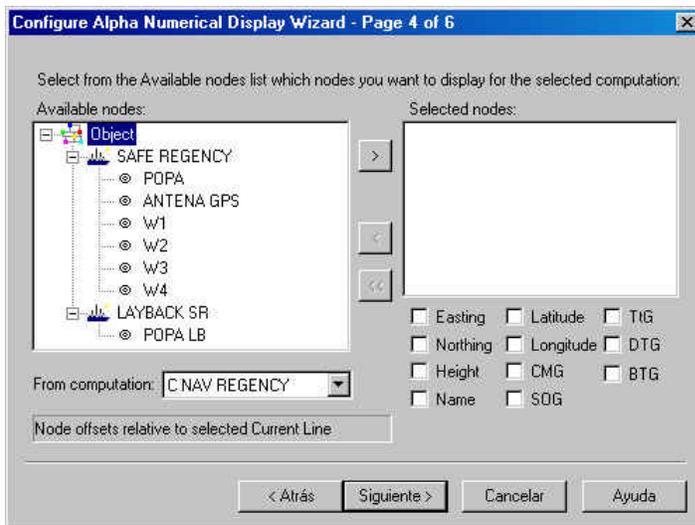
Es importante dar de alta el sistema horario (será dado por el sistema), el nombre del punto (destino), las coordenadas de éste punto, la fecha (dada por el sistema). Se puede además teclear el título del display (nombre de la embarcación).



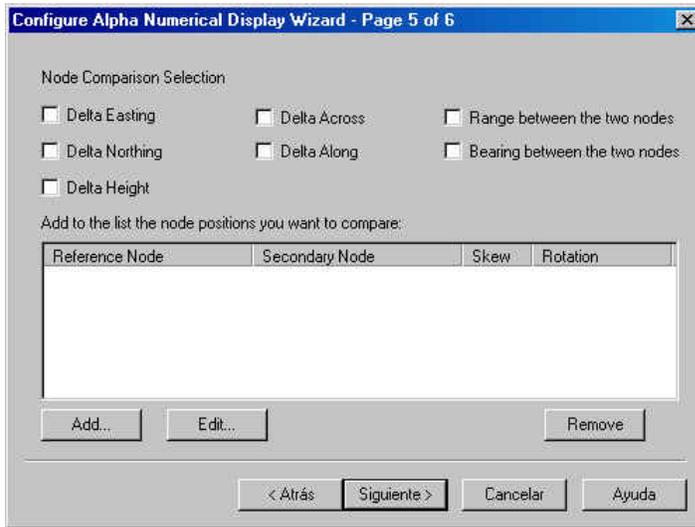
En esta ventana se da de alta información del nodo de referencia de objeto en cuestión. Este nodo es dado por default, como aquel en el que se encuentra la antena GPS (para la embarcación principal). Habrá que dar de alta su nombre, ubicación (tanto coordenadas geográficas, como UTM), así como el DTG (distancia desde dicho nodo, al punto destino) y el BTG (Rumbo desde dicho nodo al punto destino).



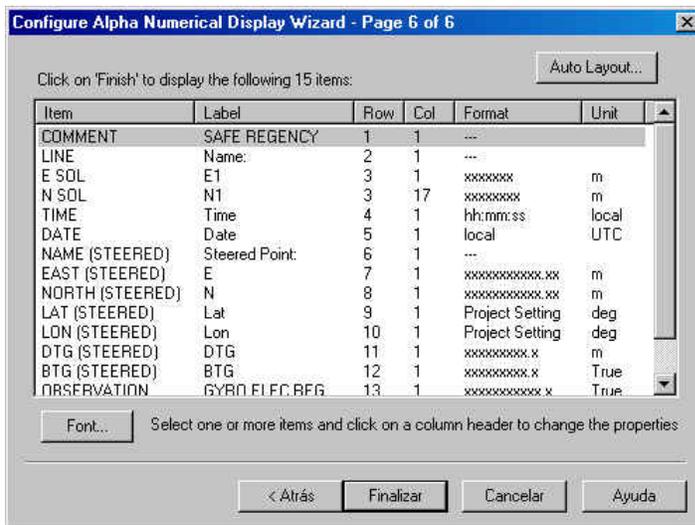
En esta ventana se da de alta el sistema para el cual se requiere información desplegada en el alfanumérico que estemos creando para cada uno de los objetos. Por lo general son más importantes los Gyro Electrónico y en ocasiones manual, este último sobretodo para remolcadores.



En esta ventana, por cada objeto de nuestra base de datos puede darse de alta un nodo diferente, si así se requiere, al Steered Node con sus respectivos datos (ubicación geográfica y UTM, DTG y BTG). Estos datos pueden desplazar a los del Steered Node o aparecer en el display alfanumérico como información adicional.

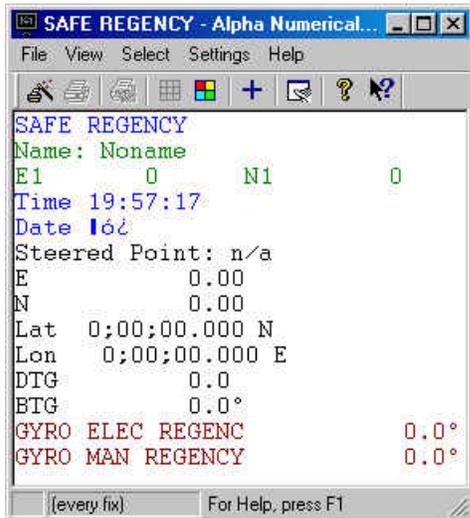


Esta ventana no contiene datos relevantes para nuestro trabajo. Se pasa a la siguiente.



En esta ventana se enlistan todos los datos que hemos dado de alta en nuestro display alfanumérico para cada objeto.

Una vez finalizada la configuración, el Display Alfanumérico mostrará la información dada de alta. El siguiente es un Display Alfanumérico típico para una embarcación principal



Notas:

Este display, puede aparecer con menú y barra de herramientas. Estas se desactivan desde el Menú View.

La información en este display puede ser modificada dando clic en el icono con el signo +.

Line Data Manager

Para el trazo de entidades tales como puntos, líneas y rutas sobre el display de navegación es necesaria la operación de este programa auxiliar. Se accesa desde Qinsy Console.

El trazo de estas entidades es un proceso necesario para llevar a cabo un trabajo de posicionamiento de embarcaciones.

Esto se hace desde Line Data Manager en la pantalla de trabajo > Menú Edit, > points, > lines, > routes, según se desee.

Points:

puntos o targets son lugares con coordenadas (UTM o geográficas) predeterminadas, que constituyen un destino para una embarcación. Por ejemplo, para una plataforma semisumergible, un punto constituye el lugar en donde fondear o llevar una de sus anclas. Para una plataforma autoelevable un punto es el destino al cual será transportada y sobre el cual deberá posicionarse el pozo de exploración. Para un barco de buceo un punto es el lugar donde deberá bajar la canastilla del buzo.

Para su trazo en el Line Data, el usuario deberá acceder al Menú Edit > Points. Aparecerá una ventana de edición, en la parte inferior de esta se entra en Modify > Add. Aparece otra ventana en donde se pregunta el número de puntos a crear, su color y el Layer.

Con esto, se tiene acceso a otra ventana en la cual se editan los puntos. Nombre y coordenadas para cada punto, así como radios de circunferencia (en metros). El Layer deberá ser Surveylines.

En este punto se podrán observar los puntos en el display de navegación.

El archivo de puntos deberá ser salvado con el mismo direccionamiento que la base de datos.

Lines:

Líneas son la unión de dos puntos previamente determinados. Muchas veces son usadas solo como referencia.

Para su trazo se entra al menú Edit > Lines. Se presenta la ventana de edición de líneas y se da clic en Modify > Add. Parece una ventana donde se pide el número de líneas, su color y el layer.

En la siguiente ventana es la de edición de líneas. Aquí se asigna el nombre a cada línea así como las coordenadas de los puntos extremos que definen la línea. La longitud y el azimut aparecen automáticamente al dar los valores anteriores. Se guardan las líneas.

Rutes:

Ruta es la unión de varios puntos, predeterminados a través de líneas, es decir, el punto final de una línea es el inicial de la siguiente, y así sucesivamente.

Son de uso común en los traslados de plataformas autoelevables en donde se tiene grandes distancias y exista una castidad considerable de líneas por cruzar, las cuales es conveniente evitar.

Para su trazo se entra en Edit > Rutes. Aparece una ventana de edición y se hace clic en Modify > Add. Aparece una ventana en donde se pide el número de rutas, es decir el número de segmentos de línea que la conformarán. Al finalizar se tiene acceso a la ventana de edición de rutas. Para cada segmento de ruta habrá que teclear un nombre y sus coordenadas. Se debe tomar en cuenta que el punto final para un segmento de línea es el inicial para el siguiente.

Se guarda la Ruta.

Notas:

Para realizar cambios en el archivo de dibujo en Line Data Manager, se tiene que abrir, File > Open.

Las entidades creadas pueden ser editadas desde el Display de Navegación (desde el menú de herramientas)

Una vez trazada y guardada nuestra entidad, habrá que **darla de alta** para poder trabajar con ella sobre el display de navegación. Para esto habrá que ir al menú del controlador Settings > Session Setup > Planning. Se presenta una ventan, la cual se encuentra dividida en dos partes, la izquierda en la que pueden contenerse una variedad de puntos y líneas y/o rutas pertenecientes a otros archivos, mientras que en la parte derecha deberán encontrarse las entidades con las que nos interesa trabajar. El usuario puede trasladar a una y otra parte las entidades como le convenga.

Cuando se acaba de crear una entidad, no aparece en ninguna de estas partes, por lo que es necesario agregarla. Se da Clic en + Linedatabase > Add.

Las entidades deberán quedar dadas de alta en la parte de la derecha de la ventana de Planning. En esta parte no deberá encontrarse ninguna otra entidad más que aquellas con la que vamos a trabajar.

En esta ventana se pueden agregar o remover las entidades con las cuales de va a trabajar.

En este punto la entidad o entidades seleccionadas deberán verse e la pantalla de navegación.

El siguiente paso es **activar la entidad** de interés. Desde la pantalla de navegación Menú Layers> Line Database aparece una ventana en donde se da clic en File > Add. Se selecciona el archivo con la entidad de interés > Open. En la ventana aparecerán datos de alta tanto el archivo que elegimos, como cada una de las entidades que lo contienen > Apply > Close. De al misma forma se remueven entidades.

Si queremos que una o más entidades no aparezcan en el display de navegación, así como el dar de alta una nueva, barra que repetir el proceso en el controlador.

VIII.3 METODOLOGÍA

Debido a la necesidad PEMEX Exploración y Producción por cubrir la demanda de producción y distribución de hidrocarburos, ha mantenido una tendencia al incremento de infraestructura para la exploración, explotación, transporte y manejo de estos hidrocarburos en la Sonda de Campeche.

Este incremento de infraestructura ha impactado de una manera relevante el tráfico marino que había en la zona, el cual también se ha visto reflejado por el incremento en números de Barcos DP, Barcazas de Construcción, Plataformas de Perforación, Plataformas Semisumergibles y demás embarcaciones que prestan diversos servicios requeridos por la industria petrolera.

El aumento en él tráfico marino aumenta la probabilidad de que existan percances o colisiones con las estructuras fijas aéreas o submarinas en las actividades de fondeo, acercamiento o amarres a dichas estructuras.

Con la finalidad de proteger de manera segura la integridad de las instalaciones marinas y evitar los riesgos de posibles accidentes durante la ejecución de los diversos trabajos que este tipo de embarcaciones realiza en el área de plataformas de la Sonda de Campeche, se esta utilizando el posicionamiento de embarcaciones con sistemas de posicionamiento global diferencial por satélite DGPS.



El personal involucrado en las actividades de posicionamiento de barcos DP por lo general es el siguiente:

- ✘ Capitán
- ✘ Supervisores de Contrato en tierra
- ✘ Supervisores de P.E.P. a bordo
- ✘ Supervisor de Posicionamiento
- ✘ Ing. Posicionador

Para realizar este tipo de posicionamiento, se debe seguir los siguientes pasos:

1. La subgerencia que requiera el apoyo del personal y equipo de posicionamiento deberá realizar una solicitud de manera oficial a la subgerencia de inspección y mantenimiento de Ductos con cuatro días hábiles de anticipación para el inicio de las operaciones de embarcación.

2. La subgerencia de inspección y mantenimiento de Ductos, girara instrucciones al Ing. Supervisor de contrato en tierra. y a su vez informara a su supervisor a bordo.
3. El supervisor de posicionamiento da instrucciones al representante de la Compañía encargada del servicio de posicionamiento.
4. Se prepara personal y equipo.
5. Se procede al traslado de personal y equipo, a la embarcación a posicionar.
6. El Ing. Posicionador instala el equipo en la embarcación, interconectando los diferentes sistemas.
7. Se introduce al sistema de navegación los detalles de la ubicación del punto o de los puntos donde es requerido el posicionamiento, así como las dimensiones y puntos relevantes de la embarcación.
8. Se verifica por el supervisor de posicionamiento el funcionamiento del equipo.
9. El supervisor de posicionamiento aprueba o realiza las observaciones correspondientes de los puntos donde se posicionara el barco.
10. Antes de iniciar maniobras el capitán informara a Control Marino la posición actual y del destino así como el tiempo estimado de maniobras.
11. Inicia la maniobra de posicionamiento durante la cual se mantendrá una estrecha comunicación entre el supervisor de posicionamiento, El Ing. Posicionador y el capitán de la embarcación y este a su vez con el personal de maniobras y de buceo.
12. El Ing. Posicionador operador del sistema despliega en pantalla al Capitán la embarcación y las instalaciones submarinas, en donde podrá observar de manera continua la distancia y rumbo para poder quedar sobre el punto.
13. Al momento de llegar punto requerido, el capitán informara al Ing. Posicionador quien registrara el evento.

14. Una vez posicionada la embarcación, el capitán informara a Control Marino el fin de las maniobras de la posición final de la embarcación informándole además de que inicia maniobras de buceo con la finalidad de que este a su vez informe a las embarcaciones que navegan en las cercanías, tengan la precaución al aproximarse con la finalidad de sé proteger tanto al personal de buceo como alas instalaciones submarinas de P.E.P.
15. Al mismo tiempo el Supervisor de Posicionamiento o Ing. Posicionador avisara a Posicionamientos Marinos informándole de la posición final proporcionando las coordenadas UTM (NAD 27) y Geográficas de la embarcación.
16. Se imprime la gráfica correspondiente a la posición definitiva de la embarcación, firmando el documento el Representante del Cliente, el Ingeniero Posicionador y el Capitán, dicho documento deberá contener:

Gráfica final de la posición de la embarcación.

Coordenadas UTM y geográficas de los puntos de interés.

Nombre de la embarcación.

Área de trabajo.

El Azimut de la embarcación en grados.

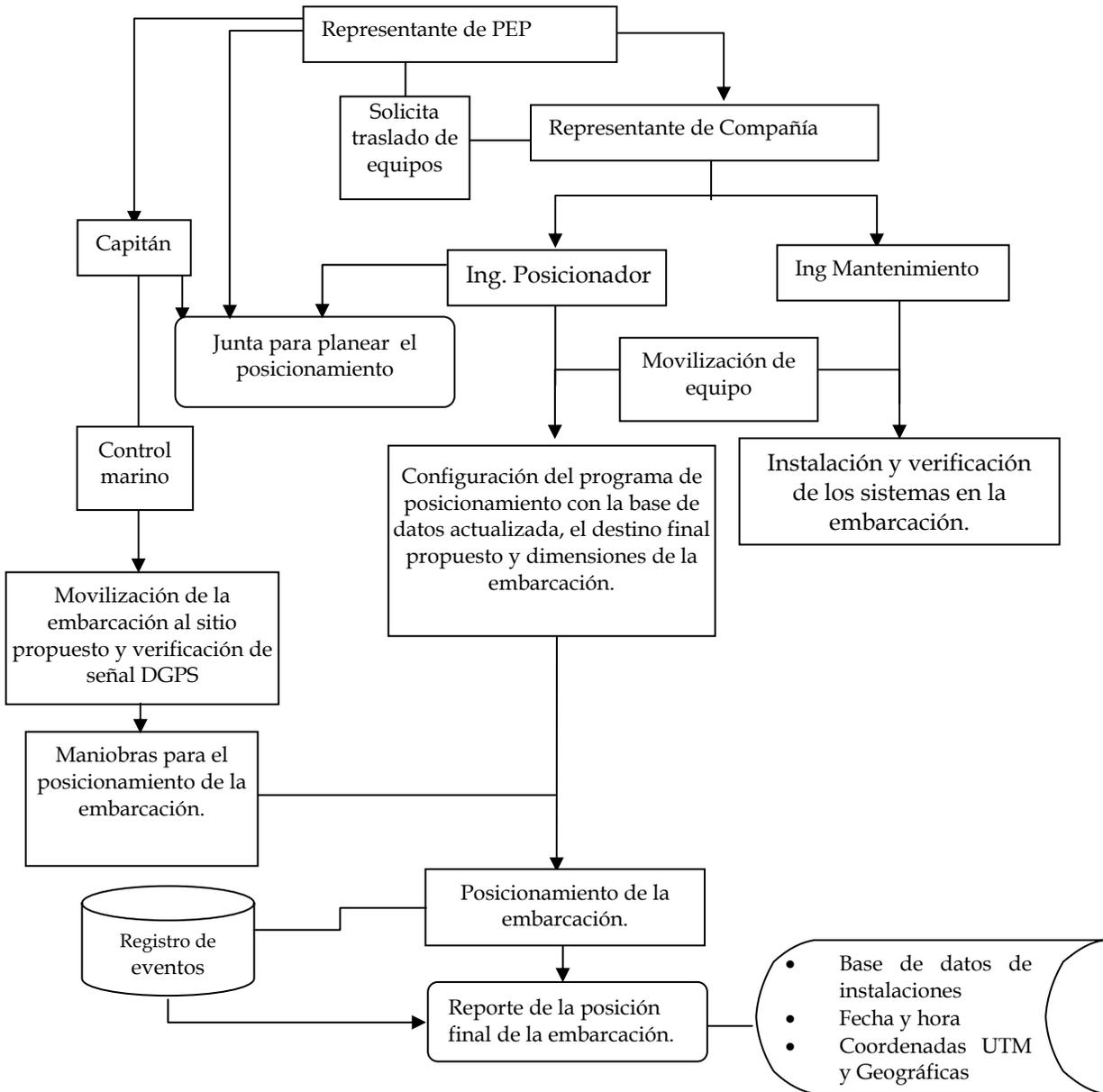
Fecha y hora.

Nombre y firma del Representante del Cliente.

Nombre y firma del Posicionador.

Nombre y firma del Capitán de la embarcación.

DIAGRAMA DE FLUJO



Este es el resultado de todo el proceso que se realiza como Ing. Posicionador (Survey), que va desde el montaje del equipo, configuración hasta obtener un reporte como el siguiente, en el cual se lleva el registro todos los eventos efectuaron durante el día, así como las graficas, estas nos indican la posición final de la embarcación, fecha y hora, coordenadas UTM (NAD 27) y Geográficas y azimut de la embarcación.



Oceanografía S.A. de C.V.

FECHA:	27 de Agosto de 2007	EMBARCACION:	B.P.D. "CABALLO AZTECA"	
CLIENTE:	PEMEX P.E.P.	LOCALIZACIÓN:	POL-A / BOYA DE RECALADA	
CONTRATO:	PEP-O-IE-504/05	REPORTE No.	83	
OBRA:	"PROCURA Y CONSTRUCCIÓN DE GASODUCTO DE 36"Ø x 56.0 KM DE LA PLATAFORMA ENLACE LITORAL AL COMPLEJO POL-A"		HOJA	1/2

BITACORA

HORARIO	REPORTE DE POSICIONAMIENTO
00:00-03:15	B.P.D. "CABALLO AZTECA" CONTINUA Y TERMINA TRANSITO HACIA PLATAFORMA POL-A.
03:15-03:35	B.P.D. "CABALLO AZTECA" EN MANIOBRAS DE ACERCAMIENTO A PLATAFORMA POL-A / PERFORACIÓN.
03:35-04:00	B.P.D. "CABALLO AZTECA" POSICIONADO A 20 MTS AL "E" DE LA PLATAFORMA POL-A / PERFORACIÓN. EN COORDENADAS: X= 578,427.34 Y= 2,127,079.66 Az=223.6°; CON RESPECTO A LA POPA. EN MOVIMIENTO DE PERSONAL.
04:00-05:15	B.P.D. "CABALLO AZTECA" INICIA Y FINALIZA MOVIMIENTO A PUNTO DE BUCEO.
05:15-15:35	B.P.D. "CABALLO AZTECA" POSICIONADO A 30 MTS AL "SE" DE LA PLATAFORMA POL-A / ENLACE. EN COORDENADAS: X= 578,471.21 Y= 2,127,128.11 Az=141.3°; CON RESPECTO A LA POPA. EN OPERACIONES DE BUCEO.
15:35-15:45	B.P.D. "CABALLO AZTECA" INICIA Y FINALIZA MOVIMIENTO DE ACERCAMIENTO A PLATAFORMA POL-A / PERFORACIÓN.
15:45-16:10	B.P.D. "CABALLO AZTECA" POSICIONADO A 18 MTS AL "E" DE LA PLATAFORMA POL-A / PERFORACIÓN. EN COORDENADAS: X= 578,417.59 Y= 2,127,13.40 Az=201.1°; CON RESPECTO A LA POPA. EN MOVIMIENTO DE PERSONAL.
16:10-16:30	B.P.D. "CABALLO AZTECA" EN MANIOBRAS DE SEPARACIÓN DE LA PLATAFORMA POL-A / PERFORACIÓN.
16:30-22:25	B.P.D. "CABALLO AZTECA" INICIA Y FINALIZA TRANSITO HACIA ÁREA DE FONDEADERO DE CD. CARMEN CAMPECHE, POR PRONOSTICO DE MAL TIEMPO.
22:25-24:00	B.P.D. "CABALLO AZTECA" LOCALIZADO A 9.8 M.N. AL "NE" DE LA BOYA DE RECALADA EN COORDENADAS: X= 622,858.87 Y= 2,085,047.81 Az=41.8°. EN ESPERA DE QUE MEJOREN LAS CONDICIONES METEORÓLOGICAS.

REPRESENTANTE DE PEMEX	REPRESENTANTE DE OCEANOGRAFÍA.
ING. JOSE HUMBERTO VERA AVILA	ING. HOMERO TERAN VANOYE
POSICIONADOR DE OCEANOGRAFÍA	POSICIONADOR DE OCEANOGRAFÍA
ING. GUSTAVO PIMENTEL LÓPEZ	ING. KARIM LUGO GUERRERO

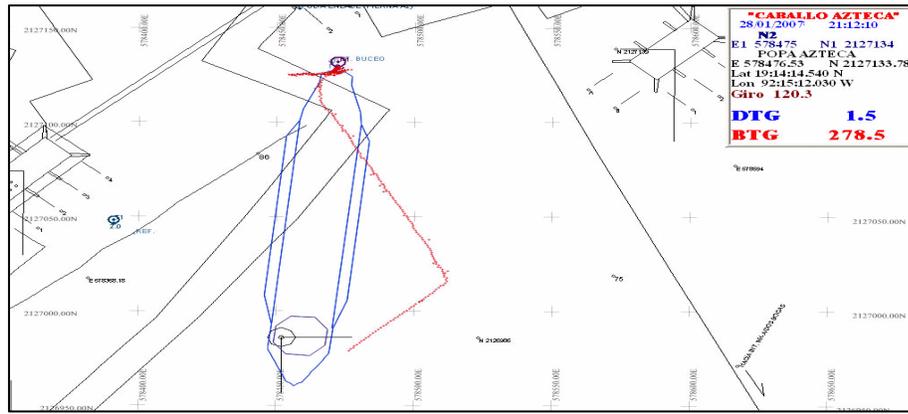


Oceanografía, S.A. De C.V.

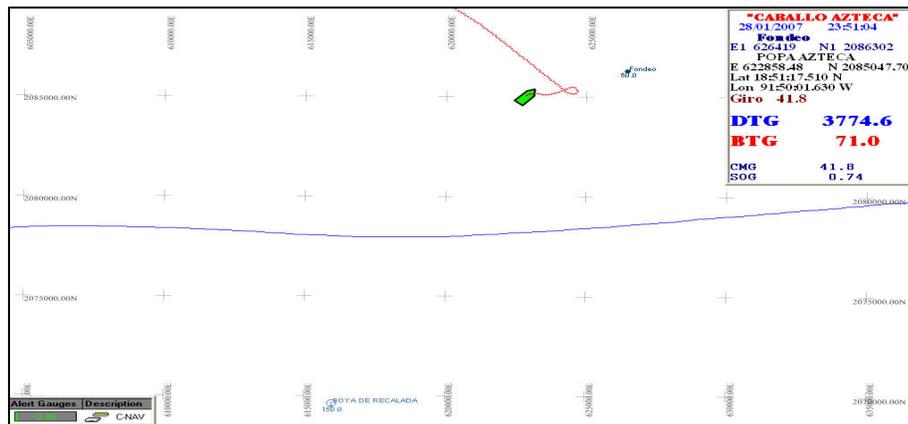
FECHA:	27 de Agosto de 2007	EMBARCACIÓN:	B.P.D. "CABALLO AZTECA"
CLIENTE:	PEMEX P.E.P.	LOCALIZACIÓN:	POL-A / BOYA DE RECALADA
CONTRATO:	PEP-O-IE-504/05	REPORTE No.	83
OBRA:	"PROCURA Y CONSTRUCCIÓN DE GASODUCTO DE 36"Ø x 56.0 KM DE LA PLATAFORMA ENLACE LITORAL AL COMPLEJO POL-A"		HOJA 2/2

REPORTE GRÁFICO

POSICIONADO A 30 MTS AL "SE" DE LA PLATAFORMA POL-A / ENLACE



POSICIONADO A 9.8 M.N. AL "NE" DE LA BOYA DE RECALADA



REPRESENTANTE DE PEMEX	REPRESENTANTE DE OCEANOGRAFIA.
ING. JOSE HUMBERTO VERA AVILA	ING. HOMERO TERAN VANOYE
POSICIONADOR DE OCEANOGRAFIA	POSICIONADOR DE OCEANOGRAFIA
ING. GUSTAVO PIMENTEL LÓPEZ	ING. KARIM LUGO GUERRERO

CONCLUSIÓN

El impacto de la Topografía y Geodesia se observa en campos del conocimiento y la tecnología, con efectos directos en el terreno económico-social. Posibilita una mayor y mejor información sobre el territorio, lo cual permite mejorar diversos aspectos de la producción de cartografía, la actualización catastral, el manejo de aguas superficiales y subterráneas, la producción agropecuaria, el desarrollo de infraestructura (camino, represas, etc.) entre otros.

En los trabajos que requieren posicionamiento planimétrico de puntos de la superficie terrestre, el sistema de posicionamiento global mediante satélites (GPS: Global Positioning System) ha logrado imponerse mundialmente por la alta precisión en los resultados obtenidos y la rapidez y bajo costo de operación, ya que supone uno de los más importantes avances tecnológicos de las últimas décadas. Diseñado inicialmente como herramienta militar para la estimación precisa de posición, velocidad y tiempo, se ha utilizado también en múltiples aplicaciones civiles. Por razones de seguridad, las señales GPS generadas para uso civil se someten a una degradación deliberada, al tiempo que su emisión se restringe a una determinada frecuencia. A pesar de ello, las aplicaciones civiles siguen proliferando a un ritmo exponencial gracias a la incorporación de las técnicas diferenciales DGPS.

Desde del inicio operacional en la Región Marina de la Sonda de Campeche del Golfo de México, Petróleos Mexicanos ha mantenido una tendencia en el incremento de la infraestructura para la exploración, explotación, transporte y manejo de hidrocarburos, lo que hizo prioritario y absolutamente indispensable el contar con equipos y sistemas que permitieran conocer con precisión, la ubicación de cada una de las instalaciones que se han construido, causando mayor grado de dificultad los ductos y válvulas que se encuentran en el lecho marino, debido a las condiciones físicas adversas del medio.

Este incremento de infraestructura ha impactado de una manera relevante en el tráfico marino que había en la zona, viéndose reflejado por un mayor número de Barcos, Barcazas de Construcción, Plataformas de Perforación, Plataformas Semisumergibles y demás embarcaciones que prestan diversos servicios requeridos por la industria petrolera.

Gracias a la incorporación de sistemas de posicionamiento global diferencial por satélite DGPS ha sido posible el crecimiento del área de Plataformas Marinas y por ende se protege de manera segura la integridad de las instalaciones marinas y se evitan los riesgos de posibles accidentes durante la ejecución de los trabajos como lo son: Estabilizado de Líneas Submarinas, Reacondicionamiento de Cruces, Reforzamiento del Sistema de Protección Catódica, entre muchos más que se ejecutan en la Sonda de Campeche.

TERMINOLOGÍA MARINA

A

Acoderar: Amarrar una embarcación por medio de coderas a las bitas del muelle de una plataforma, otra embarcación o instalación portuaria terrestre.

Ancla: Accesorio de hierro de forma caprichosa, con ganchos, de diferente peso que al dejarse caer desde cualquier embarcación por su propio peso se entierra, sirven para asegurar la posición de embarcaciones de diferentes tipos.

Arrejeramiento: Es la acción que realiza el barco después de fondear sus anclas y dar marcha atrás hacia la estructura fija.

Aproar: Dirigir la embarcación en una dirección indicada hacia la proa. Ir hacia delante (avanzar).

B

Babor: Lado izquierdo del casco de una embarcación, estando parado sobre la embarcación con él frente a la proa.

Bitas: Poste o par de postes fijos sobre la cubierta de una embarcación o del muelle de una estructura fija que sirven para amarrar los cabos.

Boya: Cuerpo cilíndrico flotante de acero que sirve para señalar la ubicación en donde se encuentra un ancla. O bien para señalar la ubicación de una válvula, cruce o interconexión que se encuentre cerca y pueda ser colisionada por una plataforma autoelevable.

C

Cabo: Cuerda gruesa de hilos torcidos, utilizada generalmente para el amarre de embarcaciones.

Chaser: Gancho de acero forjado, que va fijo al extremo de un orinque. Se utiliza para recuperar el ancla de una embarcación cuando esta no cuenta con orinque o boya de señalamiento. También es utilizada para sostener el cable del ancla cuando se va a rolar sobre una tubería perpendicular a esta y exista riesgo de que exista contacto entre el cable y la tubería submarina. Existen varios tipos, el más recomendado es el tipo "j".

Cobrar: Acción de tirar de una cuerda o cable para recogerlos.

Control Marino: Dependencia de la superintendencia de transporte marítimo de Petróleos Mexicanos que se ubica en Cd. Del Carmen, Camp. , Dos Bocas, Tab. , Y en la plataforma Eco-1, y realiza la función de facilitar la fluidez del tráfico marítimo y trata de evitar cualquier tipo de riesgos a toda embarcación que transita en el área de plataformas de la Sonda de Campeche.

E

Empulguera: Costura que se hace a un cabo para formar una gaza.

Encapillar: Afirmary un cabo por medio de una gaza en una bita.

Enfilary: Poner la proa a un punto determinado.

Eslingay: Pedazo de cabo o cable de acero delgado en cuyos extremos hay una empulguera.

Esloray: Longitud total de una embarcación de proa a popa.

Estribor: Lado derecho del casco de una embarcación, estando parado sobre la embarcación con él frente a la proa.

Estrobo: Cabo o cable de acero con gasa en sus extremos, que se usa para subir o bajar equipos y materiales.

Estructura Marina Fijay: Instalación costa afuera pilotada en el lecho marino. Existen de varios tipos, trípodos, tetrápodos, octópodos, etc.

F

Faltar: Romperse los cabos o cables que tienen amarrado algún objeto.

Filar: Soltar lentamente la cadena del ancla.

Fondear: Dejar caer el ancla para que el buque quede posicionado girando alrededor de esta.

G

Garrear: Acción de un buque fondeado que al haber mucho viento, marejada o corriente es arrastrado con todo y ancla.

Grillete: Arco de acero con un ojo en cada uno de sus extremos por los cuales entra un pasador que se sujeta con una chaveta, sirve para unir dos tramos de cable, cadenas, orinque, etc.

I

Izar: Hacer subir algo.

L

Lascar: Acción de aflojar una sogá o cable.

Levar: Acción de virar la cadena o cable del ancla para desprender esta del lecho marino.

M

Malacate o Winche: Máquina con uno o varios tambores sobre los cuales se enrolla un cabo, cable o cadena para jalar, bajar o levantar objetos pesados (anclas, tubería, etc.)

Manga: Ancho máximo de una embarcación de babor a estribor.

Marejada: Agitación del mar por el viento que genera olas.

O

Orinque: Cadena o cable de acero que une el ancla con la boya de señalamiento. Su longitud deberá estar en función del tirante de agua en donde se pretende fondear el ancla.

P

Pasteca: Polea abierta por uno de sus lados que sirve para pasar el cable del ancla de una embarcación, comúnmente se utiliza como apoyo para recuperar un ancla que no cuenta con su respectiva boya de señalamiento.

Pendura (a la): Expresión que significa que un ancla se encuentra a plomo, sin tocar el lecho marino.

Popa: Parte trasera del casco de una embarcación.

Proa: Parte delantera del casco de una embarcación.

R

Remolcador: Barco pequeño de gran potencia en sus máquinas y notable maniobrabilidad, utilizado para remolcar y empujar a las embarcaciones mayores, así como en apoyo para el fondeo o levado de anclas.

Rig Mover: Profesional marítimo responsable del movimiento de una plataforma autoelevable.

Rolado de un ancla: Maniobras en las que un remolcador recibe el ancla de una embarcación mayor, hace tránsito en dirección y distancia previamente establecidas, para posteriormente dejarla caer en el lecho marino (fondearla).

S

Swivel: Eslabón giratorio de acero usado en la unión de cable y cadena para el ancla.

T

Tip: Parte inferior de la zapata de una plataforma autoelevable.

Z

Zapata: Chapa o ensanchamiento que se encuentra en la parte inferior de cada pierna de una plataforma autoelevable. Cuando esta abarca las tres piernas, se le denomina Mat.

DEFINICIONES

A

Achatamiento: Relativo a los Elipsoides.

$$f = (a-b)/a = 1-(1-e^2)^{1/2}$$

donde a ... semi-eje mayor

b ... semi-eje menor

e ... excentricidad

Acimut: Ángulo horizontal, medido en el sentido de las manecillas del reloj, a partir de una dirección (como el Norte).

Almanaque: Conjunto de datos crudos de las órbitas de los satélites, empleados para calcular la posición, hora de salida, elevación y acimut de los mismos.

Altura Elipsoidal: Distancia vertical de un punto sobre el elipsoide.

Altura Geoidal: Véase Ondulación Geoidal

Altura Ortométrica: Distancia de un punto sobre el geoide, medido a lo largo de la vertical del punto (altura sobre el nivel medio del mar). Véase también Elevación.

Ambigüedad: Número entero de ciclos desconocidos de la fase portadora reconstruida, presentes en una serie de mediciones continuas, de un solo paso de satélite en un mismo receptor.

Ángulo Cenital: Ángulo vertical con un valor de 0° sobre el horizonte y 90° directamente sobre el usuario.

Ángulo de Elevación: Ángulo de elevación mínima por debajo del cual el sensor no rastrea ningún satélite GPS.

Anti-spoofing (A-S): Código P encriptado (para formar el código Y).

B

Banda L: Banda de frecuencia de radio que se extiende desde los 390 Mhz hasta los 1550 MHz. Las frecuencias de las fases portadoras de las bandas L1 y L2, transmitidas por los satélites GPS, quedan dentro de esta banda L.

C

Cambio Doppler: Cambio aparente en la frecuencia de una señal recibida debido al rango de cambio del intervalo entre el transmisor y el receptor.

Canal Cuadrático: Canal receptor GPS que multiplica por sí misma la señal recibida para obtener una segunda armónica de la fase portadora que no contiene el código de modulación.

Canal Receptor: Frecuencia de radio y hardware digital, así como el programa en un receptor GPS, requeridos para rastrear la señal de un satélite GPS en una de las dos fases portadoras del sistema.

CEP: Polo Celestial de Efemérides.

Chip: Intervalo de tiempo de un cero o de un uno en un código de pulso binario.

CIO: Origen Convencional Terrestre.

Círculo Máximo: Término empleado en navegación. Es la forma más corta de conectar dos puntos.

CIS: Sistema Inercial Convencional.

Código: Sistema empleado para comunicación en el que a ciertas cadenas de ceros y unos, elegidos arbitrariamente, se les asignan significados definidos.

Código C/A: Es el Código de Adquisición Cruda que se envía en la señal L1 de GPS. Este código es una secuencia de modulaciones pseudoaleatorias bifásicas binarias de 1023 MHz en la banda de GPS con una modulación de 1.023 MHz, y presenta un período de repetición de un milisegundo.

Código P: Código preciso GPS con una secuencia muy larga (aproximadamente 1014 bit) de modulaciones pseudoaleatorias binarias bifásicas en la fase portadora GPS en un intervalo de chips de 10.23 MHz, que no se repiten a sí mismas durante 267 días. Cada segmento semanal del código P es único para cada satélite GPS, y se cambia también cada semana. El acceso al código P se restringe a usuarios autorizados por el gobierno de los E.U.

Código Seudoaleatorio del Ruido (PRN): Cualquier grupo de secuencias binarias que parecen tener una distribución aleatoria como el ruido, pero que en realidad se pueden distribuir de manera ordenada. La propiedad más importante de los códigos PRN es que la secuencia tiene un valor mínimo de autocorrelación, excepto en un retraso de cero.

Código Y: Versión encriptada del código P, que se transmite mediante un satélite GPS al activarse el modo anti-spoofing.

Comparación del Retraso: Técnica mediante la cual el código recibido (generado por el reloj del satélite) se compara con el código interno (generado por el reloj del receptor) y este último se adapta en tiempo hasta que se igualen los dos códigos.

Configuración de los Satélites: Estado o condición de la constelación de satélites en un momento determinado, con relación a un usuario o a un grupo de usuarios.

Constante Gravitacional: Constante de proporcionalidad en la ley de Gravitación de Newton. $G = 6.672 \cdot 10^{-11} \text{ m}^3\text{s}^{-2}\text{kg}^{-1}$

Constelación de Satélites: Disposición en el espacio de todo el grupo de satélites de un sistema, como el de GPS.

Coordenadas Cartesianas: Coordenadas de un punto en el espacio, dadas en tres dimensiones perpendiculares (x, y, z) a partir del origen.

Coordenadas Geodésicas: Coordenadas que definen un punto en relación a un elipsoide. Las coordenadas geodésicas pueden emplear valores de latitud, longitud y altura elipsoidal o coordenadas cartesianas.

CTS: Sistema Terrestre Convencional.

CTP: Polo Convencional Terrestre.

D

Datos Compactados: Datos crudos compactados cada determinado intervalo de tiempo (tiempo de compactación) para formar una sola observación (medición), para su posterior registro.

Datos Crudos: Datos GPS originales, registrados y grabados por un receptor.

Datos de Mensaje: Mensaje incluido en la señal GPS que informa de la ubicación del satélite, las correcciones del reloj y la salud. Se incluye también información general de las condiciones de otros satélites de la constelación.

Datum Geodésico: Modelo matemático diseñado para ajustarse lo mejor posible a una parte o a la totalidad del geoide. Se define por un elipsoide y la relación que existe entre este y un punto sobre la superficie topográfica, establecido como el origen del datum. Dicha relación se establece por medio de seis cantidades, generalmente (aunque no necesariamente): la latitud y longitud geodésica y la altura del origen, los dos componentes de la deflexión de la vertical en el origen y el acimut geodésico de una línea que va desde el origen hacia cualquier otro punto.

Deflexión de la vertical: Ángulo formado por la normal al elipsoide y la vertical (línea de plomada). Generalmente se calcula como un componente en el meridiano y un componente perpendicular al mismo.

DGPS: GPS Diferencial. Término que se aplica comúnmente para designar a un sistema GPS que emplea correcciones de código diferencial para obtener una precisión de posición entre 0.5 - 5m.

Día Sidéreo: Intervalo de tiempo entre dos tránsitos superiores sucesivos del equinoccio Vernal.

Día Solar: Intervalo de tiempo entre dos tránsitos superiores sucesivos del sol.

Dilución de la Precisión (DOP): Descripción de la contribución (puramente geométrica) a la incertidumbre para fijar una posición. El factor DOP indica la fortaleza geométrica de la constelación de los satélites en el momento de la medición. Los términos estándar empleados en GPS son:

GDOP coordenadas de posición tridimensional más el retraso del reloj

PDOP tres coordenadas

HDOP dos coordenadas horizontales VDOP únicamente altura

TDOP únicamente retraso del reloj HTDOP posición horizontal y hora

Disponibilidad Selectiva (SA): Degradación de la precisión de la posición puntual para los usuarios civiles establecida por el Departamento de Defensa de los E.U.. El SA se introduce como degradación del reloj o de la órbita de los satélites GPS.



ECEF: (Earth Centered - Earth Fixed). Tierra Centrada y Tierra Fija, véase también CIS.

Efemérides: Lista de posiciones o ubicaciones de un objeto celeste en función del tiempo.

EGNOS: European Geostationary Navigation Overlay Service.

Elementos Orbitales Keplerianos: Permiten la descripción de cualquier órbita astronómica:

- a: semi-eje mayor
- e: excentricidad
- w: argumento de perigeo
- W: ascensión recta del nodo
ascendente
- i: inclinación
- n: anomalía verdadera

Elevación: Altura sobre el Geoide. Véase Altura Ortométrica.

Elipsoide: En Geodesia, a menos que se especifique otra cosa, figura matemática formada al hacer girar una elipse alrededor de su eje menor (a veces se le denomina también esferoide). Dos elementos definen un elipsoide: generalmente se dan a conocer como la longitud del semi-eje mayor a y el achatamiento f .

Elipsoide Local: Elipsoide que se ha definido para ajustarse lo mejor posible a una parte específica de la Tierra. Generalmente, los elipsoides locales se ajustan para un país o un cierto grupo de países.

EOP: Parámetros de orientación de la Tierra.

Época: Instante fijo y particular de tiempo, empleado como punto de referencia en una escala temporal.

EPSG: European Petroleum Survey Group.

ERP: Parámetros de rotación de la Tierra.

Error de las Efemérides: Diferencia entre la ubicación actual del satélite y la ubicación predicha por los datos orbitales de satélite (efemérides).

Error Multitrayectoria: Error de posicionamiento, resultante de la interferencia entre las ondas de radio que han viajado entre el transmisor y el receptor por dos trayectorias de diferente longitud de onda.

Estimación por mínimos cuadrados: Proceso de estimación de parámetros desconocidos que se efectúa minimizando la suma de los cuadrados de los residuales de una medición.

Excentricidad: Distancia desde el centro de una elipse hacia el foco de su semi-eje mayor. $e = (1 - b^2/a^2)^{1/2}$
donde a y b son el semi-eje mayor y semi-eje menor, respectivamente, de la elipse.



Fase Observable: Véase Fase Portadora Reconstruida

Fase Portadora Reconstruida: Diferencia entre la fase de la fase portadora GPS recibida y con variación Doppler y la fase de una frecuencia de referencia nominalmente constante, generada en el receptor.

Frecuencia de Fase Portadora: Frecuencia de la salida fundamental no modulada de un radiotransmisor. La frecuencia de la fase portadora GPS en L1 es de 1575.42 MHz y en L2 es de 1227.60 MHz.

Frecuencia Fundamental: La frecuencia fundamental empleada en GPS es de 10.23 MHz. Las frecuencias de fase portadora en L1 y L2 son múltiplos enteros de la frecuencia fundamental.

L1 = 154F = 1575.42 MHz

L2 = 120F = 1227.60 MHz

Frecuencia Resultante: Cualquiera de las dos frecuencias adicionales obtenidas al combinar las frecuencias de dos señales. Las frecuencias resultantes son iguales a la suma o la diferencia de las dos señales originales, respectivamente.

Frecuencia Resultante de Portadora: Fase de la señal que permanece cuando la señal de portadora, proveniente del satélite, choca contra la frecuencia constante generada en el receptor.

G

GAST: Tiempo sideral aparente de Greenwich.

GDOP: Dilución de la Geometría de la precisión.

Geocéntrico: Relacionado con el centro de la Tierra.

Geodesia: Ciencia que estudia el tamaño y la forma de la Tierra.

Geoide: Superficie equipotencial que coincide con el nivel medio del mar, el cual se extendería imaginariamente a lo largo de toda la superficie terrestre de no existir los continentes. Esta superficie es perpendicular en todos los puntos a la fuerza de gravedad.

GLONASS: Global Navigation Satellite System. (Sistema Global de Navegación por Satélite).

GMO: Observatorio Principal de Greenwich.

GPS: Sistema de Posicionamiento Global

Gradícula: Cuadrícula plana que representan las líneas de Latitud y Longitud de un elipsoide.

H

Hora Local: La hora local es igual al tiempo medio de Greenwich + huso horario.

Huso Horario: Huso Horario = Hora Local - Tiempo medio de Greenwich (GMT). Nótese que el Tiempo medio de Greenwich es aproximadamente el mismo que el Tiempo GPS.

I

IAN: Unión Internacional de Astronomía.

IERS: Servicio Internacional de rotación de la Tierra.

Inclinación: Ángulo formado entre el plano orbital de un objeto y un plano de

referencia (por ejemplo, el plano ecuatorial).

Intervalo de Chips: Número de chips por segundo (por ejemplo, código C/A : $1.023 \cdot 10^6$ cps).

ITRF: International Terrestrial Reference Frame. Marco Internacional de Referencia Terrestre.



Latitud: Ángulo entre la normal al elipsoide y el plano ecuatorial. Tiene un valor de cero sobre el ecuador y de 90° en los polos.

Levantamiento Estático: El término Levantamiento Estático se emplea en conjunción con el sistema GPS para todas las aplicaciones de levantamientos no cinemáticos. Lo anterior incluye los siguientes modos de operación:

- ✘ Levantamiento Estático
- ✘ Levantamiento Estático Rápido

Levantamiento Estático Rápido: Término empleado en conjunción con el sistema GPS para levantamientos estáticos con períodos cortos de observación.

Línea Base: Longitud del vector tridimensional entre un par de estaciones en las que se han registrado simultáneamente datos GPS y se procesan con técnicas diferenciales.

Línea de Rumbo: Término empleado en navegación. Trayectoria entre dos puntos con rumbo constante.

Longitud: Es el ángulo que se forma entre el meridiano de Greenwich y el meridiano que pasa por el punto en cuestión. Por lo tanto, tendrá un valor de 0° en Greenwich y se mide hacia el este o el oeste, con valores máximos de 180° en un sentido y otro.

Longitud de Banda: Medición del ancho del espectro de una señal (representación del dominio de la frecuencia de una señal) expresada en Hertz.

M

Mediciones Diferenciales: Las mediciones GPS se pueden diferenciar entre receptores, entre satélites o a lo largo de un cierto tiempo. Aunque existen varias combinaciones posibles, por convención las mediciones de fase GPS se diferencian en el orden aquí descrito: primero entre los receptores, después entre los satélites y por último a lo largo del tiempo. Una medición de una diferencia (entre receptores) consiste en la diferencia instantánea de fase de la señal recibida, medida simultáneamente, por dos receptores que observan el mismo satélite. Una medición de doble diferencia (entre receptores y satélites) se obtiene al hacer la diferencia entre la medición de una diferencia para un satélite con respecto a la correspondiente medición de una diferencia del satélite de referencia elegido. Una medición de triple diferencia (entre receptores, satélites y tiempo) se obtiene al hacer la diferencia entre una medición de doble diferencia en una época y la misma medición en una época distinta.

Modo Cuadrático de Recepción: Método empleado para la recepción de señales GPS en L2, que duplica la fase portadora y no emplea el código P.

Modulación Binaria Bifásica: Cambio de fase de 0° o de 180° (para representar 0 o 1 en binario, respectivamente) en una fase portadora constante. Se pueden modelar por medio de: $y = A \cos (wt + p)$, donde la función de amplitud A es una secuencia de valores +1 y -1 (para representar los cambios de fase de 0° y 180° respectivamente). Las señales GPS son señales bifásicas moduladas.

MTSAT: Satellite Based Augmentation System.

Meridiano: Línea imaginaria que une el polo sur con el polo norte y pasa por el ecuador a los 90°.

N

NAVSTAR: Acrónimo de Navigation System with Time and Ranging, nombre original del sistema GPS.

NMEA: Del Inglés: National Marine Electronics Association. que define señales eléctricas, protocolos de transmisión de datos, tiempos y formatos de frases para transmitir datos de navegación entre diversos instrumentos de navegación marítima. Es el formato estándar de salida para datos de tiempo y posición de equipos GPS, el cual se emplea en diversas aplicaciones.

Ondulación Geoidal: Distancia de la superficie del elipsoide de referencia al

geoide, medida a lo largo de la normal al elipsoide.

P

PDOP: Dilución de la precisión de la Posición. Véase Dilución de la Precisión.

PEMEX: Petróleos Mexicanos.

P.E.P: Pemex Exploración y Explotación.

Posicionamiento de un ancla: Determinar en tiempo real con el apoyo de un sistema de posicionamiento, la ubicación de un ancla al ser fondeada o levada.

Posicionamientos Marinos: Oficina de la Superintendencia de Inspección y Mantenimiento a Ductos, con base en el área de plataformas, que sirve de enlace entre las embarcaciones y las oficinas de P.E.P. en Cd. del Carmen. El canal de radio VHF en el cual trabaja es el 14.

Portadora: Onda de radio que tiene por lo menos una característica (por ejemplo, frecuencia, amplitud o fase) que puede modificarse por modulación a partir de un valor conocido de referencia.

Posicionamiento Cinemática: Determinación de una serie de tiempo o de coordenadas para un receptor móvil. Cada serie de coordenadas se determina a partir de una sola muestra de datos y se generalmente se calcula en tiempo real.

Posicionamiento Diferencial: Determinación de coordenadas relativas entre dos o más receptores que rastrean simultáneamente las mismas señales GPS.

Posicionamiento Puntual: Reducción independiente de observaciones efectuada por un receptor en particular, empleando la información de pseudorangs transmitida por los satélites.

Posicionamiento Relativo: Véase Posicionamiento Diferencial

Post proceso: Proceso de calcular posiciones en tiempo no real, empleando datos previamente colectados por receptores GPS.

Proyección Conforme: Proyección cartográfica en la que se conservan los ángulos sobre el elipsoide después de ser proyectados sobre el plano.

Proyección Lambert: Proyección cónica conforme que proyecta un elipsoide sobre una superficie plana, utilizando un cono sobre una esfera como figuras de referencia.

Proyección Transversa de Mercator: Proyección cilíndrica conforme que se basa en un cilindro que envuelve a la Tierra.

R

Rango: Término empleado en navegación para referirse a la longitud de la trayectoria entre dos puntos. Normalmente, esta trayectoria es el círculo máximo o la línea de rumbo.

Rango de Error del Usuario (UERE): Contribución al rango de medición del error de una fuente individual de error, convertida en unidades del rango, asumiendo que la fuente de error no está relacionada con el resto de las fuentes de error.

Retraso de la Propagación Atmosférica: Retraso de tiempo que afecta a las señales de los satélites, debido a la ionosfera y troposfera, que son capas atmosféricas de la Tierra.

Retraso de la Propagación: Véase Retraso de la propagación atmosférica y Retraso Ionosférico.

Retraso del Reloj: Diferencia constante en la lectura de la hora en dos relojes.

Retraso Inosférico: La propagación de una onda a través de la ionosfera (que es un medio heterogéneo y dispersante), experimenta un retraso. El retraso de la fase depende del contenido de electrones y afecta las señales de la fase portadora. El retraso de grupos depende también de la dispersión de la ionosfera y afecta la modulación de las señales (códigos). El retraso de la fase y de los grupos es de la misma magnitud pero de signo contrario.

RINEX: Siglas de Receiver INdependent EXchange format. Conjunto de definiciones y formatos estándar para promover el libre intercambio de datos GPS.

RTCM: Siglas de Radio Technical Commission for Maritime services. Comisión establecida para definir un radio enlace diferencial de datos para retransmitir mensajes de corrección GPS a partir de una estación de control a los usuarios en campo.

RTK: Siglas de Real Time Kinematic. Término empleado para describir el proceso mediante el cual, se resuelven las ambigüedades de fase en el receptor GPS, de manera que ya no es necesario el post-proceso.

Rumbo: Término empleado en navegación para describir el ángulo entre una dirección de referencia (por ejemplo, norte geográfico, norte magnético, norte de cuadrícula) y la trayectoria.

S

Salto de Ciclo: Discontinuidad de un número entero de ciclos en la medición de señal de fase portadora, que resulta de una pérdida temporal de la señal de satélites GPS.

Segmento de Control: Equipo en tierra del sistema GPS operado por el gobierno de los E.U. que rastrea las señales de los satélites, determina sus órbitas y transmite las definiciones de las mismas a la memoria de los satélites.

Segmento Espacial: Parte del sistema GPS que se encuentra en el espacio, es decir, los satélites.

Segmento Usuario: Parte del sistema GPS que comprende los receptores de las señales GPS.

Servicio de Posicionamiento Estándar (SPS): Nivel de precisión en el posicionamiento de un punto obtenido con GPS, basado en el código C/A de una frecuencia.

Servicio de Posicionamiento Preciso (PPS): Nivel más alto de precisión de posicionamiento puntual, proporcionado por el sistema GPS. Se basa en el código P de doble frecuencia.

Sesión de Observación: Período de tiempo en el cual se registran datos GPS en forma simultánea por dos o más receptores.

Seudolite: Estación GPS terrena diferencial que transmite una señal con estructura similar a la de un satélite GPS.

Seudorango: Medición del tiempo de propagación de la señal aparente de un satélite a una antena receptora, referido en distancia dividida entre la velocidad de la luz. El tiempo de propagación aparente es la diferencia entre el momento de la recepción de la señal (medido en el receptor) y el tiempo de emisión (medido por el satélite). El seudorango difiere del intervalo actual por la influencia del reloj del satélite contra el reloj del usuario.

Sitio: Punto en el que se establece un receptor para determinar coordenadas.

Superficie Equipotencial: Superficie definida matemáticamente en la cual el potencial de gravedad es el mismo en cualquier punto. Un ejemplo de esta superficie lo constituye el geoide.



Tiempo GPS: Sistema de tiempo continuo basado en el Tiempo de Coordenadas Universales (Coordinated Universal Time (UTC)) del 6 de enero de 1980.

Tiempo medio de Greenwich (GMT): Tiempo medio solar del Meridiano de Greenwich. Se emplea como base para establecer el tiempo o la hora estándar a nivel mundial.

Tiempo Universal: Tiempo medio solar local en el Meridiano de Greenwich

UT: Abreviatura de Tiempo Universal

UT0 UT como se deduce directamente de la observación las estrellas

UT1 UT0 corregido por el movimiento polar

UT2 UT1 corregido para variaciones estacionales de la rotación terrestre

UTC Coordenadas de Tiempo Universal; sistema de tiempo atómico uniforme muy similar al UT2 por correcciones.

Topografía: Forma del terreno de una región en particular.

Transformación: Proceso de transformar coordenadas de un sistema a otro.

Transit: Antecesor del sistema GPS. Sistema de navegación satelital que estuvo en servicio de 1967 a 1996.

Traslocación: Método en el que se emplean datos simultáneos de estaciones separadas para determinar la posición relativa de una estación con respecto a otra. Véase Posicionamiento Diferencial.

U

UTM: Proyección Universal Transversa de Mercator. Es una variante de la proyección Transversa de Mercator. Se divide en diferentes zonas, cada una de 6° de ancho, con un factor central de escala de 0.996. La zona a emplear dependerá de la posición del usuario sobre la Tierra.

V

VLBI: (Very Large Basic Interferometry) Interferometría de largo alcance.

W

WAAS: Wide Area Augmentation System.

WGS 84: Siglas de World Geodetic System 1984. Sistema al cual están referidas todas las mediciones y resultados GPS.

BIBLIOGRAFÍA

Información actualizada de datos históricos, meteorológicos y oceanográficos de la Sonda de Campeche.

Reporte para PEMEX / IMP Oceanweather. noviembre / 1996

Técnicas Modernas en Topografía

A. Banister, S. Raymond & R. Baker. 7ª edición, Alfaomega.

Geodesia

Torge, W.. Edit. Diana Mexico 1983.

GPS Theory and Practice

B. Hofmann & Wellenhof. 1997 Global Positioning System: 2Ed. Springer-Veerlag.

GPS Satellite Surveying

Alfred Leick.

Edit. John Wiley and Sons.

Satellite Geodesy: Foundations, Methods and Applications -

Gunter Seeber.

Edit. Walter De Gruyter.

Understanding GPS: Principles and Applications

Elliot D. Kaplan

Edit. Artech House.

The Global Positioning System : Theory and Applications

Bradford W. arkinson and James J. Spilker. Edit American Institute of Aeronautics and Astronautics.

G. Geodesy.

Bomford, Clarendon Press.

Oxford 1989

www.topografiaglobal.com

www.ineter.gob.ni/Divisiones/Geodesia

<http://recursos.gabrielortiz.com/donaciones.htm>
