



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
FACULTAD DE INGENIERIA**

**TESIS “ANÁLISIS DE LA PRECISIÓN DE LOS SISTEMAS
DGPS”
QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE INGENIERO
TOPÓGRAFO Y GEODESTA**

**Presentado por:
Yasser Abiuth García Sánchez
Irley Karem Vega Bernal**



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA
DIRECCIÓN
FING/DCTG/SEAC/UTIT/065/07

Señores
YASSER ABIUTH GARCÍA SÁNCHEZ
IRLEY KAREM VEGA BERNAL
Presente

En atención a su solicitud me es grato hacer de su conocimiento el tema que propuso el profesor ING. ADOLFO REYES PIZANO, que aprobó esta Dirección, para que lo desarrollen ustedes como tesis de su examen profesional de INGENIERO TOPOGRAFO Y GEODESTA.

"ANÁLISIS DE LA PRECISIÓN DE LOS SISTEMAS DGPS"

- INTRODUCCIÓN
- I. OBJETIVO
- II. GPS
- III. DATUM
- IV. TRANSFORMACIÓN DE COORDENADAS
- V. CÁLCULO DE COORDENADAS GEOCÉNTRICAS
- VI. CONVERSIÓN DE COORDENADAS GEOGRÁFICAS A UTM Y VICEVERSA
- VII. METODOLOGÍA
- VIII. TOMA DE DATOS
- IX. CONCLUSIONES

Ruego a ustedes cumplir con la disposición de la Dirección General de la Administración Escolar en el sentido de que se imprima en lugar visible de cada ejemplar de la tesis el Título de ésta.

Asimismo les recuerdo que la Ley de Profesiones estipula que deberá prestar servicio social durante un tiempo mínimo de seis meses como requisito para sustentar Examen Profesional.

Atentamente
"POR MI RAZA HABLARÁ EL ESPÍRITU"
Cd. Universitaria a 23 de Mayo del 2007.
EL DIRECTOR

MTRO. JOSÉ GONZALO GUERRERO ZEPEDA
GGZ/RSU/gar.

Índice Monográfico

Índice

Introducción

I. G.P.S.

II. Datum

III. Transformación de Coordenadas

IV. Cálculo de Coordenadas Geocéntricas a UTM y
viceversa

V. Metodología

VI. Toma de Datos

Conclusiones

Fuentes de consulta

Introducción:

A través de los años, desde el inicio de la topografía por los egipcios para delimitar parcelas, hasta nuestros días con el uso de los sistemas de posicionamiento global, se ha buscado tener la mejor precisión posible de las mediciones, en un principio, cuando los antiguos delimitaban parcelas, no lo hacían con tan buena precisión, que no era tan necesaria en ese entonces, porque el sistema económico era diferente. Donde si requerían precisión era en las mediciones astronómicas, que las utilizaban para tener una prospección del estado del tiempo a futuro. Por ejemplo, las pirámides egipcias estaban orientadas en ese entonces con ciertas constelaciones, en la parte central de la pirámide existía por lo regular un orificio, donde una estrella iluminaba el fondo sólo cuando era el equinoccio o el solsticio. El solsticio de invierno nos indica el punto más lejano que la tierra puede estar del sol, por tanto ya no puede “empeorar el clima”. Para hacer estas construcciones requirieron tener cierta precisión, de otra forma los resultados esperados no serían los correctos.

A partir de la invención del cálculo diferencial e integral y en específico del infinitesimal, hubo un gran avance en las matemáticas, también en nuestro ramo, en la teoría de los errores. Leibintz y Newton dieron un avance muy significativo en ésta área. Carl Gauss no dio más avances en cuanto a estadística y cálculo del error y del valor más probable.

El método de los mínimos cuadrados es el más utilizado para minimizar los errores, pudiendo utilizar o no el peso para cada medición.

¿ QUÉ ES UN GPS ?

Por sus siglas en ingles GPS (sistema de posicionamiento global), esta constituido por una constelación llamada Navstar que consta de 21 satélites en operación y 3 satélites de reserva. Proporciona una capacidad de precisión en todo el mundo y en todas las condiciones meteorológicas, para aplicaciones en tierra, mar y aire. Las seis orbitas de los satélites circundan la tierra una vez cada 12 horas aproximadamente a una distancia de 10,900 millas náuticas.

Los satélites están posicionados en una orbita, de tal manera que cuando la constelación esta completa, al menos cuatro satélites serán siempre visibles simultáneamente por receptores GPS en cualquier lugar de la superficie o sobre ella, las 24 horas del día. El numero de satélites visibles es importante, porque se necesitan cuatro satélites para que un receptor GPS calcule posición (Longitud, Latitud, Altitud) y tiempo. En 3D o tridimensional.

¿ CÓMO FUNCIONA EL GPS ?

El receptor GPS proporciona actualizaciones constantes de la posición de la antena GPS. Esta información es representada en (Latitud, Longitud, Altitud sobre el elipsoide) y se basa en WGS84. Existen algunos sistemas GPS que proporcionan esta información en otro Datum. Existen GPS que pueden programarse para proporcionar información en coordenadas X,Y sobre una proyección especificada por el usuario.

La señal Navstar actualmente se encuentra abierta para todo usuario que cuente con un receptor GPS en donde proporciona un error de navegación de 100mts aproximadamente y solo el departamento de defensa de los EEUU tienen acceso al código "P" que presenta una precisión de 10mts. Existe la señal Glonas, que pertenecía a la antigua unión soviética.

La exactitud de una posición se puede mejorar de la siguiente manera: Trabajando con dos o más receptores simultáneamente; repetir las mediciones, hacer una serie de mediciones garantizará la calidad estadística.

Para lograr la determinación de una posición con tres satélites sería suficiente, el receptor calcularía la distancia a cada satélite y la intersección de tres esferas nos daría la posición exacta, pero se utiliza el tiempo para calcular la distancia, sabiendo la velocidad de la luz y los errores de refracción cuando entra en la atmósfera de la tierra, sucede que el reloj del receptor es poco exacto (generalmente de cuarzo), se utilizan 4 satélites.

Hay un $\Delta t'$ que será el error en el reloj, cada medición de distancias será afectado por el error $c\Delta t'$, la distancia incorrecta (que incluirá al error) se le llama pseudo-distancia o pseudos-rango.

Para determinar éste error, con los 4 satélites podemos obtener 4 ecuaciones con 4 incógnitas, como sigue:

$$(x - X^i)^2 + (y - Y^i)^2 + (z - Z^i)^2 + (c\Delta t)^2 = R^i$$

Siendo $i = 1,2,3,$ etc si existen más satélites (y por lo tanto mayor precisión según la teoría de errores).

La forma en que el receptor obtiene el tiempo recorrido de la señal entre el satélite y el mismo, es haciendo una réplica del código enviado por el satélite en el receptor, cada satélite tiene su propio código, existen dos códigos el C/A de 1 MHz y el código P de 10 MHz (por lo tanto menos preciso), actualmente están abiertos los dos códigos al público, la diferencia entre el código del satélite y el código del receptor es el tiempo que tardó el código en llegar del satélite al receptor. Los errores de retraso por la ionosfera se calculan cuando se tiene un receptor de doble banda, con la fórmula:

$$dP_{ion} = (f_2^2 / (f_2^2 - f_1^2)) ((L1N1 - L2N2) - (\phi_1 - \phi_2))$$

Pero también se podrá anular utilizando el DGPS.

Podemos resumir los errores, como sigue:

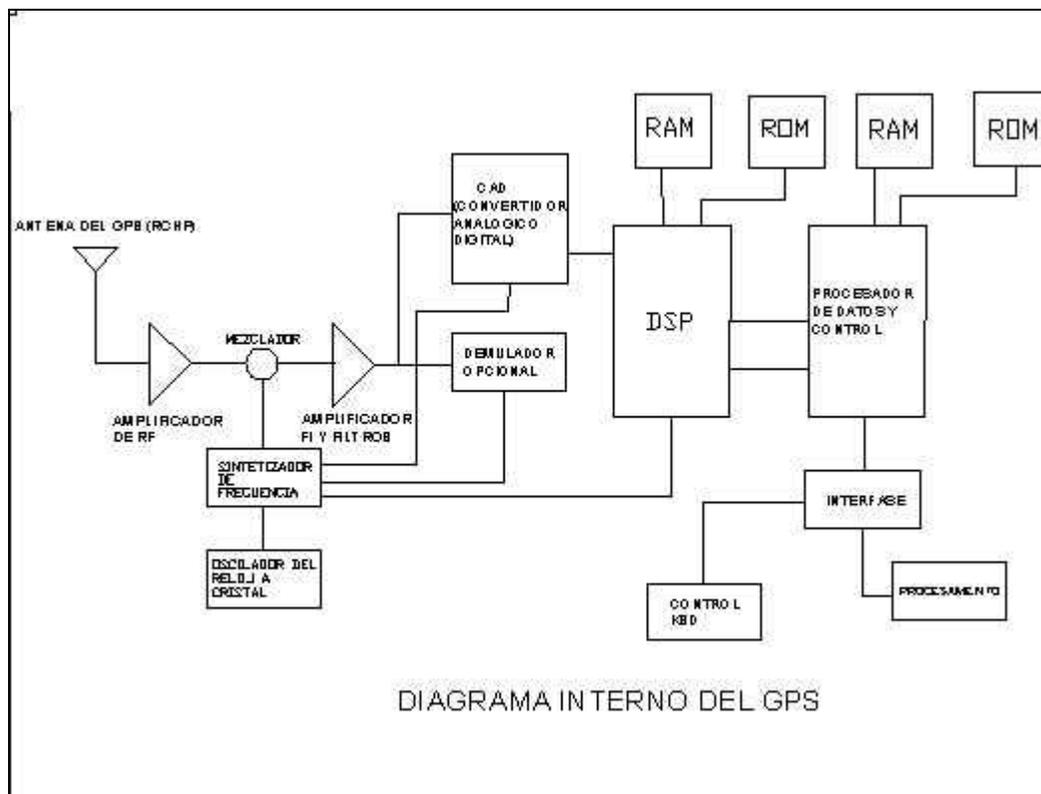
	Una frecuencia	Doble frecuencia
Efemérides	2	2
Reloj satelital	2	2
Ionósfera	4	0.5 a 1
Troposfera	0.5 a 1 m	0.5 a 1
Multitrayectoria	2	2
Error total	5 m	De 2 a 4

Utilizando DGPS se eliminaría el error por troposfera e ionosfera y si está libre de obstáculos se elimina el error por multitrayectoria entonces nos generaría un error de entre 1 y 3 metros debida a las efemérides y al error del reloj satelital, estos se corrigen cada 12 horas. Que multiplicada por la dilución de la precisión (DOP) nos dará la desviación estándar de la posición.

El DOP es un valor adimensional que describe la solidez de la figura formada por el receptor en la tierra y los vectores hacia los satélites a la vista siendo el mejor valor 1.

ESTRUCTURA DEL GPS

El GPS esta estructurado por una antena, una tarjeta GPS, relojes atómicos



CARACTERÍSTICAS DE LOS GPS

Los GPS en la actualidad han evolucionado en su precisión, en los canales de operación, diseño, tamaño del receptor, etc. Las características más relevantes de un receptor se muestran a continuación.

- Cobertura las 24 horas del día
- Precisión del receptor GPS
- Operación en todo tipo de clima o (condiciones atmosféricas)
- El sistema diferencial de operación del receptor.
- Fuente de alimentación del receptor GPS
- Velocidad de transmisión en baudios de la información obtenida
- Respuesta del equipo al estar en frío para iniciar recepción con los satélites
- Canales de operación o el máximo número de satélites que puede captar la antena.

¿ QUÉ ES SISTEMA DIFERENCIAL DGPS ?

Por sus siglas en ingles Sistema de posicionamiento global diferencial. Debido como fueron surgiendo las aplicaciones se requería que los receptores presentaran una mejor precisión para efectuar las aplicaciones.

Debido a esto se diseño un protocolo que pudiera ser procesado por los receptores GPS y actualizara la posición que arrojan los relojes atómicos.

TIPOS DE SISTEMAS DIFERENCIALES

Existen en la actualidad tres tipos de sistemas diferenciales que dependerá del receptor GPS si puede recibir dicho protocolo transmitido.

- **RTCM DGPS**

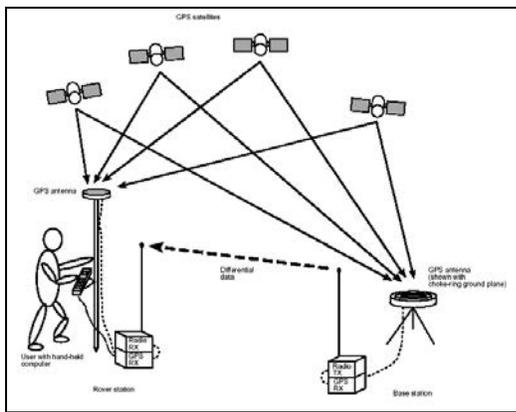
Utiliza las correcciones generadas por una estación costera sobre un punto conocido para mejorar la precisión menos de 5 metros. Se sitúa en un punto conocido un punto GPS, cuyo receptor compara lo que son las distancias observadas con lo que son las distancias calculadas para cada satélite, la diferencia entre las dos distancias puede atribuirse a las condiciones atmosféricas, distorsiones, perturbaciones por la acción de anti-intrusismo o ambigüedades de pseudo distancia. La unidad GPS base costera calcula las posiciones de cada satélite y las transmite a través de un enlace por radio telemetría a una unidad de GPS embarcada. Estas correcciones se denominan RTCM. La unidad embarcada corrige así las distancias observadas desde cada satélite y calcula una posición mejorada.

El gobierno de los EE.UU. y de otra muchas naciones han establecidos radio faros diferenciales con dependencia gubernamental, que proporcionan un servicio de corrección diferencial. El usuario de la embarcación no necesita establecer su propia estación costera el GPS determina automáticamente la mejor estación a utilizar. La calidad del DGPS es de 1- 5 metros dependiendo la calidad de precisión, el numero de satélites sintonizados y la geometría de estos del GPS.

- RTK

El modo cinemático en tiempo real (RTK) utiliza mas información para determinar la cuenta exacta de longitudes de onda respecto a cada satélite.

Mediante el uso de una estación base apta para RTK con una estación embarcada apta para RTK, los usuarios pueden determinar la posición de la antena con precisión de 5 a 10 centímetros. El principal inconveniente de los sistemas RTK es que el usuario debe invertir en su propia estación base y mantenerla. Además, la estación base debe estar en un radio de varios kilómetros (a efectos de discusión, digamos unos 10KM) del barco y habrá que usar un enlace radio telemétrico de alto nivel para transferir la información con velocidad de los datos superior al trafico DGPS normal



- GcGPS

El sistema GcGPS estación que emplea sistema diferencial de satélites geoestacionarios directamente a la antena GPS, utilizando WAAS, WCT, RTG.

RTG.- tiempo real Gipsy de satélites en orbita individuales. Reloj atómico de correcciones basadas en JPL/NASA red mundial de estaciones de referencia ITRF que provienen en tiempo real global que converge a la constelación de satélites en orbita alrededor del mundo y tiempo. Durante 20 años el laboratorio de propulsión de jets del instituto de tecnología de California investigó una forma de tener precisión en las órbitas, el software GIPSY-OASIS, usado para investigar la red mundial para el análisis geodésico fue mejorado por el JPL, Después de 6 años, el grupo de GPS de la JPL creó un sistema basado en los algoritmos GIPSY, mediante el cual produjeron correcciones de alta precisión en las señales GPS que llegaban a los usuarios. Este sistema llamado Real Time Gipsy (Tiempo real gipsy) estima la precisión y modela muchos parámetros fuentes de error en los sistemas satelitales, usando datos en tiempo real recibidos via Internet de la red mundial de estaciones de referencia GPS que forma parte del ITRF Network (Internacional Referente Frame Network)

Existen dos correcciones que son calculadas para la transmisión a los usuarios:

- Correcciones de reloj, para cada satélite GPS activo es calculado en segundos, éstas correcciones son basadas en las mediciones corregidas de la refracción.
- Corrección de órbitas. Que para su cálculo se utiliza las mediciones del ITRF Network.

WCT.- Transformación de correcciones de área amplia de satélites GPS combinado con las orbitas de relojes de correcciones, red regional al norte de América, Europa, Australia y suda frica.

WAAS.- Sistema de aumentación de banda área de GPS en el rango de la orbita, relojes atómicos de correcciones, estas correcciones provienen de la federación aeronáutica autorizada FAA al norte de América

PRECISION DE LA SEÑAL DIFERENCIAL

Todos los sistemas diferenciales presentan sus ventajas y desventajas en operación, costo, exactitud, precisión y tamaño.

El sistema RTCM su actualización de posición dependerá de la distancia a la estación de referencia y el transmisor que se este utilizando si es de alta frecuencia de operación (HF) con una precisión de 1-3 mts.

En los sistemas RTK presenta precisión en centímetros y nos puede calcular la altura del nivel del mar a la antena ó correcciones de marea, es necesario instalar una estación de referencia diferencial.

Por lo tanto GcGPS diferencial en tiempo real desde satélites geoestacionarios nos presenta una precisión en centímetros en donde no es necesario instalar una estación diferencial de referencia como en el sistema RTK.

Datum

Ya sabemos que se va a posicionar un punto y tenemos la manera de posicionarlo con mucha precisión (El GPS) pero ¿donde se va a posicionar?, en la superficie de la tierra, pero así con los datos que tenemos, no sabemos donde está la superficie de la tierra, además sabemos que la tierra es una masa irregular, por lo que lo más semejante a ella es una elipse de revolución, en definitiva se necesita un sistema de referencia, se le llama Datum a la superficie de referencia para el cálculo y determinación de las coordenadas, estableciéndose unos datos iniciales de los cuales se deriva el resto.

Un Datum está constituido por: una superficie de referencia con definición geométrica exacta y un punto fundamental, en el que coinciden las verticales al geoide y al elipsoide (con lo que también coincidirán las coordenadas astronómicas y geodésicas) se le denomina también punto astronómico fundamental y es el que sirve como referencia para el posterior cálculo de las coordenadas de todos los vértices. Todos los DATUM están referenciados a algún elipsoide, a su vez los elipsoides están definidos con una orientación y una posición.

En éste contexto, el posicionamiento satelital debe referirse a un DATUM local, porque en comparación con los DATUM de los satélites, los DATUM locales sólo se aplican a una región de la superficie de la tierra. Por años, cientos de DATUM geodésicos y horizontales han sido creados por varias agencias para propósitos de topografía, exploración y mapeo teniendo cierta jurisdicción o región. El tamaño del elipsoide es definido con un semi-eje mayor y un semi-eje menor, estos se aproximan lo más posible al geoide. Sabemos que el geoide tiene una forma irregular, así que diferentes países y en algunos casos grupos de países, tienen diferentes elipsoides conforme cierre mejor el geoide en su región geográfica. Así que para definir un elipsoide son requeridos 8 parámetros: dos son específicas de las dimensiones del elipsoide, tres de la localización y el centro y los otros tres son de la orientación del elipsoide. Corrigiendo la latitud, longitud y altura con el punto de origen.

La definición de un DATUM local es totalmente diferente a la definición de un DATUM satelital, en contraste, el sistema de referencia satelital es global y definido por las efemérides satelitales o los parámetros de órbita dados. Estos parámetros de órbita, están basados en las coordenadas adoptadas de las estaciones de referencia en tierra, en modelos geopotenciales de la gravedad de la tierra y en algunas constantes que son:

- La constante gravitacional de la masa de la tierra
- La rotación de la tierra con respecto al equinoccio instantáneo.
- La velocidad de la luz
- Las correcciones del reloj y el movimiento oscilador según el cálculo de las efemérides proporcionado por las estaciones de referencia.

El concepto de elipsoide de referencia es innecesario en la definición de DATUM satelital, no es usado en el cálculo de la órbita, como sea un elipsoide es usualmente asociado con el DATUM satelital a modo que las posiciones sean mostradas en coordenadas geográficas.

El elipsoide WGS84 es el sistema de referencia en el cual se basa las coordenadas dadas por las estaciones de referencia en tierra, y en el cual los parámetros de las efemérides representadas contenidas en los satélites están basados en las efemérides de radiodifusión mandadas desde tierra.

El sistema de efemérides de radiodifusión (Broadcast Ephemeris system) se refiere a las que manda al receptor GPS por los satélites, Las efemérides están contenidas en los mensajes de navegación transmitido por cada satélite. Estas efemérides son una serie de números o parámetros en el cual describe la órbita del satélite y la posición a lo largo de la órbita en un tiempo dado. Las "Broadcast ephemeris" son predichas extrapolando los datos colectados por las estaciones de tierra.

La información orbital es enviada a los satélites por estación maestra base a diario. La información predice la posición final de los satélites por un periodo de 14 días. Cada día la información obtenida es usada en conjunto con las órbitas de referencia para predecir los días siguientes las efemérides de los satélites.

Transformación de coordenadas

La posición derivada del sistema satelital es generalmente expresado en coordenadas WGS84. El surveyor generalmente requiere que las posiciones sean expresadas en algún DATUM local, por lo que es necesaria una transformación.

Como ya sabemos, los DATUM locales están hechos a conveniencia para embonen de la mejor manera en la superficie de la tierra. Estos DATUM raramente usan el centroide de la tierra, pero orientados exactamente en el polo del sistema terrestre convencional y Greenwich es el meridiano cero igualmente que en el WGS84. Por esto hay siete posibles parámetros de transformación (1 escala, 3 rotaciones sobre los 3 ejes y 3 translaciones del origen). En la industria se usan 2 métodos de transformación: la Position vector rotation (Bursa-Wolf model) y Coordinate frame rotation, existe una tercera, por ecuaciones de regresión, explicaré solamente las que se usan en la industria. En ambos casos se gira sobre cada eje y se posiciona en el centro del datum con las tres translaciones.

Los 7 parámetros son los siguientes:

Translación: X (dX), Y (dY), Z (dZ)

Rotación: en eje X (Rx), en eje Y (Ry), en eje Z (Rz)

Correccion scale (S)

Position vector rotation (Bursa Wolf model)

En ésta conversión, la rotación está definida positiva con el giro de las manecillas del reloj. La rotación es aplicada a un vector de posición.

La fórmula de transformación es la siguiente:

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_{DATUM_2} = \begin{bmatrix} dX \\ dY \\ dZ \end{bmatrix} + (1 + S * 10^{-6}) * \begin{bmatrix} 1 & -Rz & -Ry \\ +Rz & 1 & -Rx \\ -Ry & +Rx & 1 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_{DATUM_1}$$

Coordinate Frame Rotation

La matriz de 3X3 asociada a ésta fórmula, deriva de un tipo de matriz conocida en matemáticas como matriz de rotación. Una matriz de rotación describe una rotación de mano derecha. La rotación es definida como positiva en el giro de las manecillas del reloj. Si se imagina un observador en el origen de las coordenadas, se observará que cuando rota positivo en el eje Z, X se moverá hacia el éste.

La fórmula utilizada es la siguiente:

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_{DATUM_2} = \begin{bmatrix} dX \\ dY \\ dZ \end{bmatrix} + (1 + S * 10^{-6}) * \begin{bmatrix} 1 & + Rz & - Ry \\ - Rz & 1 & + Rx \\ + Ry & - Rx & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_{DATUM_1}$$

Nota:

- Los ángulos deben estar en radianes en ambas fórmulas.
- Las coordenadas del DATUM_2 y DATUM_1 son las coordenadas geocéntricas del punto.

Cálculo de coordenadas geocéntricas.

Las coordenadas geocéntricas son las que tienen los tres ejes de referencia (X,Y,Z) y en éste caso el punto origen es el centro de la tierra o el centro del elipsoide y el eje Z es el eje donde rota la elipse de revolución o el eje de rotación terrestre convencional.

A continuación colocaré las fórmulas necesarias para la transformación de coordenadas geográficas a geocéntricas.

$$\begin{aligned}X &= (N+h) \cdot \cos\varphi \cdot \cos\lambda \\Y &= (N+h) \cdot \cos\varphi \cdot \operatorname{sen}\lambda \\Z &= ((b^2/a^2) \cdot N+h) \cdot \sin\varphi\end{aligned}$$

Donde:

φ = latitud.

λ = longitud.

h = altitud elipsoidal.

a = semieje mayor del elipsoide de referencia.

b = semieje menor del elipsoide de referencia.

N = radio de curvatura en la vertical principal del punto.

Para el cálculo de N:

$$N = \frac{a^2}{\sqrt{a^2 \cdot \cos^2\varphi + b^2 \cdot \operatorname{sen}^2\varphi}}$$

Conversión de coordenadas Geográficas a UTM y viceversa.

Existen diversos procedimientos. De entre ellos tres son los métodos más utilizados:

Utilizando las tablas de la Proyección UTM. Dichas tablas están incluidas, entre otras, en la siguiente publicación: Servicio Geográfico del Ejército de España (SGE), Sección de Geodesia (1976): Proyección Universal Transversa Mercator, SGE, Madrid. Consta de dos volúmenes: Vol. I: Sistemas conformes. Proyección U.T.M. Cuadrículas y Sistemas de referencia, (220 pp.) y Vol. II: Tablas, (331 pp.)

Utilizando las fórmulas de transformación directa del US Army, publicadas en 1973 (véase el USGS Bolletín Num. 1532).

Utilizando las fórmulas de Coticchia-Surace, dichas ecuaciones fueron planteadas por Alberto Cotticia y Luciano Surace en el "Bolletino di Geodesia e Science Affini", Num. 1, y a ellos debemos la deducción de las ecuaciones que vamos a utilizar. La precisión que se puede obtener ronda el centímetro cuando se utilizan suficientes decimales.

Estas son las fórmulas a ocupar:

$$A = \cos \varphi \cdot \sin \Delta \lambda \quad \text{—}$$

$$\xi = \frac{1}{2} \cdot \ln \left[\frac{1 + A}{1 - A} \right] \quad \text{—}$$

$$\eta = \arctan \left(\frac{\tan \varphi}{\cos \Delta \lambda} \right) - \varphi$$

$$v = \frac{c}{(1 + e'^2 \cdot \cos^2 \varphi)^{1/2}} \cdot 0,9996$$

$$\zeta = \frac{e'^2}{2} \cdot \xi^2 \cdot \cos^2 \varphi$$

$$A_1 = \text{sen}(2 \cdot \varphi)$$

$$A_2 = A_1 \cdot \cos^2 \varphi$$

$$J_2 = \varphi + \frac{A_1}{2}$$

$$J_4 = \frac{3 \cdot J_2 + A_2}{4}$$

$$J_6 = \frac{5 \cdot J_4 + A_2 \cdot \cos^2 \varphi}{3}$$

$$\alpha = \frac{3}{4} \cdot e'^2$$

$$\beta = \frac{5}{3} \cdot \alpha^2$$

$$\gamma = \frac{35}{27} \cdot \alpha^3$$

Donde:

$\Delta\lambda = \lambda_2 - \lambda_1$ (Tomando en cuenta que es negativo hacia el W y positivo hacia E)

Radio Polar de Curvatura: $c = \frac{a^2}{b}$

Aplanamiento: $\alpha = \frac{a-b}{a}$

Segunda excentricidad: $e' = \frac{\sqrt{a^2 - b^2}}{b}$

De aquí se calcula:

$$B_{\phi} = 0.9996 \cdot c \cdot (\varphi - \alpha \cdot J_2 + \beta \cdot J_4 - \gamma \cdot J_6)$$

$$X = \xi \cdot v \cdot \left(1 + \frac{\zeta}{3}\right) + 500.000$$

$$Y = \eta \cdot v \cdot (1 + \zeta) + B_{\phi}$$

Siendo 500,000 la falsa abscisa

Para realizar el cálculo inverso, procedemos a utilizar las siguientes ecuaciones:

$$\varphi = \frac{Y}{6.366.197'724 \cdot 0'9996} \longrightarrow$$

$$v = \frac{c}{(1 + e'^2 \cdot \cos^2 \varphi)^{1/2}} \cdot 0'9996 \longrightarrow$$

$$a = \frac{X}{v} \longrightarrow$$

$$A_1 = \text{sen}(2 \cdot \varphi) \longrightarrow$$

$$A_2 = A_1 \cdot \cos^2 \varphi \longrightarrow$$

$$J_2 = \varphi + \frac{A_1}{2} \longrightarrow$$

$$J_4 = \frac{3 \cdot J_2 + A_2}{4} \longrightarrow$$

$$J_6 = \frac{5 \cdot J_4 + A_2 \cdot \cos^2 \varphi}{3} \longrightarrow$$

$$\alpha = \frac{3}{4} \cdot e'^2 \longrightarrow$$

$$\beta = \frac{5}{3} \cdot \alpha^2 \longrightarrow$$

$$\gamma = \frac{35}{27} \cdot \alpha^3 \longrightarrow$$

$$B_{\varphi} = 0'9996 \cdot c \cdot (\varphi - \alpha \cdot J_2 + \beta \cdot J_4 - \gamma \cdot J_6)$$

$$b = \frac{Y - B_{\varphi}}{v} \longrightarrow$$

$$\zeta = \frac{e'^2 \cdot a^2 \cdot \cos^2 \varphi}{2} \longrightarrow$$

$$\xi = a \cdot \left[1 - \frac{\zeta}{3} \right] \longrightarrow$$

$$\eta = b \cdot (1 - \zeta) + \varphi \longrightarrow$$

$$\text{sen } \frac{1}{2} \xi = \frac{e^{\eta} - e^{-\eta}}{2}$$

En éste caso no es la excentricidad, sino el exponencial, el número ξ

$$\Delta\lambda = \text{arc tan} \frac{\text{sen } \frac{1}{2} \xi}{\cos \eta} \longrightarrow$$

$$\tau = \text{arc tan} (\cos \Delta\lambda \cdot \tan \eta)$$

La composición de la longitud es muy sencilla. La operación ha de ser realizada en grados decimales, por lo que delta lambda ha de ser dividida

por Pi y multiplicada por 180. Lambda sub cero ya está en grados decimales, por lo que no hace falta tocarla. La longitud se obtiene de la siguiente forma:

$$\text{Longitud: } \lambda = \Delta\lambda + \lambda_0$$

La latitud la obtenemos de la siguiente manera:

$$\text{Latitud: } \varphi = \varphi' + \left[1 + e'^2 \cdot \cos^2 \varphi' - \frac{3}{2} \cdot e'^2 \cdot \sin \varphi' \cdot \cos \varphi' \cdot (\tau - \varphi') \right] \cdot (\tau - \varphi')$$

De aquí sólo queda convertir de radianes a grados.

Algunas definiciones en teoría de los errores:

Precisión: Es el grado de cercanía en un conjunto de mediciones o la capacidad de repetir mediciones de una misma cantidad.

Exactitud: Es el punto ideal de nuestra medición, en el cual no se tiene error.

Varianza: Es la variación cuadrática estándar de las mediciones con respecto al promedio

Desviación estándar: Es la raíz cuadrada de la varianza, y representa la variación con respecto al promedio

Error. Concepto equivocado o juicio falso

Metodología

Para el sistema RTCM:

- Se pone a funcionar la estación de referencia de la DICTYG.
- Se configura el GPS, en éste caso se utilizará un leica.
- Se realiza el trabajo de campo, que en éste caso es la colocación de 5 puntos, en lo que es la frontera norte de ciudad universitaria.
- El post proceso se lleva a cabo con el software LEICA Geo Office y se obtienen las coordenadas geodésicas en el datum WGS84.
- Se obtienen datos tanto de la estación de referencia del INEGI como de la estación de referencia de la DICTYG.
- Los datos se pasan al DATUM NAD27, para que esté más acorde al sistema utilizado en México, y se proyecta en UTM, para tener coordenadas cartesianas, que como no son distancias tan grandes, no diferirá de la distancia topográfica en más de 1 o 2 mm.
- Se pone a funcionar la estación de referencia Trimble
- Se hace el levantamiento de 4 cuatro puntos
- Se hace el post proceso con el software GPS Pathfinder Office
- Se comparan los datos obtenidos con post proceso y con la corrección diferencia en tiempo real WAAS
- Los datos se convierten a unidades UTM

Para el sistema CcGPS:

- Para éste, se utilizó el sistema RTG, proporcionado por C & C Technologies a la compañía Oceanografía SA de CV para la realización de la toma de coordenadas de los pozos de perforación en la sonda de Campeche.
- Se coloca el receptor en tres de las cuatro esquinas de la plataforma
- Se mide físicamente con cinta las 4 esquinas y por el centro para formar triángulos
- Algunas plataformas se midieron solo en Dual, por lo que con éstas mediciones también haremos el análisis.
- Igualmente convertimos a NAD27 y UTM

Toma de datos

Sistema Dual.

Del Receptor, se obtienen los siguientes datos en forma consecutiva:
Formato, tiempo, Latitud, Longitud, Indicativo de señal diferencial o C/A
(1,2,3), N° Satélites, HDOP.

Se colocó el GPS en la pierna 1, 2 y 3 (son 8 piernas).

De la primera pierna se obtuvieron 418 datos, se obtuvo el promedio colocándole mayor peso a las observaciones que tuvieran mayor HDOP y el promedio fue el siguiente:

Promedio Con el peso						
Latitud			Longitud			
grado	minuto	segundo	Grado	Minuto	Segundo	
18	58	8.95702333	92	37	41.7312293	
Nad27						
18	58	6.501	92	37	41.34888	
UTM						
X=		539145.078				
Y=		2097254.663				

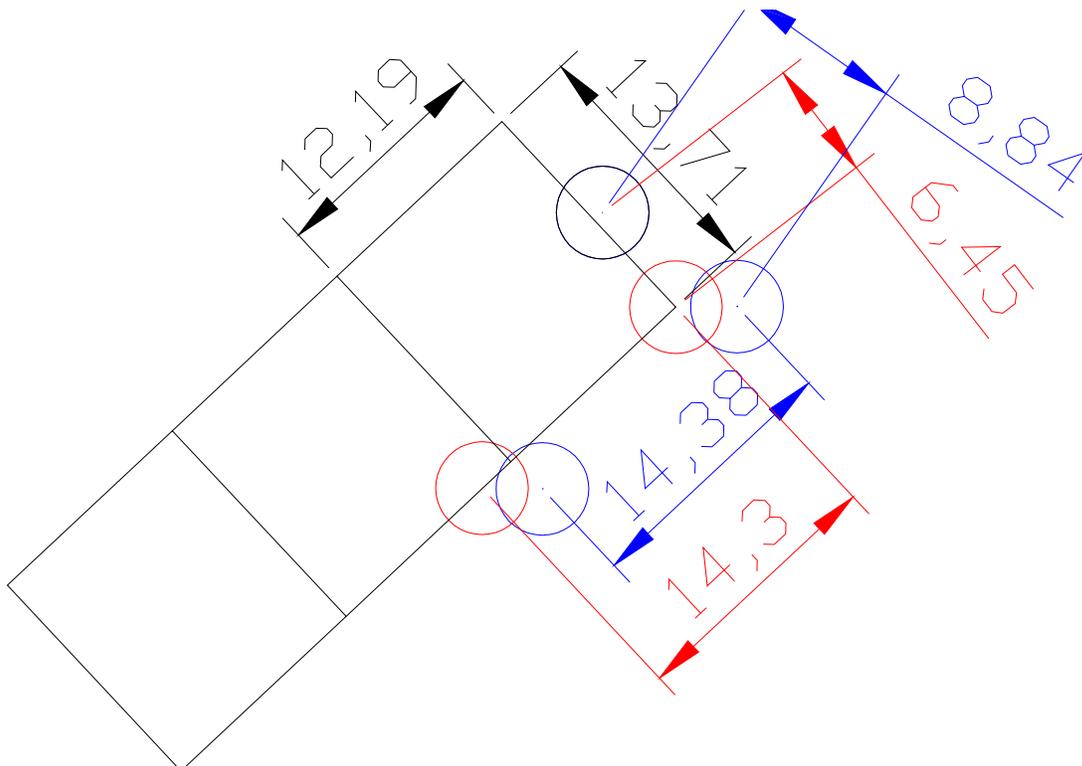
En la pierna dos, se realizó lo mismo y se obtuvo el siguiente promedio:

Promedio Con el peso						
Latitud			Longitud			
grado	minuto	segundo	Grado	Minuto	Segundo	
18	58	8.79086704	92	37	41.5965533	
Nad27						
18	58	6.33559	92	37	41.21413	
UTM						
X=		539149.027				
Y=		2097249.56				

El mismo procedimiento para la pierna tres,

Promedio Con el peso						
Latitud			Longitud			
grado	minuto	segundo	Grado	Minuto	Segundo	
18	58	8.473844944	92	37	41.9547062	
Nad27						
18	58	6.01856	92	37	41.57228	
UTM						
X=		539138.574				
Y=		2097239.798				

De tal forma que el dibujo queda así, con las medidas físicas:



En el dibujo, las medidas en negro indican las medidas realizadas con cinta, con una precisión de 1:50,000, Las azules indican las observaciones realizadas en la que no se hizo ajuste alguno, y los puntos rojos indican los ajustados, como los azules están más cercanos a la realidad, entonces tomamos como verdaderos las lecturas que calculamos con el peso. Calculamos la diferencia entre las distancias y obtenemos el promedio, éste será nuestro error más probable:

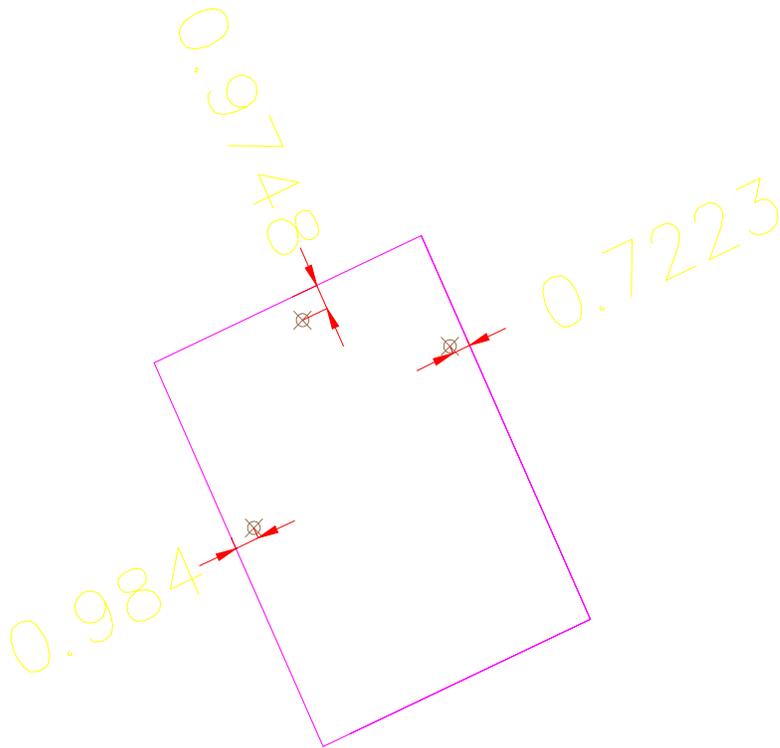
$$E = 2.575 \text{ m}$$

Esto nos indica que con Dual , siendo que realiza un cálculo con el efecto Doppler utilizando dos diferentes longitudes de onda para obtener un cálculo más preciso, nos arrojó un error probable de 2.575 mts. Éste podría ser el error máximo, puesto que en éstas observaciones nos hacía un poco de “sombra” una plataforma de perforación auto elevable que se encontraba en lo que ocupa las piernas 5, 6, 7, 8 lo que ocasionaría errores de multi-trayectoria. Considerando que no se utilizó señal diferencial, es una buena precisión, aunque no tan buena si lo que necesitamos son mediciones cercanas a lo exacto para no tener problemas, como es el caso de PEMEX, hay ocasiones que las embarcaciones se acercan muchísimo a las plataformas para realizar trabajo, y sólo están guiándose con el sistema diferencial de posicionamiento marino, entonces podría haber algún accidente.

Aquí tenemos otro levantamiento que se realizó con el sistema de doble frecuencia, en éste caso se obtuvo mayor precisión:

NAD27			
Latitud	18	57	38.23507
Longitud	92	37	42.51479
X=	579112.812		
Y=	2096385.835		
Covarianza	-		
	0.030642141		
Error típico	0.25429569		

Pero al compararlo con las mediciones realizadas con cinta, se obtiene lo siguiente:



En éste caso la plataforma fue "Sea Horse", éste tipo de plataformas sólo tiene una pierna, los puntos GPS se tomaron en las orillas de la parrilla tal como lo muestra el croquis, por lo que para obtener la coordenada de la pierna se ajustó la medida con las distancias obtenidas con cinta y se obtuvo una media de la coordenada.

Por lo tanto el error típico es:

$$\text{Zigma} = 0.894 \text{ m}$$

De modo que se puede concluir que usando el método de doble frecuencia la precisión es variable dependiendo de las condiciones

ambientales y físicas. Pero éste no será tan grave como usando una sola frecuencia, que nos arroja precisiones de hasta 30 metros o más.
SISTEMA RTCM (Diferencial con estación de referencia)

En éste caso fue un método post-proceso. Se tomaron 3 puntos, en el circuito universitario en CU, se bajaron los datos de la estación de referencia de la DICTYG (DICYG) así mismo como los de la estación de referencia del INEGI localizada en Toluca. Los datos de ésta estación de referencia son los siguientes:

Receptor Trimble, Doble frecuencia
 Antena Trimble, L1+ L2 Geodésica
 Altura 0.2470m, a la base del soporte de la antena
 Frecuencias 450 - 470 MHz (Libre dominio)
 Intervalos GPS Registro a cada 15 seg. y a cada 5 seg.
 Cobertura estático 500 Km. (Precisión 5mm+ 1ppm)
 Monitoreo 24 HORAS todo el año
 Ubicación: Toluca

De esto lo que nos interesa es la precisión de 5mm + ppm, lo que quiere decir esto es que por cada 1000 metros disminuirá la precisión 1 milímetro, comenzando con 5 mm en el km cero. Los datos que obtuvimos en formato rinex se procesaron con el geoffice y son los siguientes:

DICTYG - odontologia	Referencia: DICTYG	Móvil: odontología
Coordenadas:		
Latitud:	19° 19' 37.05409" N	19° 20' 06.30938" N
Longitud:	99° 10' 53.66430" W	99° 10' 53.96907" W
Alt Elip.:	2275.5595 m	2261.7442 m
Tipo de solución:		
	Código	
Frecuencia:	Solo L1	
Ambigüedad:	No	

TOL2 - odontologia	Referencia: TOL2	Móvil: odontología
Coordenadas:		
Latitud:	19° 17' 35.64431" N	19° 20' 06.30723" N
Longitud:	99° 38' 36.49337" W	99° 10' 53.97495" W
Alt Elip.:	2651.7250 m	2262.7768 m
Tipo de solución: Flotante		
Frecuencia: Solo L1		
Ambigüedad: No		

DICTYG - medicinaa	Referencia: DICTYG	Móvil: medicinaa
Coordenadas:		
Latitud:	19° 19' 37.05409" N	19° 20' 04.10944" N
Longitud:	99° 10' 53.66430" W	99° 10' 47.17911" W
Alt Elip.:	2275.5595 m	2260.9647 m
Tipo de solución: Flotante		
Frecuencia: Solo L1		
Ambigüedad: No		

TOL2 - medicinaa	Referencia: TOL2	Móvil: medicinaa
Coordenadas:		
Latitud:	19° 17' 35.64431" N	19° 20' 04.10463" N
Longitud:	99° 38' 36.49337" W	99° 10' 47.17561" W
Alt Elip.:	2651.7250 m	2260.9209 m
Tipo de solución: Flotante		
Frecuencia: Solo L1		
Ambigüedad: No		

DICTYG - medicina2	Referencia: DICTYG	Móvil: medicina2
Coordenadas:		
Latitud:	19° 19' 37.05409" N	19° 20' 01.53050" N
Longitud:	99° 10' 53.66430" W	99° 10' 43.44239" W
Alt Elip.:	2275.5595 m	2257.7932 m
Tipo de solución: Fase		
Frecuencia: Solo L1		
Ambigüedad: Sí		

TOL2 - medicina2	Referencia: TOL2	Móvil: medicina2
Coordenadas:		
Latitud:	19° 17' 35.64431" N	19° 20' 01.52638" N
Longitud:	99° 38' 36.49337" W	99° 10' 43.43218" W
Alt Elip.:	2651.7250 m	2257.2401 m
Tipo de solución: Flotante		
Frecuencia: Solo L1		
Ambigüedad: No		

Éstas coordenadas geográficas se encuentran en WGS84, así que las convierto a NAD27 y a UTM mediante un programa que realicé, y obtenemos los siguientes datos:

	NAD27		X	Y
DICTYG-ODONTOLOGIA	19.3344304	-99.1813835	480947.557	2137714.326
TOL-ODONTOLOGIA	19.3344298	-99.1813851	480947.386	2137714.26
DICTYG-MEDICINAA	19.3338193	-99.1794975	481145.598	2137646.501
TOL2-MEDICINAA	19.333818	-99.1794965	481145.699	2137646.353
DICTYG-MEDICINA2	19.3331029	-99.1784595	481254.542	2137567.12
TOL2-MEDICINA2	19.3331018	-99.1784567	481254.84	2137566.993
REFERENCIA	Distancia a referencia (m)		Precisión supuesta	
PUNTO	TOL2	DICTYG	TOL2	DICTYG
ODONTOLOGIA	48735.0213	899.250332	0.05373502	0.00589925
MEDICINAA	48926.266	852.844481	0.05392627	0.005852844
MEDICINA2	49027.8215	809.28388	0.05402782	0.005809284

Ahora revisamos la diferencia de lecturas que hay entre los sistemas de referencia

PUNTO	Diferencia (m)
ODONTOLOGIA	0.18384958
MEDICINAA	0.17968354
MEDICINA2	0.3237036

Como observamos, la precisión supuesta proporcionada por el fabricante no nos sirve de mucho, porque rebasa la diferencia tanto con la referencia de Toluca (que es de 5 cm aprox) como la referencia de la DICTYG (de 5 mm aprox), por lo tanto desde ésta perspectiva ninguna de las dos referencias es confiable.

Pero, podemos obtener un promedio de las diferencias para tener la diferencia más probable:

$$\text{Prom} = 0.2291 \text{ m}$$

Lo que se concluye de esto es que el error más probable que se podría tener utilizando alguna de las dos estaciones de referencia es 22.91 cm, siendo muy buena precisión, comparado con el método anterior (Dual), que se obtuvo entre 89cm y 3 metros de diferencia (es menos exacta y menos precisa).

SISTEMA RTCM (Diferencial con estación de referencia)

Receptor Trimble, Doble frecuencia

Antena Trimble PRO XH, L1+ L2 Geodésica

Altura 2.15m, a la base del soporte de la antena

Frecuencias 450 - 470 MHz (Libre dominio)

Intervalos GPS Registro a cada 1 seg

Levantamiento Estático

Horizontal: $\pm 5 \text{ mm} + 0,5 \text{ ppm RMS}$

Vertical: $\pm 5 \text{ mm} + 1 \text{ ppm (longitud de la línea base) RMS}$

Monitoreo 24 HORAS todo el año

Ubicación: D.F. Col. Del Valle

Para el levantamiento con post proceso se realizo la captura de datos con un tiempo no mayor a 10 min. y para comprobar la precisión con un tiempo menor, se le dejo solo 3 min. Al primer punto.

Propiedades de Posición		Precisión			
No. De vértice	Estado	Este [m]	Norte [m]	Altitud [m]	Precisión Horizontal [m]
1	L1 portadora con procesamiento fija	0.0	0.0	0.0	0.0
2	L1 portadora con procesamiento fija	0.0	0.0	0.0	0.0
3	L1 portadora con procesamiento fija	0.0	0.0	0.0	0.0
4	L1 portadora con procesamiento fija	0.0	0.0	0.0	0.0

No. De vértice	Coordenadas		
	Latitud	Longitud	Altura [m]
1	19°22'42".27888	99°10' 28".19244	2257.988
2	19°22' 42".17668	99°10' 27".79578	2257.919
3	19°22' 41".32775	99° 10' 27".95702	2258.07
4	19°22'41".36029	99° 10' 28".28690	2257.931

Coordenadas UTM

No. De vértice	X	Y
1	481676.007	2142707.88
2	481687.575	2142704.73
3	481682.845	2142678.64
4	481673.223	2142679.65

No. De Vértice	Diferencia X [m]	Diferencia Y [m]
2	0.06	0.07
3	0.03	0.01
4	0.03	0.02

Comparando los valores que obtuvimos con el levantamiento con post proceso nos da una diferencia poco significativa, con lo que concluimos que los valores se pueden utilizar en un trabajo que requiera de mayor precisión, comprobando que la distancia interviene en el error así como el tiempo del levantamiento.

Los datos obtenidos con corrección diferencial (WAAS) en tiempo real son:

Propiedades de Posición		Presición			
No. De vértice	Estado	Este	Norte	Altitud	Presición Horizontal
1	SBAS en tiempo real	0.3	0.3	0.9	0.5m
2	SBAS en tiempo real	0.3	0.3	0.9	0.5m
3	SBAS en tiempo real	0.3	0.3	0.9	0.5m
4	SBAS en tiempo real	0.4	0.4	1.2	0.5m

Coordenadas			
No. De vértice	Latitud	Longitud	Altura
1	19°22'42".28979	99°10' 28".20035	2257.799
2	19°22' 42".18183	99°10' 27".80567	2257.903
3	19°22' 41".33373	99° 10' 27".96755	2258.416
4	19°22'41".36631	99° 10' 28".29187	2258.418

UTM	
X	Y
481675.777	2142708.22
481687.286	2142704.89
481682.538	2142678.82
481673.079	2142679.83

Para aplicaciones en que no se requiera de mayor precisión la corrección diferencial en tiempo real ayudara para eliminar errores comparados con los datos crudos en tiempo real.

Obteniendo las siguientes coordenadas:

Pierna A4

Latitud			Longitud (WGS84)		
G	M	S	G	M	S
18	57	33.70	92	38	21.9773245
NAD 27					
18	57	31.24	92	38	21.5939
UTM					
X=537970.427					
Y=2096168.693					

Pierna B4

Latitud			Longitud (WGS84)		
G	M	S	G	M	S
18	57	33.94096	92	38	22.373
18	57	31.48416	92	38	21.989
X=537958.835					
Y=2096175.954					

Junto a la pierna B3 había una plataforma autoelevable de perforación, por lo que nos causaba error de multitrayectoria, por lo que éste lo desechamos. De los datos anteriores, obtenemos que las distancias entre las piernas A4-B4 son las siguientes:

Con las lecturas GPS: 13.678

Con las mediciones hechas con cinta: 13.700

De aquí nos resulta que la diferencia es de 2.2cm. Que nos indica el error existente en éstas lecturas.

Si tomamos en cuenta la distancia B4-B3 nos resulta las siguientes lecturas:

Con GPS: 11.618

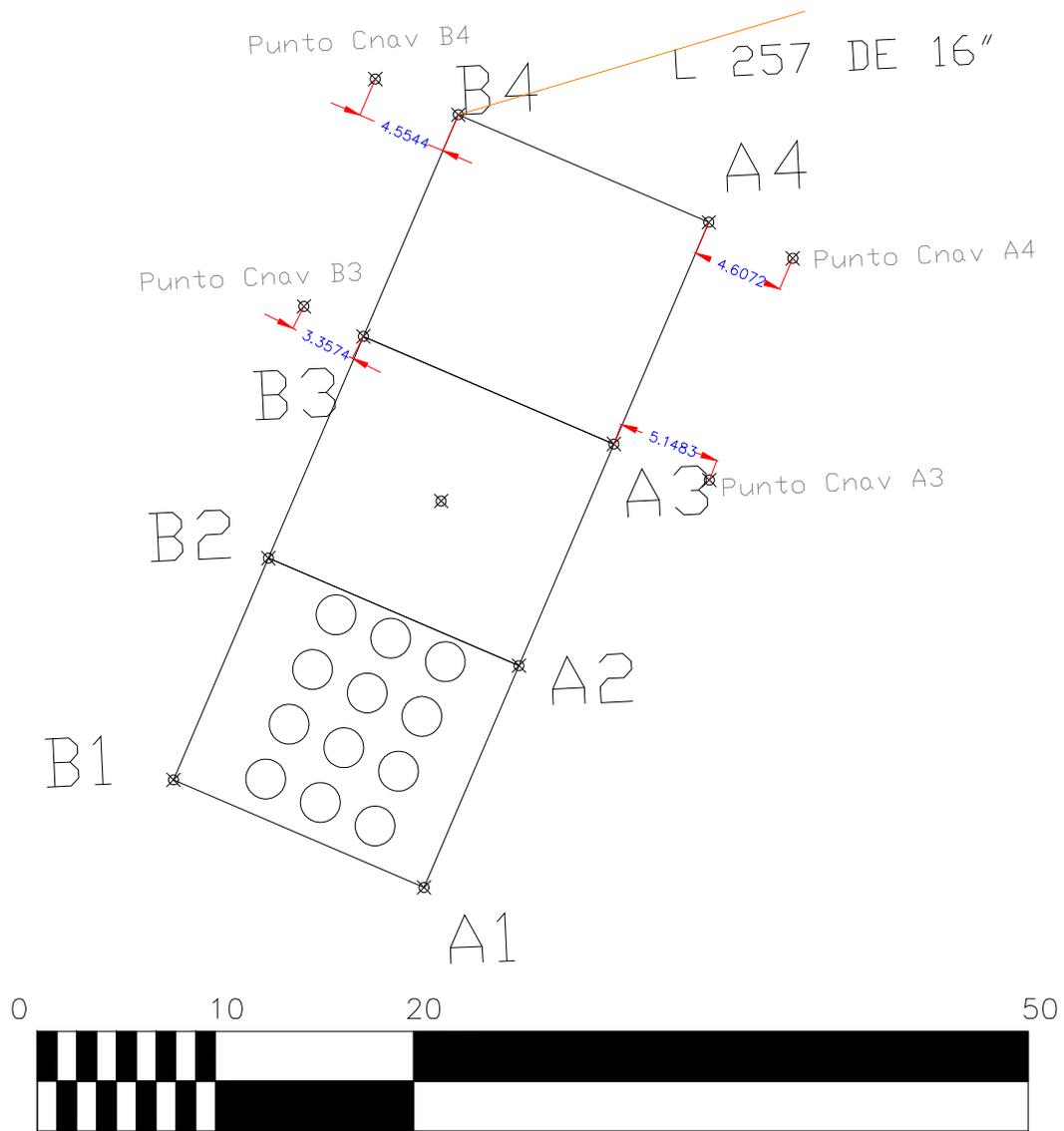
Con cinta: 12.200

Pero aquí tenemos una diferencia tanto paralela a la plataforma, como perpendicular, siendo la diferencia:

Dif: 1.066 mts.

De lo anterior concluimos que los errores de multitrayectoria sí son significativos, En éste caso el error se observa claramente, porque la plataforma de perforación, tenía aproximadamente 30 a 40 metros de altura del nivel donde nos encontrábamos en la plataforma satélite de producción y el punto se encontraba a menos de 10 metros de la PAE.

SINAN-C



En ésta plataforma lo que se hizo fue colocar los puntos del GPS no en la pierna, sino en la parrilla pero sobre el eje de las piernas, a partir de éstos puntos se midió la distancia hacia la pierna, de igual manera se midió con cinta cada uno de las piernas.

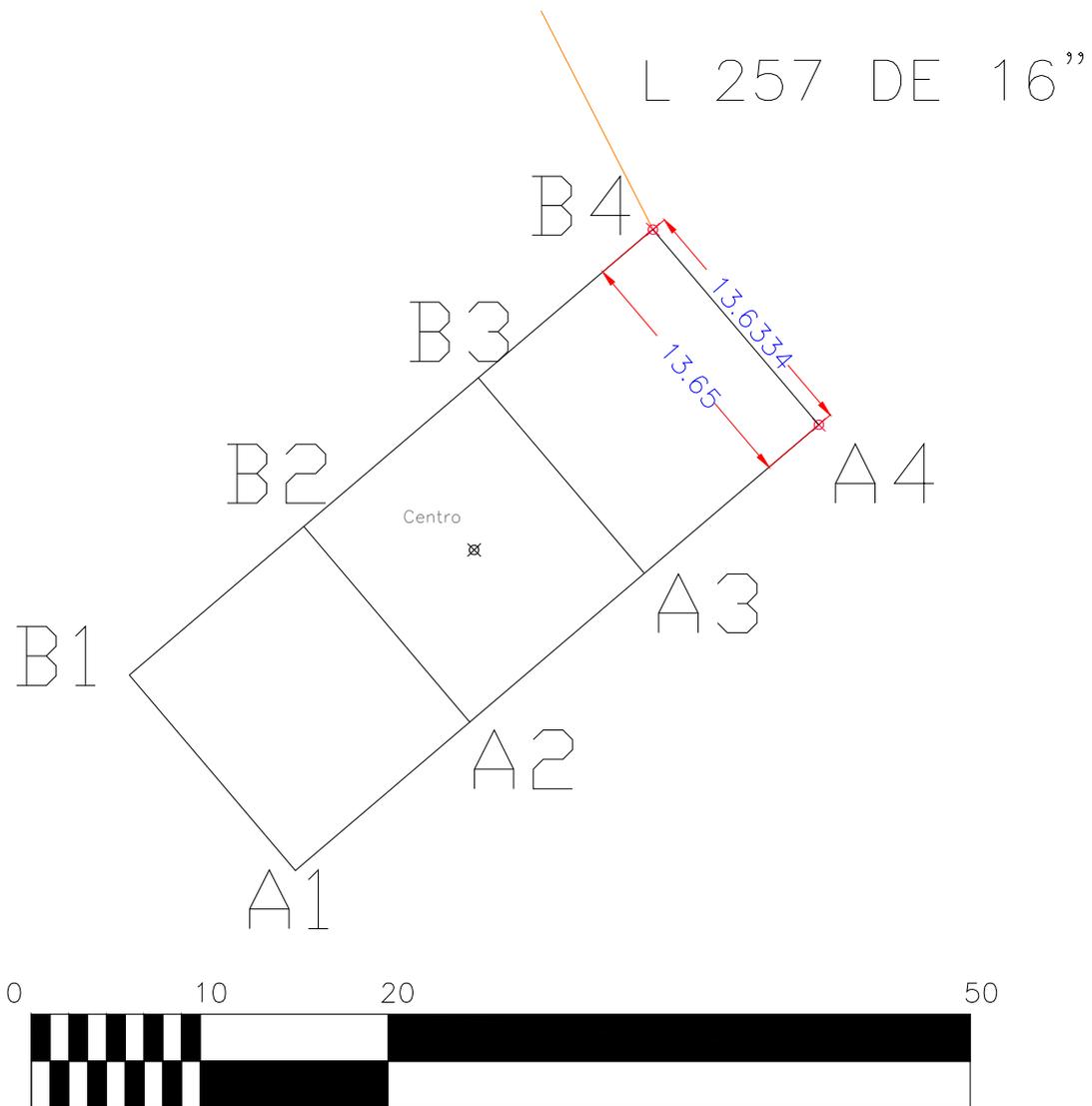
La distancia con GPS que se acercara más a las mediciones realizadas con cinta, fue la que se tomó como verdadera, que igualmente que en Sinan-B, fueron las más alejadas de la plataforma de perforación.

Por lo anterior, obtenemos la siguiente tabla de distancias, después de convertir las coordenadas del GPS a la cuadrícula UTM

Distancia	Con GPS	Con Cinta
Punto Cnav B4-B4	4.5544	4.55
Punto Cnav A4-A4	4.6072	4.60
Punto Cnav B3-B3	3.357	4.55
Punto Cnav A3-A3	5.1485	4.60
Total	17.6671	18.3
Diferencia Total	0.6329	
Diferencia	.011	
Exceptuando puntos cercanos a PAE		

Lo anterior nos está arrojando un error de 1.1 cm, que es muy buena precisión, y tomando en cuenta que se está utilizando una cuadrícula UTM y no distancias topográficas que son las de la cinta, bien ésta diferencia podría ser porque éstos puntos se encuentran alrededor de las coordenadas 530,000, por lo que representa una distancia de 30,000 metros de meridiano central.

SINAN-C



En Ésta plataforma de igual manera se tomó lectura a las piernas B4, A4, B3, y A3. Las piernas del eje 3 se eliminaron por estar cerca de la plataforma de perforación y se obtuvieron los siguientes resultados:

Pierna	X	Y	Distancia	
B4	X=534371.573	Y=2093013.017	A4-B4 (GPS)	13.6334
A4	X=534380.409	Y=2093002.634	A4-B4 (cinta)	13.65

Dif = 1.16 cm

Con los trabajos anteriores se puede concluir que es ésta la tendencia con éste sistema, mientras no exista el error de multi trayectoria, la precisión con el sistema GcGPS, o RTC de del sistema de corrección de la NASA, es de entre 1 y 2 centímetros, siendo que las lecturas realizadas en todos los trabajos no fueron mayores a 15 minutos, por lo que se observa que tiene más precisión y más exactitud que los sistemas anteriores.

Resumen:

Método de corrección	Error
Sistema dual (Utilizando dos frecuencias, cálculo con fórmulas del efecto doppler)	0.894 m, 2.575 m
RTCM (Estación de referencia local, método estático)	0.18384958 m 0.17968354 m 0.3237036 m
Sistema GcGPS (Global corrected GPS Network, tiempo real)	1.1 cm, 2.2 cm

CONCLUSIONES

Como podemos ver, existen diferentes formas de realizar las correcciones en las señales de los satélites GPS. De los resultados podemos observar que el más preciso es el GcGPS de la red internacional de estaciones de referencia, y de aquí en especial el RTG que fue el que estudiamos que da precisiones de unos cuantos centímetros y utiliza satélites geo-estacionarios para enviar las correcciones, el siguiente en precisión de los que estudiamos es el RTCM o estación de referencia local que nos dio precisiones de 10 a 20 cm y al final tenemos el receptor sin diferencial pero utilizando dos frecuencias que nos dio de 90 cm a 3 m según las condiciones meteorológicas.

El RTCM el inconveniente es que el error aumenta mientras más lejos se encuentre de la estación de referencia y por otro lado hay que colocar una estación de referencia y tener sus coordenadas fijas para calcular la diferencial, pero el beneficio es que te da una precisión buena, aceptable, posiblemente para usos en construcción y en otras áreas a un costo no tan alto.

El GcGPS como ya vimos es el más preciso, pero el inconveniente es el costo, a la fecha, la renta de la señal es aproximadamente 300 dólares mensuales más el costo del equipo que ronda los 30 mil dólares, para tener una idea.

Cada uno de los sistemas de navegación tiene sus ventajas y/o desventajas ya que si hablamos de un receptor de una frecuencia el error obtenido en las coordenadas es mayor, y es necesario mencionar que la precisión esta en función del costo del equipo y señal, como se explicó en los diferentes métodos

Lo importante aquí es el uso que se le vaya a dar al equipo, la importancia de la precisión depende de cada trabajo. Se necesita hacer un balance de Costo/Beneficio y así elegir el mejor sistema para cumplir con nuestro objetivo.

Obras de consulta

- Cálculo de ajustes en topografía, INEGI, 2003
- Qinsy 6.5, manual de referencia (Datum, conversión de coordenadas)
- Cnav Manual de referencia (RTG, GcGPS, Etc), 2002