

01170
9



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA
DE MEXICO**

DIVISION DE ESTUDIOS DE POSGRADO
FACULTAD DE INGENIERIA

GEOLOGIA SATELITAL

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:

MAESTRO EN INGENIERIA ELECTRICA

(OPCION: COMUNICACIONES)

P R E S E N T A :

JOSE LUIS MARTINEZ FLORES

ASESOR: DR. MIGUEL MOCTEZUMA FLORES



MEXICO, D. F.

TESIS CON
PALA DE ORIGEN

OCTUBRE DE 2003

A



Universidad Nacional
Autónoma de México



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.

Dedicatoria:

"Uno de los aspectos pendientes que la humanidad a lo largo de su existencia aún no conoce, es la resistencia que tenemos para sobrevivir ante las situaciones adversas. Esto es posible gracias a millones de años de evolución que nos han enseñado que lo más importante es sobrevivir y enviar nuestra herencia en carga genética y experiencia a las próximas generaciones.

De esta forma quiero dedicarte este trabajo papa, porque aunque no estés aquí para compartir este momento conmigo te llevo en mi carga genética y en la experiencia que me compartiste, la cual debe ser mejor para mis posibles descendientes y que mis hermanos también compartan.

Espero que en esa herencia genómica y molecular, hayas incluido tu capacidad para resistir la enfermedad que durante muchos años te consumió y resististe valientemente, tu capacidad de corregir el camino y sobretodo la dignidad por seguir viviendo, que es lo más valioso que todo ser humano tiene.

Estas herencias espero transmitir las a las nuevas generaciones, aún aquellas que conservan la esperanza y su constancia en la lucha por continuar como especie; ya que eso algún día les dará la capacidad de viajar a las estrellas, en donde si tus herencias y las mías llegan, habremos pasado el umbral de la eternidad."

*Tu hijo
José Luis Martínez Flores*

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Agradecimientos:

A quien me dio la otra mitad de la carga genética: Mi mamá Blanca

A las dos inspiraciones de siempre: Las abuelas, Socorro y Salustia

A quienes comparten mi carga genética: Mis hermanos, Uriel, Grecia y Abigas

A la viajera del tiempo y bruja de cargo: La vidente del sur, Amparo

A las amistades que siempre están incondicionalmente: Ojos verdes y la niña, Teresa y Edita

Al país que abrió mis perspectivas y puntos de vista: La India

A la amiga que esta lejos como las sonda viajero, fuera del sistema solar: Adriana Ocampo

A quien espero encuentre su paz interna y encuentre su camino perdido: Amanda

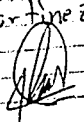
Al amigo inesperado que me lleno de bríos nuevos para seguir amando a la ciencia: Ulises

A la que considere mi casa por muchos años, pero que me enseñó que solo era mi plataforma de lanzamiento: Facultad de Ingeniería

A la madre inspiradora de todas mis aventuras: la UNAM.

Y gracias a ti, por enseñarme el amor y respeto incondicional.

José Luis Martínez Flores

La Dirección General de Bibliotecas de la UNAM difundirá en formato electrónico e impreso el contenido de mi trabajo académico.
NOMBRE: José Luis Martínez Flores
FECHA: 17/Oct/03
FIRMA: 

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Geología Satelital

INDICE TEMÁTICO

INTRODUCCIÓN	ii
CAPÍTULO I, "PLACAS TECTÓNICAS Y SISMOLOGÍA"	1
I.1 Tectónica de Placas	2
I.2 Sismología	11
CAPÍTULO II, "POSICIONAMIENTO GLOBAL"	17
II.1 Modelos Terrestres	18
II.2 Modelos de relación Tierra-Satélite	23
II.3 Comunicaciones móviles terrestres	26
II.4 Comunicaciones satelitales	28
CAPÍTULO III, "DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA OMEYOCAN"	34
III.1 Consideraciones Iniciales	35
III.2 Referencia Terrestre	35
III.2 Referencia Espacial	41
III.3 Referencia Total	46
III.4 Descripción del sistema	51
CAPÍTULO IV, "RESULTADOS"	59
IV.1 Movimientos dentro del área fija	60
IV.2 Movimientos entre sitios de diferentes ciudades	74
CONCLUSIONES	78
BIBLIOGRAFÍA	79
ANEXO A	A



Introducción

Los retos del tercer mundo en el campo de la ciencia y la tecnología son variados y muy complejos. Al presentar múltiples vertientes de estos problemas, siempre llegamos a un factor común: el dinero.

La ciencia y la tecnología no solo merecen, sino representan una gran inversión de recursos, así para el que invierte como para el que la desarrolla y crea el conocimiento. En este mundo globalizado, en donde el tercer mundo necesita desarrollar su propia materia tecnológica y científica, puede ser necesario encontrar una doble aplicación a la tecnología que compramos y en la que invertimos tiempo para asimilarla.

En el presente trabajo, se estudia una de estas posibilidades, al encontrar una íntima relación entre los sistemas de comunicaciones móviles y la geografía del lugar en donde son colocados. Se explota la posibilidad de estudiar en un inicio la posición de dichos sistemas dentro de las ciudades, para proporcionar una referencia fija y estudiar vibraciones en estructuras y desplazamientos del terreno.

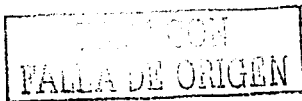
La propuesta va más allá al usar a dichos sistemas para encontrar desplazamiento entre ciudades usando como referencia un sistema de telecomunicaciones vía satélite. El aspecto, tal vez más valioso es el de tomar la información geográfica, del sistema fijo de las estructuras y antenas de un sistema con acceso por códigos (CDMA), el cual cuenta para su sincronización con instrumentos de satélites de posicionamiento global (GPS), así estas estructuras se vuelven por sí mismas instrumentos de medición.

El Capítulo I nos lleva por un recorrido acerca de la estructura de la Tierra, las placas tectónicas y la sismología, para llegar a la observación de que vivimos en un planeta que se encuentra en constante movimiento.

El Capítulo II nos muestra el posicionamiento global, las definiciones de los datums; los diferentes tipos de coordenadas y la relación de la posición de los satélites geoestacionarios con respecto a la Tierra. Además tenemos una introducción a la definición de células en un sistema de telecomunicaciones móviles.

El Capítulo III nos muestra al sistema Omeyocan (que en náhuatl quiere decir: "El que se crea así mismo") que es el que se encargará de analizar la información proveniente del sistema de comunicaciones móviles, de como se clasifica esta y de la estructura por medio de la cual nos daremos cuenta de movimientos locales y nacionales.

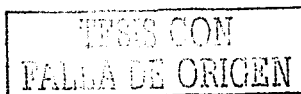
El Capítulo IV expone los resultados de distintos ejemplos que se proponen utilizando datos reales de una red CDMA y de un punto de medición real en la ciudad de Acapulco.



Geología Satelital

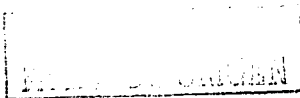
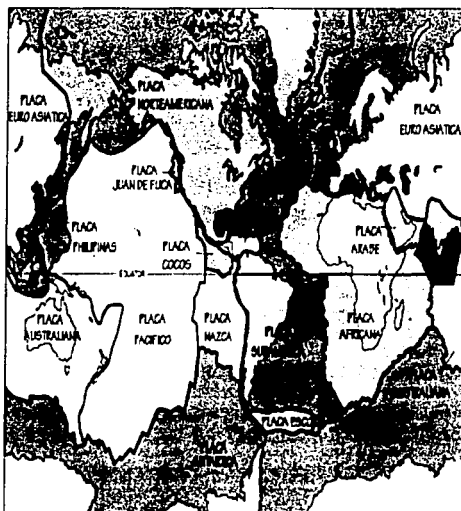
Con esta información, se plantea la posibilidad de contar con una estructura inmersa en alguna ciudad en la que se desee estudiar movimientos y además de propuestas y de los criterios establecidos para detectar movimiento aparente, auxiliándose de complejas estructuras matemáticas como lo son las relaciones de Voronoi y la triangulación de Delanuay.

*José Luis Martínez Flores
Agosto, 2003*



Capítulo I

Placas tectónicas y sismología



PAGINACION DISCONTINUA

1.1- Tectónica de Placas

1.1.1 Los Continentes se mueven.

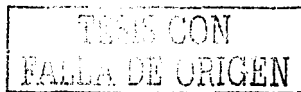
A finales del siglo XIX y principios del XX, algunos geólogos, mantenían la idea de que los continentes se habían movido alguna vez sobre la superficie de la Tierra. La principal causa de esta inquietud fueron las remarcables coincidencias en forma, de las costas de América del Sur con las de África. La hipótesis del desplazamiento continental fue especialmente desarrollada por el alemán Alfred Wegener, un conferencista de astronomía y meteorología, que sugirió que alguna vez todos los continentes estuvieron juntos en dos supercontinentes. Además de usar las coincidencias en las formas de las costas antes mencionadas, Wegener uso también la distribución de fósiles y la similitud de las evidencias litológicas. Wegener nació en la ciudad de Berlín el 1° de Noviembre de 1880 en el seno de una familia evangelista. En su juventud desarrolló un fuerte interés por las ciencias de la Tierra. Estudió Astronomía en la Universidad de Berlín, donde recibió su grado doctoral en 1904. [1] [2]

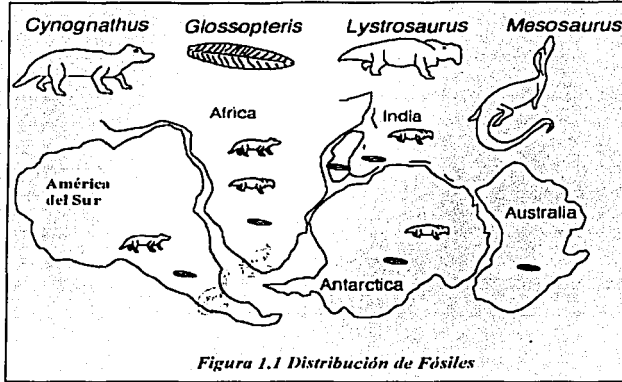
1.1.2 Distribución de los fósiles.

Wegener estudió la distribución de los fósiles animales y de plantas para auxiliarse en sus interpretaciones. Wegener encontró, que la planta denominada *Glossopteris*, tenía muchos restos fósiles, que se podían encontrar en varias posiciones continentales del hemisferio sur. Esto ayudó a su hipótesis, ya que Wegener sostenía que para que la *Glossopteris* estuviera presente en varios continentes del hemisferio sur, era necesario que estos hubiesen estado unidos anteriormente, (Figura 1.1). Usando esta evidencia, él "unió" todos los continentes, junto con la India, en uno solo al que denominó: *Pangea*. (Figura 1.2)

1.1.3 Litología.

Wegener también estudió la distribución de los mayores cuerpos geológicos, tales como los basamentos cristalinos (rocas y corteza continental) complejos y depósitos de minerales. Descubrió que sus primeras estimaciones realizadas en mapas, eran corroboradas por la alineación de los complejos geológicos a cada lado del océano Atlántico. Por ejemplo, cuando visitó las costas de África y América del Sur, encontró grandes bloques de una antigua roca denominada craton que formaba patrones contiguos en la línea divisoria de uno y otro continente. Las montañas que corren de Este a Oeste a través de Sur África, parecen ligarse a la hilerita cercana a Buenos Aires en Argentina. El estrato de rocas distintivas del sistema Karoo en Sur África, que consiste en capas de arenisca, esquistos y arcilla entrelazados con juntas de carbón, son idénticos a aquellos encontrados en el sistema de Santa Catarina en Brasil. [2]





Los descubrimientos de Wegener fueron publicados en 1915, en su libro: "El origen de los continentes y de los océanos". Sus ideas no fueron muy aceptadas ya que los críticos pensaban que las evidencias además de escasas, eran muy pobres, lo que resultaba en una explicación vaga del desplazamiento continental y por tanto imposible. Las críticas se convirtieron en una serie de ataques que culminaron con la renuncia de Wegener de la Universidad de Berlín y se desplazó, por algún tiempo a la Universidad de Graz en Austria.



1.1.4 El tiempo le da la razón a Wegener.

El desarrollo de dos disciplinas fueron importantes para que las teorías de Wegener, acerca del desplazamiento de los continentes fueran aceptadas. Por una parte el paleomagnetismo y por otra la oceanografía. El desarrollo de estas dos disciplinas le darían la razón a Wegener.

El paleomagnetismo está basado en el principio de que en las rocas ígneas fundidas, las partículas magnéticas se alinean con respecto al campo magnético de la Tierra. Este registro magnético se almacena dentro de las rocas cuando estas se enfrían. Las desviaciones en la dirección de estas partículas paleomagnéticas respecto a la dirección actual del campo magnético de la Tierra, demuestran que los continentes se han movido. Un físico británico Patrick Blackett, ganador del premio Nobel en 1948 por sus trabajos en física nuclear y radiación cósmica, diseñó un aparato muy sensitivo llamado magnetómetro astático. Usando este equipo, fue posible por primera vez detectar la orientación de los débiles campos magnéticos. Esto permitió a los investigadores detectar el magnetismo en rocas que antes era imposible estudiarlas paleomagnéticamente con el equipo de entonces. [1]

Durante la década de los 60's, dos científicos de Cambridge, Inglaterra: Drummond Matthews y Fred Vine descubrieron que en cada lado de la cordillera submarina en la mitad del Atlántico, había una serie de anomalías magnéticas lineales. Bandas distintas de corteza de la cordillera, alternaban la orientación magnética. Estas observaciones, se explicaron en términos de un modelo de extensiones del suelo marino por medio del cual nuevas formas de cortezas oceánicas a lo largo de las cordilleras oceánicas como dos mitades de un océano, se movían una con respecto de otra. [2]

Con las observaciones anteriores se desarrollo la Teoría de la Tectónica de Placas que intenta explicar el movimiento relativo de seis gigantescas secciones de la litósfera terrestre.

1.1.5 Tectónica de Placas.

La Teoría de las Placas Tectónicas sostiene que la superficie de la Tierra está cubierta por seis grandes placas de litósfera y otras tantas pequeñas, cada una de 100 Km de ancho, desplazándose sobre la astenósfera [2] (Figura 1.3 y Figura 1.4). Se cree que las placas son rígidas y se mueven como unidades coherentes; esto es, las placas no se arrugan y rompen como una hoja húmeda de papel, pero actúan como una madera delgada y rígida que flota en el agua. Las placas se flexionan suavemente, provocando una deformación de la corteza hacia arriba o hacia abajo, pero los lugares donde ocurre una deformación intensa es en los límites donde una placa choca con otra. A estos márgenes de las placas, se les llama: *zonas activas*; los interiores de las placas se les denomina como *zonas estables*. [1],[2],[8]

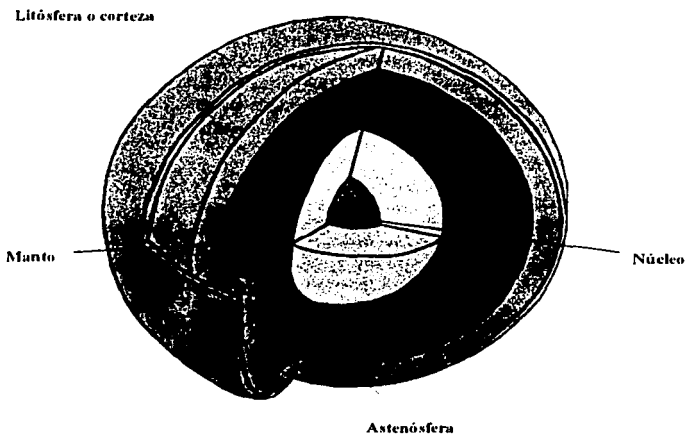


Figura 1.3 La Tierra en capas

No se sabe con certeza qué causa los esfuerzos que producen los movimientos de las placas, pero se cree que éstos son producidos por transferencia conectiva de calor, término que significa que el calor es llevado de un lugar a otro por el movimiento mismo del medio. [8]

Aunque el manto terrestre está compuesto por minerales, en su seno pueden presentarse corrientes de convección como en un líquido; pero esto tiene sentido en períodos de tiempo muy largos. Una manera de entender este proceso consiste en considerar un cierto volumen de roca. Si aplicamos a éste una tensión por un tiempo corto, la roca vuelve a su posición inicial es decir se comporta elásticamente. Si la tensión se aplica por un periodo prolongado de tiempo, la roca quedará deformada permanentemente, es decir la roca fluye plásticamente. De esta manera podemos ver que el concepto de material rígido, elástico o fluido depende de las fuerzas y el periodo de tiempo en que le son aplicadas a un material. [8]

I.1.6 Clasificación de los límites de las placas.

Las placas tienen tres clases de márgenes o movimientos: *divergentes*, márgenes en cuales una placa se aparta con respecto de otra; *convergentes*, márgenes en los cuales una placa choca o se aproxima a otra; y las *fallas*, márgenes en los cuales una placa con respecto a otra, simplemente roza. Cada margen crea distintas topografías en su vecindad, y esta ligada con una clase distinta de movimiento sísmico o actividad volcánica[2].

I.1.7 Márgenes Divergentes.

Se consideran como una línea a través de la cual, dos placas adyacentes se mueven una con respecto de la otra y entre ellas surge material de la astenósfera, que produce nueva litósfera, que se solidifica y une a las placas separadas. En la figura 1.5, podemos observar la posición actual de las placas tectónicas y las flechas nos indican como se separan una con respecto a la otra en forma horizontal. Se producen algunos terremotos y surgen volcanes, después de la separación. Algunos ejemplos de placas divergentes son la cordillera media en el océano Atlántico y las montañas oceánicas del Pacífico Este [2].

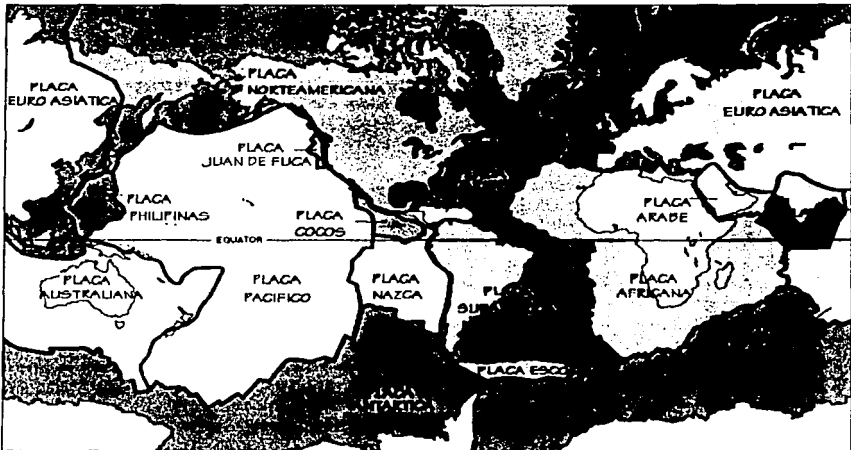


Figura 1.4 Placas Tectónicas

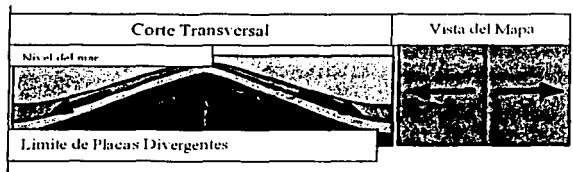


Figura 1.5 Placas Divergentes

1.1.8 Márgenes Convergentes

En un margen convergente, dos placas están en relativo movimiento horizontal, una con respecto a la otra. Una de las placas se fuerza a deslizarse debajo de otra en un ángulo aproximado de 45°, esto significa que una las placas se incorpora nuevamente al manto de la Tierra a través de la zona de subducción. La zona de subducción, provoca zanjas oceánicas que resultan en una reducción del área de una las placas. En la figura 1.6 podemos observar, en la parte derecha la dirección de las placas en su movimiento que resulta en una colisión de las placas. Ejemplo de ello son la zona de subducción de la placa de Cocos y la de Norteamérica al Sur de México y las placas de Filipinas, Norteamérica y el Pacífico en Japón. [1],[8]

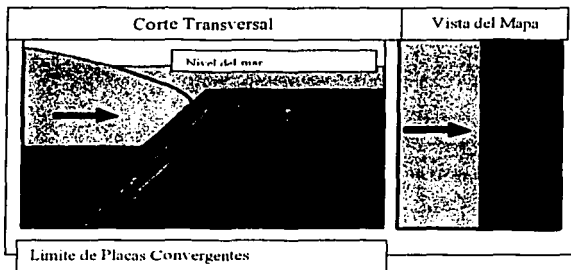


Figura 1.6 Placas Convergentes

1.1.9 Fallas de Transformación

En este caso las placas se mueven lateralmente una con respecto a la otra, lo que provoca rozos entre éstas. Estos movimientos, provocan en algunos casos fracturas en la litósfera. No se encuentra ligada ninguna actividad volcánica con este tipo de fallas, pero sin embargo se encuentran relacionados una gran cantidad de sismos de gran magnitud. La

falla de San Andrés en California es un ejemplo de este tipo de movimiento entre placas tectónicas. La figura 1.7 nos muestra la dirección vertical de este movimiento de rocas entre las placas. Este movimiento también puede ser del tipo horizontal, como ejemplo una placa se mueve con dirección al norte y la otra con dirección sur y hacen roce en uno de sus bordes. [2], [4-7]

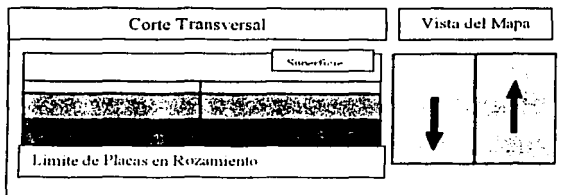


Figura 1.7 Falla de Transformación.

1.1.10 Sismos y Movimiento de Placas.

Las diferentes placas en las que se encuentra dividida la litósfera, mantienen uno de los desplazamientos antes mencionados (convergentes, divergentes o fallas). En los límites de las placas se registran gran cantidad de movimientos sísmicos como se presentan en la figura 1.8.

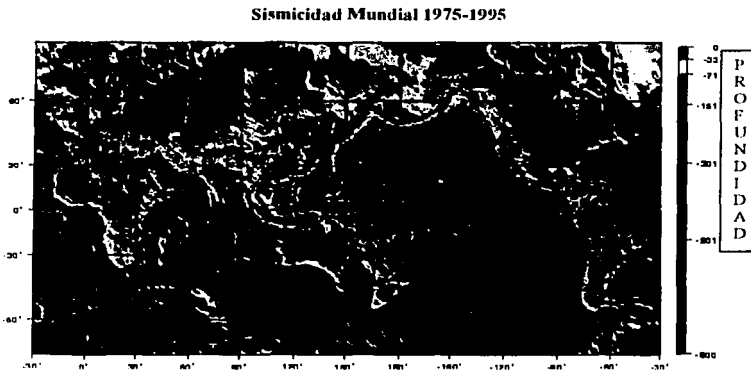


Figura 1.8 Sismicidad Mundial

En la misma figura, se resumen los movimientos sísmicos registrados desde 1975 y hasta 1995 con una barra a la derecha que indica la profundidad de los focos de cada uno. Se observa además que los sismos registrados coinciden, en su mayor parte con los límites de las placas tectónicas.

La relación del movimiento de las placas tectónicas y los sismos es como sigue: en primer lugar notemos que en una zona de subducción el movimiento de una placa bajo la otra se realiza venciendo las fuerzas de fricción, generadas en el contacto entre ambas. A lo largo de este contacto, llamado zona de *Wadati-Beniof* (WB), el movimiento de una placa contra la otra tiene lugar discontinuamente. Es esto lo que genera los temblores en esas regiones. Para ilustrar este ejemplo, acudamos a la figura 1.9, que representa un bloque de cemento sobre una mesa. Conforme aumentamos el peso, la tensión en el cable continúa acumulándose hasta que iguala a la fuerza de fricción, a partir de este momento el bloque comenzará a moverse.[8]

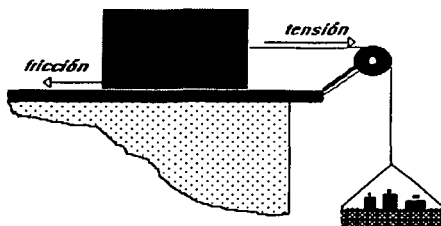
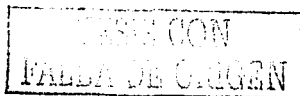


Figura 1.9

Análogamente, en la zona WB se acumula gradualmente la tensión hasta que rebasa un límite, en ese momento comienza a presentarse un fallamiento en un punto que denominamos *foco*, desde donde se propaga a toda una superficie.

Este comportamiento puede ser observado cuando el contacto entre placas aflora en la superficie de la Tierra, como en falla de San Andrés, en California. De hecho, fue en observaciones hechas en esta falla que pudo deducirse en este mecanismo, conocido como la *Teoría del Rebote Elástico*. Esto ocurrió durante el sismo de San Francisco en 1906. La figura 1.10 muestra dos placas durante el movimiento lateral que produce la acumulación de esfuerzos. Cuando los esfuerzos rebasan cierto límite y el fallamiento se produce en un punto y se propaga en ambas direcciones. Se dejan ahora un desplazamiento que permanece entre ambas caras de la falla. [1-2],[8]



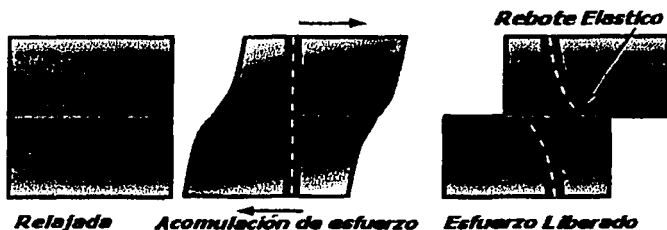


Figura 1.10

Aunque este proceso puede parecer intuitivamente obvio, en realidad no lo es; durante mucho tiempo, se pensó que el fallamiento de la corteza era un efecto de los temblores y no el origen de los mismos.. Como fuentes de éstos, se pensaban en intrusiones de magma o colapso de volúmenes por cambios de densidad de las rocas que componen la corteza. Aunque estos mecanismos pueden ciertamente ocurrir, en la actualidad sabemos que la mayoría de los temblores en la zona de subducción, se originan por el mecanismo expuesto y son llamados "tectónicos". Otros tipos de sismos están asociados a fenómenos locales, como la actividad volcánica o el colapso del subsuelo por la extracción de fluidos o materiales del subsuelo.[2], [8]

Es necesario hacer dos observaciones que no están explícitas en los párrafos anteriores. La primera es que si bien los sismos son generados por la ruptura en el plano de la falla, las ondas así creadas se propagan a través de la tierra porque para los tiempos involucrados en la propagación de las ondas (del orden de varios segundos) esta se comporta como un cuerpo elástico. [1-2],[8]

La segunda concierne al comportamiento mecánico de las rocas. Cuando una roca es sometida a una fuerza pequeña por un tiempo corto de tiempo, la roca se deforma; pero al cesarla fuerza , recupera su forma original. A esto ya nos referíamos en la discusión anterior; sin embargo, cuando la fuerza a que se somete al material es mayor que su resistencia, este se rompe o falla a lo largo de un plano que es el llamado plano de falla. Si existe un plano de falla preexistente, una nueva ruptura tenderá a presentarse en el mismo lugar porque este es un plano debilitado por rupturas anteriores. De la misma manera, si tenemos dos placas en contacto, la resistencia al movimiento entre ellas se da a causa de la fricción entre las caras; sin embargo la fuerza de fricción entre ellas es mucho menor que la que sería necesaria para romper nuevas rocas, de manera que las fuerzas acumuladas tenderán a fallar a lo largo del mismo plano. [1-2][8]

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

1.2 Aspectos básicos de sismología

La sismología refiere algunos terminos que deben ser aclarados antes de continuar. En esta sección pretendemos definir los siguientes términos: *foco*, *epicentro*, *ondas P*, *ondas S*, *ondas superficiales*, *intensidad* y *magnitud*.

El *foco* se define como el lugar donde se realiza una ruptura entre dos placas, su reflejo en la superficie es lo que se conoce como *epicentro*. Se conocen tres tipos de foco, los *poco profundos* (a 65 Km aproximadamente de profundidad), los *intermedios* (entre 65 y 300 Km de profundidad) y los *muy profundos* (entre 300 y 725 Km de profundidad). (Figura 1.11) Es preciso señalar que los epicentros siempre se encuentran en la superficie. [1]

En las placas convergentes se presentan los tres tipos de focos, de éstos, los más peligrosos son los poco profundos. Esto se debe a que las ondas sísmicas (P,S, Love) se expanden con mayor facilidad sin encontrar mayor resistencia. Si esto ocurre cerca de una zona urbana el peligro aumenta. [2]

En los límites divergentes se presentan solo focos muy profundos y por último en las fallas se presentan intermedios y poco profundos. Sin embargo, la mayor parte de los sismos se produce en focos poco profundos (75% de estos). [1-2],[4-6],[8]

Cuando se produce un sismo, una gran cantidad de energía almacenada genera movimiento en una dirección determinada en forma de ondas de propagación. Estas ondas se dividen en tres tipos: ondas S, ondas P y ondas Superficiales.

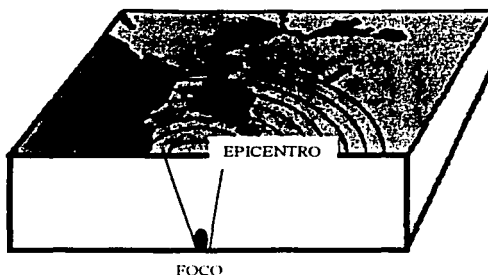


Figura 1.11 Foco y Epicentro

Las ondas P o primarias son también llamadas ondas de compresión; en este caso el movimiento del material es paralelo a la onda de propagación, es decir se produce un movimiento que trata de separar material como en la figura 1.12 a, además este tipo de onda es la que tiene mayor velocidad y de allí que se le llame primaria. Las ondas S o secundarias, tienen un movimiento perpendicular respecto a la onda de propagación, que trata de subir y bajar material como en la figura 1.12 b. Los tipos anteriores de ondas, comparten la característica de tener baja amplitud; esto quiere decir que no provocan demasiada vibración al pasar a través de la Tierra y que pertenecen a las ondas llamadas internas.[2]

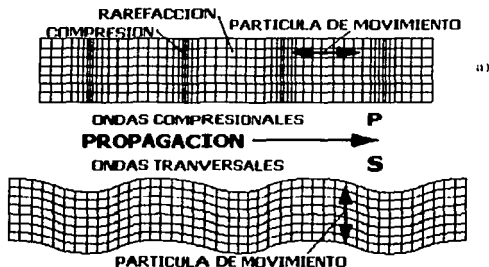


Figura 1.12 Ondas P y S

Al alcanzar la superficie de la Tierra, la energía sísmica genera otro conjunto de ondas llamadas: *ondas superficiales*, estas son de dos tipos: las ondas Love (LQ) y las ondas Rayleigh (LR). Las primeras son horizontalmente perpendiculares a la dirección de propagación, es decir se produce un movimiento en el que se trata de separar objetos, pero ahora horizontalmente, como se muestra en la figura 1.13. Las segundas producen un movimiento elíptico que provoca una cierta regresión hacia la onda de propagación, como se muestra en la figura 1.14. La combinación de ambas ondas produce un movimiento vertical y horizontal de la superficie.

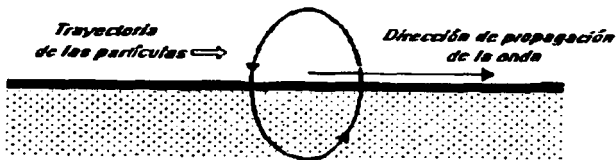


Fig. 10

Figura 1.13 Ondas Love

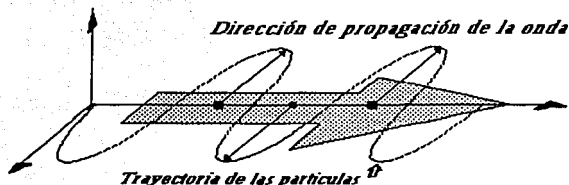


Figura 1.14 Ondas Rayleigh

La *Intensidad* es una medida de los efectos de un terremoto en un sitio en particular, en seres humanos, estructuras o en el mismo terreno. La intensidad en ese punto no depende solamente de la fuerza del terremoto (magnitud) sino también de la distancia de ese punto al epicentro y de la geología local. Fue diseñada en 1931 por Mercalli se ilustra contra la magnitud en la tabla 1.1.[1]

Por otro lado, la *Magnitud* es una medida de la fuerza de un sismo o de la energía liberada por éste. Se determina por medio de observaciones en sismógrafos. Se trata de un valor logarítmico definido originalmente por Charles Richter (1935). La escala es logarítmica así que el registro de un 7 en la escala representa un disturbio con movimiento de tierra 10 veces más potente que una registrado de 6. La mayor contribución de Richter fue el descubrir que las ondas sísmicas propagadas por todos los terremotos pueden proporcionar buenas estimaciones de sus magnitudes. El concentro los registros de las ondas sísmicas de un gran número de terremotos, y desarrollo un sistema de calibración para medición de las magnitudes. [5-6],[8]

Richter demostró que entre mayor fuera la energía intrínseca de un terremoto, mayor era la "amplitud" de movimiento del terreno en una distancia dada. Calibró su escala de magnitud usando la medida de "amplitud" máxima de la onda de cizallamiento (la onda S) en un periodo de 20 segundos, registrando datos en un sismógrafo altamente sensible a este tipo de ondas. Aunque inicialmente su trabajo fue calibrado únicamente por estos sismómetros específicos, y sólo para terremotos en el sur de California, los sismólogos han desarrollado factores de escala para ampliar la magnitud Richter a muchos otros tipos de medición en todo tipo de sismógrafos y alrededor del mundo. [1-2],[8]

La figura 1.15 muestra como usar el método original de Richter para calcular la magnitud por medio de un sismograma.

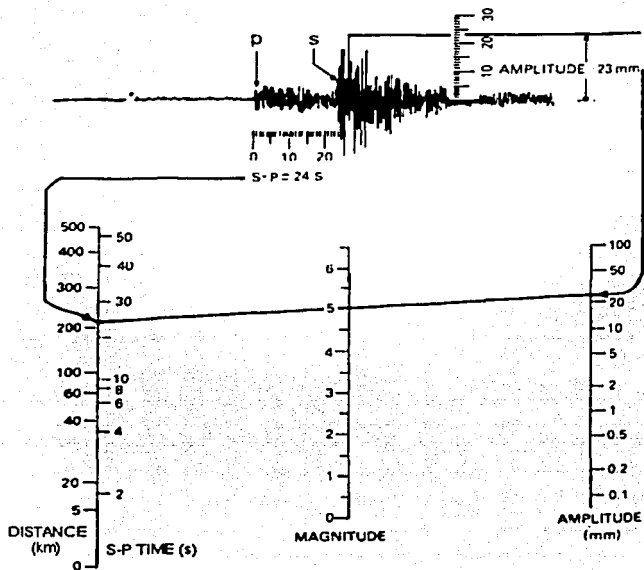


Figura 1.15 Sismógrafo

Después de haber medido la "amplitud" de onda, se tiene que calcular su logaritmo y escalarlo por un factor según la distancia que haya entre el sismógrafo y el terremoto, luego se calcula la magnitud a través de la diferencia de tiempo de S-P (es decir entre ondas P y S). Las escalas en el diagrama de la figura 1.15, forman un nomograma que permite realizar el cálculo matemático rápidamente. La ecuación que representa el nomograma es la siguiente:

$$M = \log_{10} A(mm) + 3 \log_{10} (8\Delta t(s)) - 2.92 \dots \dots \dots (1.1)$$

Donde A es la "amplitud" en milímetros, medida directamente del registro en papel fotográfico del sismógrafo Wood-Anderson, que es un instrumento especial. El tiempo S-P en segundos, nos da como resultado Δt . [6]

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Los simólogos tratarán de obtener una estimación de magnitud separa de cada estación sísmica donde se registre el terremoto, para luego obtener promedio. Estos promedios reportados en los diferentes laboratorios sismológicos justo en el moemnto posterior de un terremoto, comunmente difieren aproximadamente en 0.2 unidades de magnitud. Cada laboratorio calcula entonces el promedio de las magnitudes obtenidas en las diferentes estaciones a las que tienen acceso. Pueden pasar varios días para que las diferentes organizaciones lleguen a un consenso acerca de cuál fue la mejor estimación de magnitud. [1-2],[8] En la siguiente tabla 1.1 , podemos observar la escala de magnitud Richter comparada contra la escala de intensidad Mercalli.

Magnitud	Intensidad	Descripción
1.0-3.0	I	I.- Se siente por algunas personas, pero sólo en circunstancias especiales.
3.0-3.9	II-III	II.- Se siente por algunas personas en reposo, especialmente en edificios muy altos. III.- Aunque se siente en edificios altos, algunas personas no los reconocen como sismos. Las vibraciones son similares al paso de un automóvil pesado.
4.0-4.9	IV-V	IV.- Se siente por muchas personas, dentro y fuera de edificios. Se mueven algunas lámparas y ventanas, las paredes parecen crujir. V.- Se siente casi por todo mundo. Se rompen algunas ventanas. Se llegan a caer objetos colgados o pendientes. Los péndulos de relojes llegan a detenerse.
5.0-5.9	VI-VII	VI.- Se mueven objetos y muebles pesados. Daños menores. VII.- Daños menores en edificios y construcciones de buen diseño. Daños considerables en edificios mal diseñados o de cimientos débiles.
6.0-6.9	VII-IX	VIII.- Daños considerables en estructuras bien diseñadas; daños sustanciales e incluso colapsos de edificios con deficiente diseño. Caída de columnas o monumentos. IX.- Rompimiento de tuberías, daños graves edificaciones bien diseñadas. Daños en cimientos de edificios.
7.0 ó mayores	VIII o mayores	X.- Rieles de tren rotos o deformados. Edificios en su mayoría colapsados y algunas estructuras severamente dañadas. XI.- Rieles de tren con grandes deformaciones. Estructuras dañadas gravemente en sus cimientos. Puentes destruidos. XII.- Daño Total. Líneas de vista y de niveles distorsionados. Los objetos son lanzados al aire.

Tabla 1.1 Comparación de las escalas de Magnitud (Richter) contra la Intensidad (Mercalli)

MAGNITUD RICHTER	NÚMERO AL AÑO
Más de 8.0	1 a 2
7.0-7.9	18
6.0-6.9	120
5.0-5.9	800
4.0-4.9	6,200
3.0-3.9	49,000
2.0-2.9	300,000

Tabla 1.2 Ocurrencia de sismos de diferente magnitud al año

La tabla anterior (1.2) nos muestra la ocurrencia de sismos de distinta magnitud al año. La siguiente tabla (Tabla 1.3), presenta los sismos más destructivos registrados en la época moderna. En la tabla, también observamos que los lugares donde sucedió el sismo están cerca o en algunos casos, como la ciudad de Kobe en Japón, encima de la convergencia de algunas placas.

AÑO	LUGAR	No. DE VÍCTIMAS	MAGNITUD
1906	Colombia	1,000	8.9
1915	Italia	29,980	7.5
1920	China	200,000	8.6
1923	Japón	143,000	8.3
1933	Japón	2,900	8.9
1944	Japón	1,000	8.3
1950	India	1,530	8.7
1960	Chile	5,000	9.5
1976	China	255,000	8.0
1985	México	9,500	8.1
1995	Japón	15,000	8.3

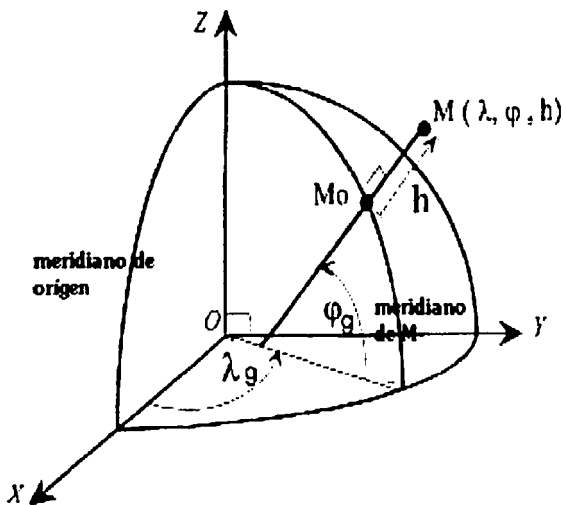
Tabla 1.3 Sismos con mayor magnitud registrados

Es evidente que el movimiento de las placas o su deriva sobre la astenósfera, provoca fallas de distintas características que al liberar energía producen un sismo, del cual poco sabemos de su pronóstico y detección.[4-6],[8], [14]

TESIS CON
TABLA DE ORIGEN

Capítulo II

Posicionamiento Global



CON
FACILIDAD DE ORIGEN

II.1 Modelos Terrestres

Nuestro medio de estudio es la superficie terrestre, por tanto el conocimiento de su estructura y los modelos usados en la geología para su estudio se hacen necesarios en este punto. En los siguientes subcapítulos estudiaremos el modelo geoidal, la referencia elíptica y las diferentes técnicas de posicionamiento y su representación en proyecciones.

II.1.1 Posicionamiento y sistemas de coordenadas usados en Geología

La geología se interesa por los puntos que representan posiciones sobre la superficie terrestre. Para lograr esta tarea con la mayor confiabilidad se necesita un sistema de coordenadas bien definido. Muchos sistemas de coordenadas se usan en este campo, algunos tienen como centro a la Tierra (sistemas geocéntricos) algunos otros no. Las coordenadas cartesianas y las curvilíneas son usadas de igual manera. También existen sistemas de coordenadas diseñados específicamente para fines astronómicos o de posicionamiento satelital, las cuales no son apropiadas para describir posiciones terrestres.

Los sistemas geocéntricos tienen al eje Z alineado al eje de rotación terrestre (sistema terrestre instantáneo) o alineados a un eje de rotación hipotético adoptado por convención (sistemas terrestres convencionales). Los sistemas geocéntricos se volvieron útiles recientemente con el advenimiento de los satélites de posicionamiento. Anteriormente, los sistemas no geocéntricos se usaban para trabajos locales (observaciones) en cuyo caso su origen se encuentra localizado sobre un punto de la superficie terrestre (sistemas topocéntricos llamados astronómicos locales o geológicos locales), o para trabajos continentales o regionales.

Ambos sistemas, geocéntricos y no geocéntricos utilizan elipsoides de referencia, elipsoides de revolución o elipsoides biaxiales, también llamados en la literatura antigua "esferoides". (El uso moderno de esta palabra se usa para superficies casi esféricas, las cuales son más complicadas que los elipsoides biaxiales). Estas elipsoides de referencia son consideradas concéntricas con los sistemas de coordenadas geocéntricos o no-geocéntricos, con su eje Z coincidiendo con el eje de revolución de la elipsoide. La idea básica detrás del uso de la elipsoide de referencia es que está representa la forma real de la Tierra.

Las elipsoides de referencia son superficies horizontales en donde las latitudes y longitudes geodésicas se describen. Es importante notar que para que el modelo de la elipsoide sirva como referencia, debe ser fija con respecto a la Tierra. Tal elipse (fija con respecto a la Tierra) es conocida como el datum horizontal. Por ejemplo para Norteamérica existe el Datum norteamericano de 1927 conocido como NAD 27 y el de 1983 llamado NAD 83.

Las coordenadas geodésicas horizontales, latitud ϕ y longitud λ , junto con la altura geodésica h , son las coordenadas básicas para los modelos curvilíneos ampliamente usados en la geología.[1,2]

Estas coordenadas se encuentran relacionadas a sus coordenadas cartesianas asociadas x, y y z por medio de las siguientes expresiones:

$$x = (N + h) \cos \varphi \cos \lambda \quad \text{Ec. 2.1}$$

$$y = (N + h) \cos \varphi \sen \lambda \quad \text{Ec. 2.2}$$

$$z = (Nb^2/a^2 + h) \sen \varphi \quad \text{Ec.2.3}$$

donde N es el radio local de curvatura del elipsoide de referencia en la dirección este-oeste,

$$N = a^2(a^2 \cos^2 \varphi + b^2 \sen^2 \varphi)^{-1/2}, \quad \text{Ec.2.4}$$

a es el semi-eje mayor y b es el semi-eje menor de la elipsoide de referencia. Se debe notar que las coordenadas geodésicas horizontales, son las usadas para hacer los mapas, gráficas, literales nacionales, etc. Las transformaciones entre estas coordenadas horizontales y los planos cartesianos x, y sobre los mapas se llaman mapas cartográficos. [21.22]

II.1.2 Elipsoide y Geoid de referencia

La superficie topográfica es aquella superficie terrestre, sobre la cual las mediciones geológicas se realizan. Estas mediciones se reducen a la referencia de la geoid. Las mediciones de la navegación marítima se realizan en la superficie del océano, que se aproxima a la geoid.

El geoid es una superficie a través de la cual la gravedad siempre es igual y en la cual la dirección de la gravedad es siempre perpendicular. El último punto es particularmente significativo, ya que los instrumentos ópticos cuentan con dispositivos de nivel los cuales son comúnmente usados para hacer mediciones geodésicas. Cuando se ajustan apropiadamente, el eje vertical del instrumento coincide exactamente con la dirección de la gravedad y es por definición perpendicular a la geoid. Figura 2.1

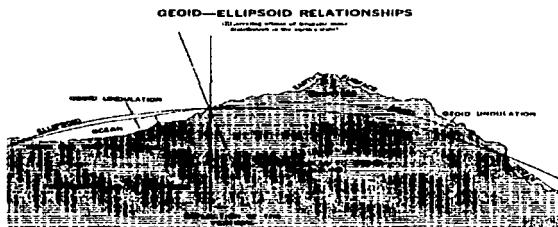


Figura 2.1 Elipsoide y Geoid de referencia

El geóide es aquella superficie que forman los océanos sobre la Tierra, si libremente se ajusta al efecto combinado de la atracción de masa terrestre y de la fuerza centrífuga de la rotación terrestre. La distribución desigual de la masa terrestre, hace que la masa de la geóide sea irregular.

La geóide hace referencia al tamaño y forma verdadera de la Tierra, pero esta es de una forma irregular y tiene serias limitaciones como modelo matemático de la Tierra por los siguientes motivos:

- 1.- No tiene una completa expresión matemática
- 2.- Las pequeñas variaciones que pueden suceder en algún momento en su superficie, introduce pequeños errores en su medición.
- 3.- Las irregularidades en su superficie pueden necesitar un número ilimitado de cálculos para aproximarse al modelo real.

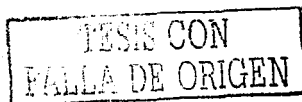
La superficie del geóide, con algunas excepciones, tiende a elevarse en las montañas y a hundirse en las bases oceánicas.

Para propósitos geológicos, de mapeo y gráficos es necesario usar una forma geométrica regular muy cercana a la forma de la geóide sin importar si es en forma local o global y cual tiene una forma matemática específica. Esta forma es la elipsoide.

Las separaciones de la geóide y la elipsoide son llamadas: altura geoidal, ondulaciones geoidales o separaciones geoidales.

Las irregularidades naturales en densidad y profundidades del material forman la corteza superior de la Tierra lo cual también resulta en pequeñas alteraciones de la dirección de la gravedad. Estas alteraciones se reflejan en la forma irregular del geóide, la superficie que es perpendicular a la línea vertical de rotación.

Ya que la Tierra es aplanada por los polos y alargada en el Ecuador, la figura geométrica usada en la geología que mejor se aproxima a la forma de la Tierra es el esferoide oblicuo o el elipsoide de revolución. Esta es la forma tridimensional obtenida por la rotación de la elipse en su eje menor.[21]



11.1.3 Definición del Elipsoide

Un elipsoide de revolución se define únicamente por dos parámetros. Los geólogos por convención, usan el eje semimayor y el aplanamiento. El tamaño se representa por el radio del Ecuador, el eje semimayor. La forma de la elipsoide esta dada por el aplanamiento, el cual indica que tanto una elipsoide se asemeja a una forma esférica. El aplanamiento, es la

razón de la diferencia entre los ejes semimayor y semimenor de la elipsoide y el eje semimayor. Vea la figura 2.2. Si a y b representan el eje semimayor y el semimenor, respectivamente, de la elipsoide y f el factor de aplastamiento,

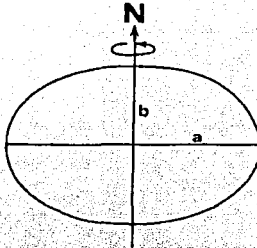


Figura 2.2 Parámetros de la Elipsoide de referencia

Esta razón es cerca de $1/300$ para la Tierra. El modelo de la Tierra elipsoidal tiene su eje menor paralelo al eje polar de la Tierra.

II.1.4 Superficies de referencia del Elipsoide y del Geoide

Ya que la superficie del geoide es irregular y la superficie del elipsoide es regular, ningún elipsoide puede ofrecer más allá de una aproximación a una parte de la superficie geoidal. La figura 2.3 ilustra un ejemplo. Una variedad de elipsoides son necesarios para cubrir por completo a la Tierra.

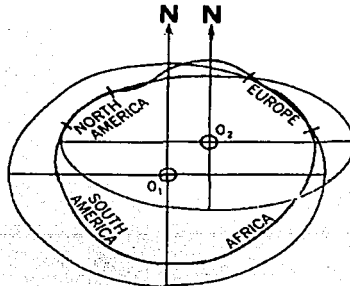


Figura 2.3 Zonas de referencia

II.1.5 Coordenadas

La latitud astronómica es el ángulo entre el eje de rotación y el plano del Ecuador celeste. Es la latitud resultado directamente de la observación de los cuerpos celestes, no corregido por la desviación de la componente vertical del meridiano en la dirección Norte-Sur. La latitud astronómica, se aplica solo a posiciones sobre la Tierra. Se calcula a partir del Ecuador astronómico (0°), y 90° norte-sur.

La longitud astronómica es el ángulo entre el plano del meridiano celeste y el plano del meridiano celeste en Greenwich. Es la longitud que resulta directamente de observaciones de cuerpos celestes, no corregido por la desviación de la componente vertical en la dirección de la vertical primaria (este-oeste). Estas son las coordenadas observadas por el navegador terrestre usando un sextante y un reloj muy preciso basado en la rotación terrestre.

Las observaciones celestes por geólogos son hechas con instrumentos ópticos (teodólitos, cámaras de zenith, astrolabio prismático) todos ellos contienen dispositivos de nivel. Cuando se ajustan apropiadamente, los ejes verticales del instrumento coinciden con la dirección de la gravedad, el cual no coincide con el plano del meridiano.

La latitud geodésica es el ángulo que una normal a la elipsoide, en una estación hace con el plano del ecuador geodésico. Al registrar una posición geodésica, es esencial que el datum geodésico en el cual esta basado también sea estable. Una latitud geodésica, difiere de la correspondiente latitud astronómica por la cantidad de componente meridiano de la desviación local de la vertical.

La longitud geodésica es el ángulo entre el plano del meridiano geodésico en una estación y el plano del meridiano geodésico en Greenwich. Una longitud geodésica difiere de la correspondiente longitud astronómica por la componente vertical primaria de la desviación local de la vertical dividida por el coseno de la latitud. La coordenadas geodésicas son usadas para realizar mapas.

La latitud geocéntrica es el ángulo en el centro de la elipsoide (usada para representar la Tierra) entre el plano del ecuador y una línea recta (o radio vector) a un punto de la superficie de la elipsoide. Esta difiere de la latitud geodésica porque la Tierra es aproximadamente más cercana a un esferoide que a una esfera y los meridianos son arcos de círculos perfectos.

Ambas latitudes geocéntricas y geodésicas se basan en la elipsoide de referencia y no en la Tierra. Ya que los paralelos de la latitud son considerados círculos, la longitud geodésica es geocéntrica y por lo tanto no se usa expresión por separado.

Un datum geodésico horizontal usualmente consiste de latitud astronómica y geodésica, así como la longitud geodésica y astronómica de un punto inicial (origen); un azimuth de una línea (dirección); los parámetros (radio y aplanamiento) de la elipsoide seleccionada para los cálculos; y la separación geodésica del origen. Un cambio en cualquiera de estas cantidades afecta a todos los puntos en el datum.

11.2 Modelos de Relación Tierra-Satélite

El sistema de coordenadas topocéntricas, con origen en una estación terrena cualquiera emplea como parámetros la distancia d al satélite y los ángulos Az de azimuth respecto del norte medido en el plano horizontal y θ_{ES} de elevación sobre dicho plano. Como este sistema depende del sitio donde se encuentre la estación terrena necesariamente está asociado al sistema de coordenadas geográficas de la superficie de la Tierra y gira con ella. Un método para determinar Az , θ_{ES} y d consiste en convertir los parámetros de posición del satélite en coordenadas geocéntricas inerciales a coordenadas geográficas y después convertir a las coordenadas del sistema topocéntrico.

El sistema inercial tiene en parte similitud con el de la superficie de la Tierra, ya que el ángulo de declinación δ del satélite equivale a la latitud del punto subsatelital, en el cual el vector de posición de la nave cruza la superficie del planeta. La diferencia más importante consiste en que la dirección de referencia para el ángulo de ascensión recta α del sistema inercial es un punto casi fijo en el espacio sidéreo, en tanto que en el de la Tierra la dirección de referencia o de longitud 0 es el meridiano de Greenwich, que gira una vez por día. Por tanto, es necesario conocer el ángulo de dicho meridiano respecto de la dirección del equinoccio de Marzo (γ) en un momento dado, denominado ángulo de Greenwich (GHA) o tiempo sideral de Greenwich (GST), que ha menudo se expresa en forma de horas o segundos, y puede convertirse a ángulo. La posición de longitud geográfica (λ_S) de un satélite en un momento dado puede expresarse entonces por la ecuación

$$\lambda_S = \alpha - \text{GHA} \text{ grados} \quad \text{Ec. 2.5}$$

en la cual tanto α , como GHA son función del tiempo. Las longitudes convencionalmente son positivas hacia el este y negativas hacia el oeste. Cuando el satélite es Geostacionario tanto α como GHA varían nominalmente en la misma proporción y la longitud del satélite es constante. Cuando el satélite no es geostacionario normalmente α varía en valor medio más rápidamente que GHA y puede ser necesario restar múltiplos de 360° a la ecuación descrita anteriormente, para obtener valores de λ_S menores de 360° . La longitud de la estación terrena es un ángulo fijo λ_{ES} en el sistema de coordenadas geográficas y la diferencia entre las longitudes λ_S y λ_{ES} puede expresarse por:

$$\Delta\lambda = \alpha - \text{GHA} - \lambda_{ES} \quad \text{Ec. 2.6}$$

La siguiente figura 2.4 muestra la posición de un satélite tanto en coordenadas topocéntricas como inerciales, así como la posición de la estación terrena de referencia en coordenadas geográficas.

El ángulo ϕ de latitud de la estación terrena es positivo hacia el norte del ecuador y negativo hacia el sur igual que el ángulo δ , $\Delta\lambda$ es positivo hacia el Este y negativo hacia el Oeste. Az puede representarse con valores de 0 a 180° para valores positivos de $\Delta\lambda$ y negativo en el

mismo intervalo para negativos de $\Delta\lambda$, en tanto que θ solo tiene valores positivos de 0 a 90° hacia satélites visibles desde la estación terrena.

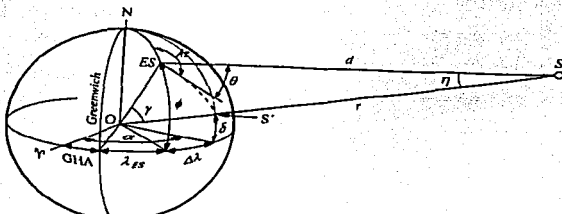


Figura 2.4 Modelo de referencia Tierra-Satélite

La conversión de uno a otro sistema de coordenadas, está basado en las relaciones de los ángulos mostrados en la figura anterior junto con las distancias r y R_E (radio de la Tierra). El ángulo de azimut está determinado por un triángulo esférico mayor con dos ángulos rectos formado por el círculo ecuatorial y los dos círculos mayores que pasan por la estación terrena E_s , y por el punto subsatelital S' , así como por el triángulo menor que se forma al trazar la línea superficial que une los dos sitios mencionados, la cual describe el ángulo central γ con vértice en el centro del planeta como se muestra en la figura siguiente.

Los ángulos de azimut γ se pueden determinar por trigonometría esférica, empleando las ecuaciones:[24]

$$\tan Az = \frac{\text{sen} \Delta\lambda}{\tan \delta \cos \phi - \text{sen} \Delta\lambda \cos \phi} \quad \text{Ec 2.7}$$

$$\cos \gamma = \text{sen} \delta \text{sen} \phi + \cos \Delta\lambda \cos \delta \cos \phi \quad \text{Ec 2.8}$$

donde los valores resultantes de Az serán correctos si al calcularlos se utiliza la función ATAN2 con dos argumentos

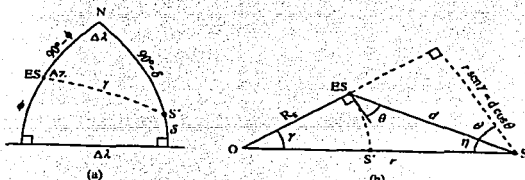


Figura 2.5 Ángulos y lados para deducir las relaciones entre parámetros en distintos sistemas de coordenadas

Los valores de θ y d se deducen de la figura anterior que representa el triángulo O/ES/S más uno adicional de apoyo para deducir las relaciones empleando trigonometría plana

$$d = \sqrt{r^2 + R_E^2 - 2rR_E \cos \gamma} \quad \text{Ec 2.9}$$

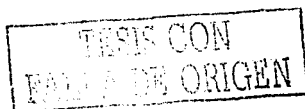
$$\cos \theta = \frac{r \operatorname{sen} \gamma}{d} \quad \text{Ec 2.10}$$

También, de la misma figura se puede notar que el ángulo nadir entre ES y O con vértice en el satélite es

$$\eta = 90^\circ - \gamma - \theta \quad \text{Ec 2.11}$$

La distancia d de la estación terrena al satélite puede medirse o calcularse según se requiera. En realidad, en el caso de satélites geostacionarios los usuarios de sus servicios suponen constante la distancia al satélite, y las estaciones con antenas pequeñas solo utilizan los ángulos de azimuth y elevación al instalarlas y cuando requieren apuntar a otro satélite. Las estaciones de los usuarios con reflector de antena grande o mediana cuentan con sistemas de seguimiento del satélite que permiten modificar los referidos ángulos en forma automática sin intervención constante del dato de la distancia. En cambio, las estaciones de control de dichos satélites necesitan el dato preciso de la distancia d y de hecho la obtienen por medición empleando el método de monopulso, debido a que es esencial para mantener al satélite dentro de los límites de posición tolerados, ya que al variar d cambia el período de la órbita.

Las estaciones terrenas con antenas múltiples de alta ganancia al operar con satélites en órbitas distintas a la geostacionaria, necesitan calcular los valores de d , Az y $\theta_{ES}(0)$, ya que como no tienen visibilidad continua de cada uno de ellos, cada antena en algún momento debe estar orientada para comunicarse con uno que se tiene previsto que surja en un punto preciso en el horizonte, por lo que no pueden depender únicamente de un sistema de rastreo o seguimiento. Para este propósito se requiere tener prevista la posición del satélite en cada instante en coordenadas inerciales y hacer la conversión a topocéntricas.



11.3 Comunicaciones Móviles Terrestres

En los últimos años el desarrollo comercial y tecnológico de las comunicaciones personales ha tenido un crecimiento exponencial. Las redes terrestres implantadas para proporcionar este servicio a los usuarios móviles, cubren diversos y diferentes sitios en un territorio o locación.

Las diferentes tecnologías de acceso representan ventajas y desventajas que las empresas operadoras y los clientes explotan en diversas formas. Una de estas tecnologías de acceso usa la sincronización proporcionada por el sistema de posicionamiento global (GPS).

La tecnología CDMA (Code División Múltiple Access) sincroniza todos sus recursos por medio de los relojes atómicos a bordo de los satélites GPS y obtiene la posición (elevación, latitud y longitud) de todos los sitios o radiobases que conforman su red, además de la sincronización.

Como podemos observar en la figura 2.6 la distribución de las radiobases para una ciudad como Acapulco se realiza de una forma estratégica, ya que el propósito de estos sistemas es atender los centros comerciales, oficinas, vías rápidas y en fin todo aquel lugar donde exista una alta concentración de personas.

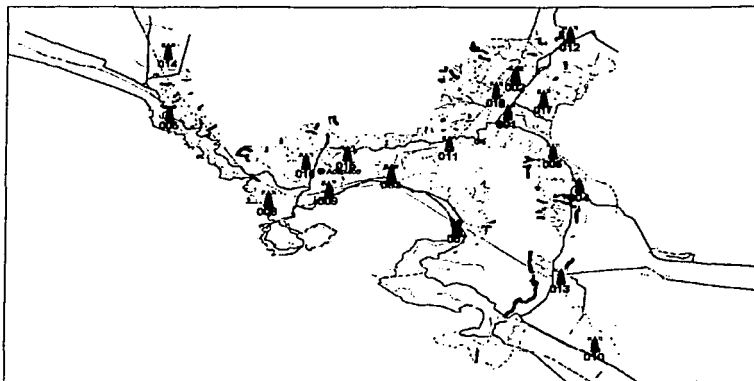


Figura 2.6 Configuración de ejemplo para Acapulco

El sistema CDMA debe tener la información acerca de la posición de sus radiobases porque muchos de los medios que comparten recursos, necesitan conocer la posición de los móviles en un momento determinado.

En la figura 2.7 podemos observar la composición de la radiobase, en primer lugar; la estructura que suele ser de diferentes formas, en esta se montarán las antenas de radiofrecuencia, el contenedor que protege al equipo electrónico del medio ambiente y la antena de GPS sobre el contenedor. Como se trata de equipo que requiere una continuidad en su funcionamiento, la mayor parte de los sitios contiene alimentación eléctrica propia y baterías para asegurar su funcionamiento hasta por las siguientes 48 horas si ocurriera una falla en el suministro eléctrico.

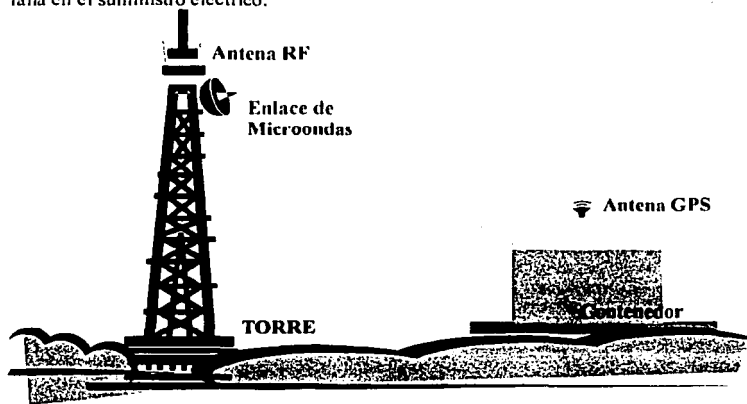


Figura 2.7 Elementos de una Radiobase para comunicación móvil

II.4.1 Células

En las décadas de los 70's y los 80's fue inventado el sistema de células. Una célula es un área determinada, pequeña, que tiene las ventajas de requerir transmisores mucho menos potentes que un viejo sistema y el uso extensivo de frecuencias en todas las ciudades, a través de la reutilización.

Esto se realiza a través del reparto de una zona en varias células (áreas más pequeñas), de forma hexagonal, para poder abarcar todo el espacio. En cada célula existe una estación base

transmisora, con lo cual, se pueden tener múltiples canales para el uso de decenas de móviles de manera simultánea. Cuando un usuario pasa de una célula a otra deja la frecuencia que estaba utilizando, para el uso de otro celular, y toma la frecuencia libre de la célula a la que pasó.

Como las distancias de transmisión no son muy grandes, los teléfonos móviles pueden transmitir con poca energía; por lo tanto, con pequeñas baterías que permiten un tamaño y peso reducido. Por lo anterior, es que son usadas las células en la telefonía celular.

11.5 Comunicaciones satelitales

En nuestro país existe una gran cantidad de antenas de reflector parabólico aplicadas en transmisiones satelitales, algunas de estas se encuentran en centros urbanos o en sitios en las afueras. A diferencia de las redes celulares, estos sistemas son puntuales, es decir su objetivo es un satélite para lograr una conexión.

El medio de acceso conocido como TDMA (Time División Múltiple Access), utilizado en los enlaces satelitales con la configuración de una estación maestra y varias terrenas, requiere de una sincronización para la entrega de los paquetes transmitidos desde la estación maestra hasta cada una de las estaciones remotas. Esto se esquematiza en la figura 2.8.

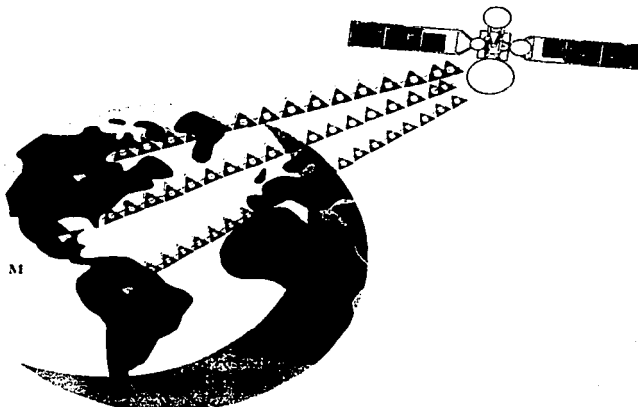


Figura 2.8 Ejemplo de estaciones terrenas y maestra

La sincronización para la entrega de estos paquetes, es transmitida por la estación maestra a las estaciones remotas.

11.5.1 Rango y ángulo

Los centros de control miden dos diferentes parámetros para determinar la posición del satélite, el rango y ángulo con ayuda del sistema de Telemetría, Rastreo y Comando (TT&C, por sus siglas en inglés).

La medición del ángulo se realiza variando el apuntamiento del sistema de antena en tierra y buscando una máxima ganancia de recepción o usando técnicas de monopulso, que se describirá más adelante. Dependiendo de las características de la antena, la precisión de esta medición esta entre 0.05° y 1° .

La técnica de interferometría se usa como otra alternativa para medir este ángulo. Supongamos dos estaciones A y B separadas por una distancia L que reciben una señal de telemetría que se transmite a la frecuencia f, como se muestra en la figura 2.9.

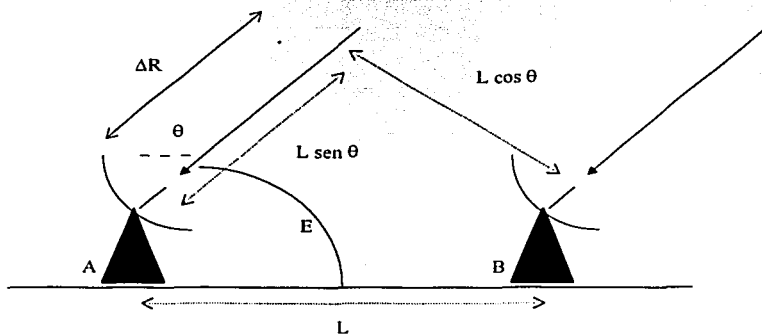
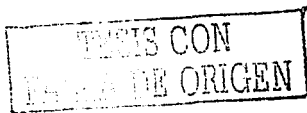


Figura 2.9 Medición del ángulo por interferometría

La diferencia en distancia ΔR entre el satélite y cada estación es proporcional a la diferencia en tiempo de propagación $\Delta t = \Delta R/c$ y se mide por un desfaseamiento $\Delta\phi = 2\pi f \Delta t$ entre las señales recibidas

$$\Delta\phi = \frac{2\pi L \cos E}{\lambda} \quad (3.3)$$

donde E es el ángulo de elevación de las antenas.



Geología Satelital

Con esta ecuación se obtiene el ángulo de elevación de las antenas. El satélite se encuentra en un cono de ejes AB con un ángulo medio en el apex E. La combinación de este par de estaciones permite la localización del satélite en la intersección de los conos relacionados. La precisión de la medición es de alrededor de 0.01°.

Por otro lado, la medición del rango se realiza por medio de un desplazamiento entre señales con la siguiente ecuación:

$$\Delta\phi = 2\pi f \frac{R}{c} \quad (\text{Ec. 2.12})$$

En la práctica, este desplazamiento se mide por medio del envío de una señal senoidal al satélite y con la retransmisión de la misma en una forma modulada.

Una serie de señales senoidales llamadas tonos, son sucesivamente moduladas en fase en la portadora de telecomando del enlace de subida cuya frecuencia nominal es f_u . Estas señales son demoduladas a bordo del satélite y remoduladas en la portadora de telemetría del enlace de bajada f_D . La fase de los tonos recibidos en la estación de control en tierra son comparados con los tonos transmitidos para determinar el rango del satélite. La precisión de esta medición esta dada por la frecuencia más alta ("tono mayor", 100 kHz en banda S). La serie de los siguientes tonos senoidales ("tonos menores"), resuelve la ambigüedad resultante del hecho de que la distancia estación-satélite es más grande que la longitud de onda del tono mayor.

La ambigüedad solo puede ser resuelta si el tono de la frecuencia senoidal es menor a 8 Hz. Los tonos menores transmitidos sucesivamente se obtienen por división del tono mayor (20 KHz, 4KHz, 800 Hz, 160 Hz, 32 Hz, 8 Hz). El defasamiento relativo del tono senoidal de la frecuencia de 8 Hz se puede determinar con la precisión temporal del tono mayor. La precisión de esta medición es de algunos metros como se muestra en la siguiente tabla y depende de la relación señal a ruido y al defasamiento debido a la propagación troposférica.

Sistema VHF

Banda de frecuencia:	Enlace de subida Enlace de bajada	148 a 149.9 MHz 136 a 138 MHz
Número de tonos senoidales:		6
Rango promedio instrumental (incluye hardware en tierra y a bordo del satélite, excluye errores de propagación ionosférica)		En S/N límite : 141 m En S/N infinito: 21 m
Error de propagación ionosférico:		Varia de 0.1 a más de 2 Km

Resolución máxima de ambigüedad: $1.5 \cdot 10^4$ Km

Sistema de banda S

Banda de frecuencia: Enlace de subida 2025 a 2120 MHz
Enlace de bajada 2200 a 2300 MHz

Número de tonos senoidales: 7

Rango promedio instrumental (incluye hardware en tierra y a bordo del satélite, excluye errores de propagación ionosférica) En S/N límite : 174 m
En S/N infinito: 3.75 m

Error de propagación ionosférico: Varía de 0 a 300 m

Resolución máxima de ambigüedad: $1.8 \cdot 10^4$ Km

Tabla 2.1 Método de tono para medir la distancia al satélite geostacionario

11.5.2 Deriva en la órbita geostacionaria

Una órbita geostacionaria perfecta estaría exenta de excentricidad y de inclinación y tendría un período exactamente igual al de rotación de la Tierra, con lo cual el satélite parecería completamente inmóvil respecto de las estaciones terrenas. Dicha perfección es imposible debido a pequeños errores en las maniobras de control del satélite y a perturbaciones causadas por factores externos como los campos de gravedad del Sol, de la Luna y de la propia Tierra. No obstante, un satélite en una órbita geostacionaria real puede funcionar para las estaciones terrenas que lo utilizan como si tuviera una órbita de Kepler perfecta, mientras la desviación en cada uno de los parámetros mencionados se encuentre dentro de ciertos límites estrechos. Al excederse los valores de los parámetros de la órbita de dichos límites ya no puede considerarse ésta como geostacionaria desde el punto de vista de las normas de operación del sistema particular en que se encuentre el satélite, sino como casi geostacionaria, y existen diversas formas de detectar esta situación.

Cualesquiera que sean las causas de la inexactitud de una órbita geostacionaria, las pequeñas desviaciones en el período, en la excentricidad y en la inclinación tienen cada una manifestaciones particulares que permiten reconocerlas para corregirlas.

La colección de datos de distancia, azimuth y elevación obtenidos desde cada estación terrena debe tener la mayor precisión posible, distribuirse uniformemente en el tiempo, y si es posible abarcar un arco muy amplio de la trayectoria del satélite.

La precisión de los datos obtenidos depende de la calibración adecuada de los equipos que realizan la medición de distancia o rango (d) y de la exactitud del apuntamiento de las antenas utilizadas para medir los ángulos de azimuth (Az) y elevación (θ_{ES}). Para convertir

Geología Satelital

en el siguiente paso los datos a coordenadas inerciales (r, α, δ), se requiere también la ubicación de la estación terrena en longitud (λ_s) y en latitud geográfica (transformada a latitud egocéntrica ϕ^*), así como la corrección de su distancia al centro de la Tierra (R_R).

Las mediciones desde cada estación terrena deben de ser frecuentes, pero en general es más importante la uniformidad mencionada y la extensión del arco que obtener un máximo número de lecturas.

Para una órbita de deriva, es decir, que se aproxima a la geostacionaria, las estaciones pueden realizar mediciones cada hora durante medio día, o cada hora durante un día completo si solo participa una estación.

Para una órbita inclinada en sincronía, el ángulo cenit experimenta cambios diarios, que causan distintos retrasos como se muestra en la figura 2.9I, rango y la velocidad de cambio de rango se muestran en esta figura que son del satélite sincrónico ATS 1.

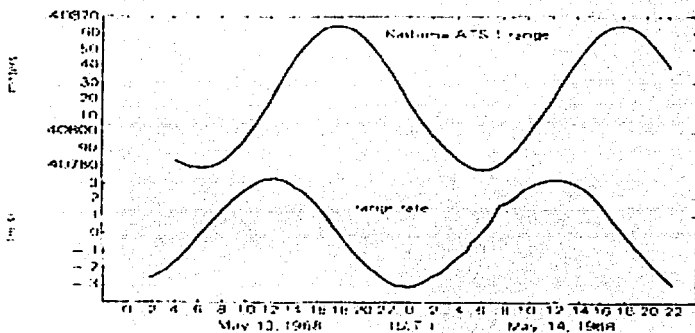


Figura 2.9 Deriva del satélite ATS1

III.5.3 Sincronización

TDMA (Time División Múltiple Access, División de tiempo por acceso múltiple) es una técnica muy usada en los satélites geostacionarios de telecomunicaciones para compartir el ancho de banda de un transpondedor. Esto es más eficientemente ya que varios usuarios comparten un mismo canal, pero para tal propósito el sistema se debe encontrar en sincronización, así cada una de las estaciones sabe de alguna forma cuando es su tiempo para transmitir o recibir.

Para TDMA es importante esta sincronización ya que puede tenerse pulsos sobrepuestos o choque de los mismos en la transmisión.

Supongamos una estación maestra conectada a diversas terminales remotas colocadas en diversos puntos de un territorio. La estación maestra se encuentra enviando una serie de pulsos o bits (1000 bps), esta señal llega al satélite y es nuevamente retransmitida a la estación remota en tierra. La estación remota también envía una señal al satélite de las mismas características al satélite, solo que esta señal se retransmite a la propia estación remota. Ambas señales, la enviada por la estación maestra y por la remota son exactamente de las mismas características, es decir mismo periodo y secuencia. Para lograr una correcta sincronización con la estación maestra, las estaciones remotas deben de realizar las siguientes funciones:

1. Recibir el pulso de la estación maestra
2. Transmitir su propio pulso misma secuencia y periodo del de la estación maestra
3. Realizar una comparación entre la secuencia remota y la maestra (error de fase/retrazo)
4. Usar este tiempo de error para corregir el tiempo de retraso provocado por el tiempo de viaje al satélite y retorno (≈ 0.25 s)

Esto se expresa en la figura 2.10

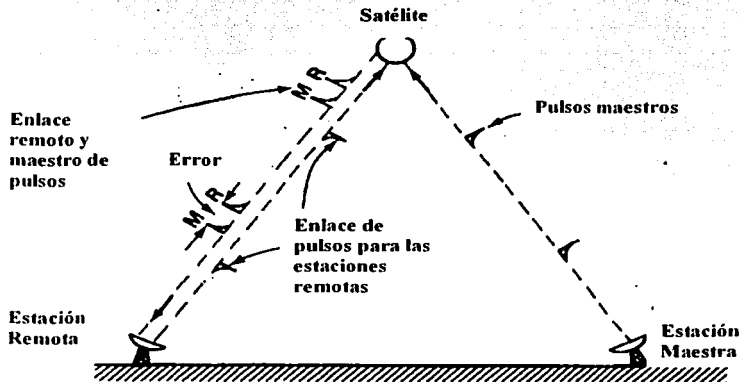
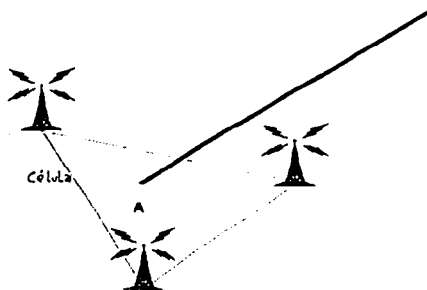


Figura 2.10 Sincronización Maestro a Remotas

Capítulo III

Sistema Omeyocan



TECIS CON
FALLA DE ORIGEN

III.1 Consideraciones Iniciales

Las telecomunicaciones dependen íntimamente del terreno o de las características de este. Así por ejemplo, los enlaces de microondas o la propagación para comunicaciones móviles, dependen de la morfología del terreno y de su posición en este. Un terreno muy accidentado interpondrá múltiples obstáculos a la propagación o una laguna o costa cercana modificarán los patrones de radiación de las antenas de radiofrecuencia.

Aprovechando esta relación y dado que estos factores se toman en cuenta para realizar el cálculo de enlace de cualquiera de estos sistemas, propondremos un sistema que utiliza la información que proviene principalmente de dos fuentes: las comunicaciones móviles con sistema de acceso CDMA y las comunicaciones satelitales que miden constantemente la distancia al satélite con el cual se están comunicando.

III.2 Referencia Terrestre

La referencia terrestre aprovecha la distribución y características de la información de los sitios o radiobases con las características de posición y sincronización presentadas anteriormente.

Si recolectamos la información de una ciudad determinada acerca de la posición de cada una de las radiobases, obtendremos un mapa topográfico de baja resolución, pues las antenas GPS instaladas en tales locaciones miden diferencias de metros en cualquiera de las direcciones de posición, pero son sensibles de programarse con resoluciones de centímetros. En cualquiera de los casos, este sistema nos proporciona una referencia fija para estudiar el perfil del terreno y un cambio dentro de las resoluciones capaces de ser sensadas por las antenas de GPS.

En la figura 3.4 se presentan proyecciones de los tipos de datos de posición. La figura 3.4^a muestra la latitud contra longitud, la 3.4b latitud contra altura y la 3.4c longitud contra altura.

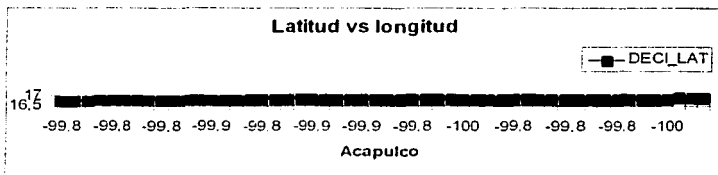


Figura 3.4 a Latitud vs Longitud

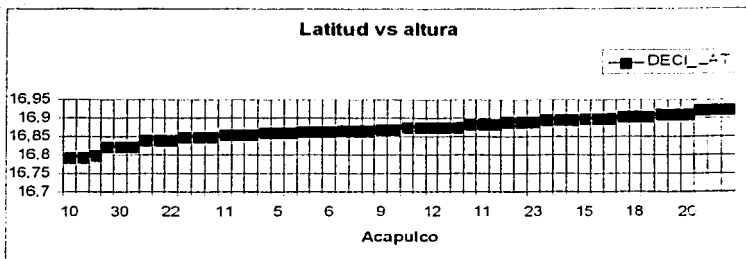


Figura 3.4b Latitud vs altura

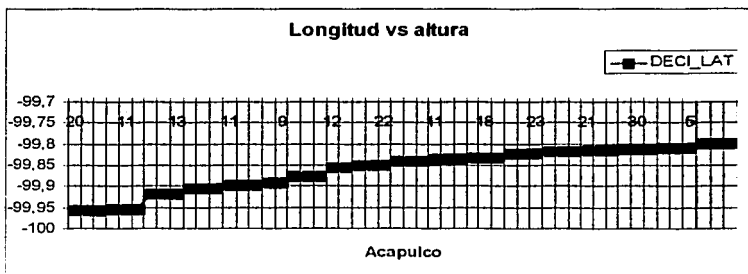


Figura 3.4c Longitud vs altura

De acuerdo a la distribución de los puntos que se muestran en este ejemplo, podemos trazar líneas imaginarias que unen a diversos lugares y se pueden definir áreas o células. Figura 3.5

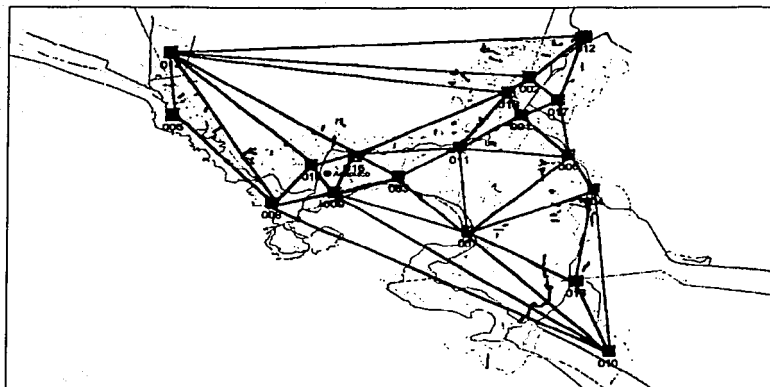


Figura 3.5 Traza de células o áreas sobre Acapulco

Mediante la técnica de triangulación de Delaunay [23], se pueden interrelacionar estos puntos y aprovechar de una manera eficiente su distribución. Este tipo de técnica es usada en la definición de perfiles de terreno. Cuando se definen más puntos, mejor definición se tiene. Otra de las ventajas de este tipo de triangulación es que se puede conocer el área que se define en cada uno de los triángulos. Esta técnica será utilizada para localizar a un elemento errante, dentro del área definida por las células o triángulos. (Apéndice 1)

Una técnica complementaria es la denominada diagramación de Voronoi, que también se explica en el apéndice. Mediante Voronoi conocemos el perfil morfológico del terreno y las zonas de influencia de cada uno de los puntos geográficos con sus vecinos. Con esta técnica podemos conocer una aproximación de la forma en la que el terreno se modifica.

Cabe mencionar que ambas técnicas son adaptivas, lo cual quiere decir que en el caso de que un nuevo sitio sea definido, entonces la triangulación recalcula las aristas y define nuevos triángulos, así como la técnica de Voronoi redefine la situación del terreno con respecto a los nuevos puntos definidos.

Con las dos técnicas antes mencionadas, los puntos geográficos antes descritos se convierten en aristas de los triángulos, con los cuales podemos conocer la dimensión de las áreas que definen, así como la definición del terreno, ya que cada punto contiene la información necesaria de altura, latitud y longitud. A cada uno de los triángulos definidos, les denominamos *células*.

Ahora que hemos definido las células, los puntos nos proporcionan una información adicional que mejora nuestra medición sobre la superficie de interés. La Tierra es un objeto aplanado por los polos y expandido por el Ecuador, esto determina imperfecciones sobre su superficie (figura 3.6). Además de esta característica, las montañas, fisuras, ríos y múltiples elementos dan al terreno ciertas características locales. [Capítulo II]

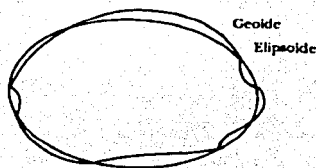


Figura 3.6 Forma aproximada de la Tierra con la Geolide y Elipsoide de referencia

Mediante la precisa localización de estos puntos sobre la superficie, se tiene un detalle del terreno muy útil que ayuda a tomar en cuenta estas imperfecciones para un mejor cálculo del movimiento o desplazamiento en el terreno de interés y que la técnica de triangulación, nos ayuda a localizar.

La función principal de las aristas de las células es la de proporcionar un elemento constante de referencia a cualquier punto dentro de su área. Estos son los datos que proporcionan:

- 1.- Latitud, λ
- 2.- Longitud, L
- 3.- Altura, h
- 4.- Datum usado en México (ITRF época 1988, Inegi 2003)

Los datos acerca de los tres primeros puntos se obtienen por medio de los sensores GPS en las estaciones base cuyas mediciones se encuentran basadas en el modelo de datum WGS-84 (World Geodetic System 1984). Este sistema define un radio ecuatorial de $a=6,378.137$ km y un radio en los polos de $b=6,356.7523142$ km. De acuerdo a la siguiente figura (3.7), podemos notar que se incluyen dos factores que se deben tomar en cuenta con este y otros modelos de datums: la excentricidad (e), la segunda excentricidad (e') y el factor de aplanamiento ó achatamiento (f). [21]

$$e = \sqrt{1 - \frac{b^2}{a^2}} \quad EC3.1$$

$$f = 1 - \frac{b}{a} \quad EC3.2$$

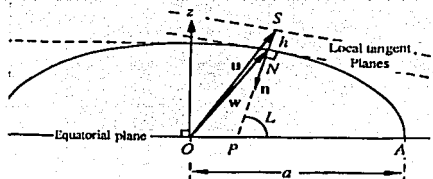


Figura 3.7 Elipsoide de referencia

Para tener una referencia terrestre correcta y llevada al territorio mexicano, se deben hacer las correcciones pertinentes de acuerdo a los siguientes factores para el ITRF época 1988 que el INEGI utiliza como modelo geológico de referencia: [22]

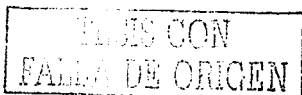
Los valores que definen a este sistema de referencia son:

Semieje Mayor	a	6 378 137 m
Velocidad angular	w	$7\ 292\ 115 \times 10^{-11}$ rad/seg
Constante gravitacional geocéntrica	GM	$3\ 986\ 005 \times 10^8$ m ³ /seg ²
Factor dinámico de la Tierra	J ₂	$108\ 263 \times 10^{-8}$

Constantes geométricas derivadas:

Semieje menor	b	6 356 752.314
Excentricidad lineal	E	521 854.009 7 m
Radio polar	c	6 399 593.625 9 m
Primera excentricidad al cuadrado	e ²	0.006 694 380 022 90
Segunda excentricidad al cuadrado	e' ²	0.006 739 496 775 48
Achatamiento	f	0.003 352 810 681 18
Recíproco del achatamiento	f-1	298.257 222 101
Cuadrante meridiano	Q	10 001 965.729 3 m
Radio medio	R ₁	6 371 008.771 4 m
Radio de la esfera de la misma superficie	R ₂	6 371 007.181 0 m
Radio de la esfera del mismo volumen	R ₃	6 371 000.790 0 m

Tabla 3.1 Datos del modelo de referencia ITRF época 1988



Para evitar el mayor número posible de errores en cuanto al datum de referencia, se debe hacer las transformaciones necesarias de acuerdo al modelo de Molodensky: [6]

Coordinate Conversion

Geodetic Latitude, Longitude, and Height to ECEF, X, Y, Z

$$X = (N + h) \cos \phi \cos \lambda$$

$$Y = (N + h) \cos \phi \sin \lambda$$

$$Z = [N(1 - e^2) + h] \sin \phi$$

where:

ϕ, λ, h = geodetic latitude, longitude, and height above ellipsoid

X, Y, Z = Earth Centered Earth Fixed Cartesian Coordinates

and:

$$N(\phi) = a / \sqrt{1 - e^2 \sin^2 \phi} = \text{radius of curvature in prime vertical}$$

a = semi-major earth axis (ellipsoid equatorial radius)

b = semi-minor earth axis (ellipsoid polar radius)

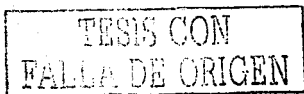
$$f = \frac{a - b}{a} = \text{flattening}$$

$$e^2 = 2f - f^2 = \text{eccentricity squared}$$

Page 11, Date 02/06

Figura 3.8 Método para transformar coordenadas geológicas a coordenadas cartesianas

En la siguiente figura se muestra el modelo de Molodensky para transformar coordenadas geológicas de un datum a otro. Básicamente el modelo incluye convertir las coordenadas geológicas a coordenadas cartesianas (figura 3.8) y obtener la diferencia de estas coordenadas, en el plano cartesiano y entonces reconvertir para obtener las nuevas coordenadas geológicas de acuerdo al modelo de datum usado en la localidad que se requiere saber su exacta latitud, longitud y altura. En la siguiente figura se presenta el modelo original de Molodensky:



Standard Molodensky Datum Transformation: Local System to WGS 84
 (DMA TR 8350.2 Part II Table 7.8 page 7.40 (modified for radians) Peter H. Dana 04M590
 Sample local position (NAD27) in degrees converted to radians and height in meters:
 from_φ := 30 deg from_λ := -100 deg from_h := 232
 Datum constants for FROM datum (NAD 27 CONUS)
 a=equatorial radius f=flattening es=second eccentricity squared:
 from_a := 6378206.4 from_f := $\frac{1}{294.9706902}$ from_es := 2 from_f - from_f from_f
 Datum constants for TO datum (WGS 84): to_a := 6378137.0 to_f := $\frac{1}{298.257223563}$
 NAD27 to WGS 84 datum shift parameters: ΔX := -8 Delta X ΔY := 160 Delta Y ΔZ := 176 Delta Z
 Compute geodetic position shifts: bda := 1 - from_f Polar radius divided by equatorial radius
 δa := to_a - from_a Δa Equatorial radius δf := to_f - from_f Delta flattening
 εφ := sin(from_φ) cφ := cos(from_φ) sλ := sin(from_λ) cλ := cos(from_λ) Sin, cos terms
 Rn := $\frac{from_a}{\sqrt{1.0 - from_es \sin^2(from_φ)^2}}$ Radius of curvature in prime vertical
 Rm := $\frac{from_a}{1 - from_es}$ Radius of curvature in prime meridian
 $\left(\frac{3}{2} \right)$
 (1 - from_es sin^2(from_φ)^2)
 Delta latitude, longitude, height above the reference ellipsoid.
 δφ := $\frac{((- \delta X \epsilon \phi c \lambda - \delta Y \epsilon \phi s \lambda) + \delta Z c \phi) + \delta a \frac{Rn from_es \epsilon \phi c \phi}{from_a} + \delta f \left(\frac{Rm}{bda} + Rn bda \right) \epsilon \phi c \phi}{Rm + from_h}$
 δλ := $\frac{- \delta X s \lambda + \delta Y c \lambda}{(Rn + from_h) c \phi}$ δh := $\delta X c \phi c \lambda + \delta Y c \phi s \lambda + \delta Z \epsilon \phi - \delta a \frac{from_a}{Rn} + \delta f bda Rn \epsilon \phi \epsilon \phi$
 Compute TO position: to_φ := from_φ + δφ to_λ := from_λ + δλ to_h := from_h + δh
 $\frac{to_\phi}{deg} = 30.0002239$ $\frac{to_\lambda}{deg} = -100.0003696$ to_h = 194.816

Figura 3.9 Método original de Molodensky

Una vez que hemos establecido la información que formará los triángulos de nuestro sistema, ahora definiremos la información que contendrá la referencia espacial y de como detectaremos su movimiento dentro de los triángulos definidos por el método de Delanauy.

III.3 Referencia Espacial

Como se apunto antes, la referencia terrestre nos permite definir áreas o células donde conocemos la posición de cada una de las aristas y su corrección de acuerdo al datum usado con esta información podremos formar los triángulos del método de Delanauy.

La referencia espacial, se toma de alguno de los siguientes elementos: satélites de órbita baja (LEO), satélites meteorológicos en órbitas MEO o LEO y de satélites geostacionarios

Geología Satelital

(GEO). Sin embargo y por su relativa estabilidad en la órbita geostacionaria se prefiere a los satélites GEO como referencia espacial. (Figura 3.10)

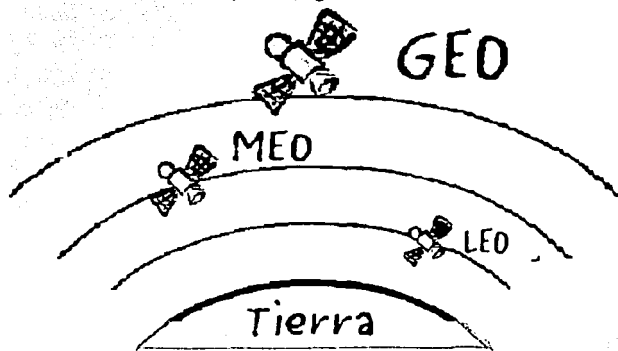


Figura 3.10 Distintas órbitas de satélites

La función de esta segunda referencia, es la de proporcionar al sistema una forma de medir la separación horizontal entre ciudades. La referencia espacial mide de una forma independiente a la referencia terrestre, la separación horizontal entre puntos lejanos. También su función es la de detectar el movimiento de la referencia espacial dentro de los triángulos definidos por la referencia terrestre.

Esta referencia se basa en la propagación de la onda desde el satélite geostacionario hasta algún punto sobre la Tierra. Una de las condiciones para usar a un satélite como estos de referencia, es que tenga cobertura sobre las ciudades en las que se implantará el sistema, al mismo tiempo.

Como podemos ver en la figura 3.11, el satélite de ejemplo mantiene cobertura sobre la ciudad A y B, lo cual es importante porque mediremos el tiempo de propagación τ a cada uno de estos puntos.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

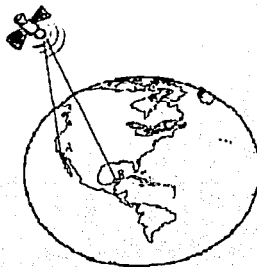


Figura 3.11 Ejemplo de cobertura de un satélite sobre dos puntos.

El método de medir el tiempo de propagación τ , se basa en el hecho de que A y B reportarán diferentes τ 's. Ya que cada sitio reporta diferentes coordenadas geográficas y esto determina diferencias muy pequeñas (en escala de tiempo) entre uno y otro. Estos tiempos no son importantes para los enlaces de comunicaciones, pero para nuestro caso son sensibles.

La referencia espacial, es aconsejable usarla en puntos separados por kilómetros, ya que dentro de una misma localidad o ciudad, el cambio en el tiempo de propagación es mínimo.

Hasta este momento solo hemos definido al punto del satélite y las condiciones de que los puntos de medición se encuentren en la cobertura de este. Los puntos de medición (PM) A y B, para nuestro caso son puntos que no necesitan mayor equipo que una unidad de GPS para determinar (como en el caso de la referencia terrestre) su posición con las correcciones pertinentes del datum. Es decir los puntos A y B no necesitan equipo satelital, porque como se mostrará más adelante, solo se aprovecha la teoría ligada a los enlaces satelitales para conocer ciertas condiciones de su posición.

La referencia espacial usará los puntos de medición y su relación con el satélite propuesto para determinar, entre otras cosas, el vector de separación o línea base entre ellos, que puede ser útil para algunos estudios de geología.

La referencia espacial debe estar dentro de alguna de las células definidas después de aplicar el método de Delanauy a los puntos de la referencia terrestre. Como se ejemplifica en la siguiente figura:

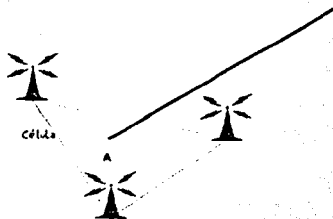


Figura 3.12 Ejemplo de referencia espacial dentro de una célula de referencia terrestre.

Para medir la separación o distancia entre dos distintos puntos sobre la superficie de la Tierra, debemos establecer un modelo. El modelo básico es un triángulo, ya que conocemos:

- a) Distancia al satélite del primer punto A
- b) Distancia al satélite del segundo punto B
- c) Cálculo del ángulo de elevación de cada uno de los puntos

Esta situación se esquematiza en la figura 3.13:

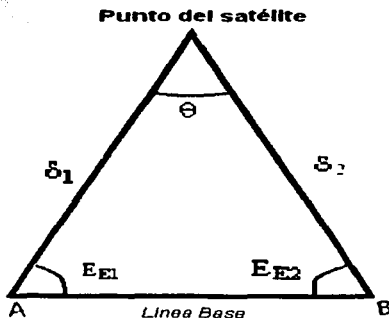


Figura 3.13 Triángulo de referencia para medir la línea base entre puntos

Como se muestra en la figura 3.13 es posible determinar la magnitud de θ , una vez que se han obtenido las distancias δ_1 y δ_2 , respectivamente de cada una de los PM definidos al punto del satélite y que se han obtenido los ángulos de elevación de cada una de las estaciones maestras. Como podemos ver en la figura, se forma un triángulo cuyos vértices

son los PM A, B y el punto del satélite (SL). Se conocen las distancias al satélite δ_1 y δ_2 , así como los ángulos de elevación (E_{E1} y E_{E2}) de cada una de las estaciones.

En la situación descrita en la figura 3.13 necesitamos complementar alguno de los ángulos de elevación para así obtener dos ángulos del interior del triángulo y obtener el tercero, basados en el teorema acerca de que la suma de los ángulos interiores de un triángulo es igual a 180° . El lado del cual, se usará su complemento es por lo regular, el de la estación que se encuentre más al sur, ya que su ángulo de elevación se encontraría teóricamente fuera del triángulo en la mayor parte de las situaciones y tomando como ejemplo al territorio mexicano.

Con este criterio y una vez conocido el ángulo θ , podemos usar la ley de los Cosenos; ya que contamos con un ángulo y la magnitud de dos de sus lados, esto se relaciona mediante la siguiente expresión:

$$c^2 = a^2 + b^2 - 2ab \cos C \quad \text{EC 3.3}$$

Donde a, b y c son las magnitudes de cada uno de los lados del triángulo, C, ángulo formado por las aristas a y b.

La segunda forma, es implícita al cálculo de la distancia de cada uno de los PM al centro de la Tierra y las coordenadas geográficas obtenidas en el GPS y corregidos por el método descrito en la referencia terrestre. Se calcula el ángulo de elevación de cada uno de los PM. Al obtener la diferencia entre las latitudes, esta es similar a la magnitud del ángulo θ del triángulo antes descrito, pero ahora el triángulo es trazado con respecto al centro de la tierra. Las siguientes expresiones, relacionan las coordenadas geográficas con los ángulos de elevación y las distancias al satélite.[17 y 24]

Donde,

ϕ =latitud de la estación terrena

A=diferencia entre la longitud del satélite y de la estación terrena

d= distancia en km de la estación terrena al satélite

$$= 35787(1.42 - 0.42 \cos \phi \cos \Lambda)^{1/2}$$

$$\cos \theta_{ES} = \frac{42165}{d} (1 - \cos^2 \phi \cos^2 \Lambda) \text{grados}$$

Para tener un cálculo más exacto, se realizan las dos estimaciones de forma independiente y con las dos se hacen los ajustes necesarios para una mayor precisión.

III.4 Referencia Total

En los subcapítulos anteriores hemos explicado las dos referencias con las que el sistema estudia el terreno de una forma local o de manera más amplia entre localidades separadas por kilómetros.

En esta sección explicaremos la forma en la que ambas referencias interactúan, dependiendo del terreno en el que se tiene interés. La referencia total se divide en configuraciones, que básicamente son dos: mediciones locales y mediciones de la separación entre localidades.

III.4.1 Referencia Total: Configuración mediciones locales

Recordemos que de cada sitio tenemos la siguiente información: latitud, longitud y altura. Estos datos se muestran en la tabla 3.2:

SITIO	LOCALIDAD	LONGITUD °	LATITUD °	ALTURA m
ACA-001	Renacimiento	-99.8342	16.8916	62
ACA-002	Central de Abastos	-99.8321	16.9073	41
ACA-003	Hospital del Pacífico	-99.875	16.8641	59
ACA-004	Cayaco	-99.8077	16.8613	9
ACA-005	Pie De La Cuesta	-99.9534	16.886	115
ACA-006	Arroyo Seco	-99.8173	16.8755	18
ACA-007	Hyatt	-99.8499	16.8422	95
ACA-008	La Mira	-99.9176	16.8509	183
ACA-009	ACA Bay Hotel	-99.896	16.8564	79
ACA-010	Colosio	-99.7994	16.7944	0
ACA-011	Los Lirios	-99.8546	16.877	257
ACA-012	El Quemado	-99.8137	16.9248	50
ACA-013	Llano largo	-99.802	16.8177	2
ACA-014	SAN ISIDRO	-99.9553	16.9121	33
ACA-015	Homos Insurgentes	-99.8901	16.8716	136
ACA-016	Santa Cruz	-99.9043	16.8678	70
ACA-017	Juan Escudero	-99.8219	16.8982	34
ACA-018	Nicolás Bravo	-99.8389	16.9004	34

Tabla 3.2 Datos geográficos de los sitios de ejemplo en Acapulco

Los datos aquí presentados, ya cuentan con la corrección que se menciona en la referencia terrestre acerca del datum que es usado en México.

Al conjunto de puntos se le aplicará la triangulación de Delaunay de la siguiente manera:

- Los datos geográficos que se obtienen de las estaciones base, como ya se ha establecido en el capítulo anterior, son tres puntos que representan la latitud, longitud y altura de un sitio. Así que, tendremos tantos puntos como sitios existan en una ciudad. Para su procesamiento solo tomaremos la latitud y longitud es decir, en pares ordenados. Una vez en este formato los procesaremos con las librerías de

- Voronoi y Delanauy de MATLAB ver 6.0, donde obtendremos los triángulos o células que en otras palabras solo es como los puntos se relacionan para formarlos.
- Con esta primera triangulación obtenemos una malla de referencia en la que ubicaremos todos los puntos de medición (PM). En esta malla de referencia podremos estudiar la tendencia de este PM dentro de la región definida por los sitios.
 - Para cada uno de los sitios y los PM definidos dentro y cerca de la malla de referencia, obtenemos los siguientes datos: Distancia al satélite de referencia de cada punto y el ángulo entre aristas de las células definidas por la triangulación.

En otra fase, se aplica con los mismos principios de proyección cartesiana, la primera diagramación de Voronoi, con la cual se obtiene una morfología aproximada del terreno, aprovechando las vecindades entre los puntos definidos. Esto se ilustra en la siguiente figura:

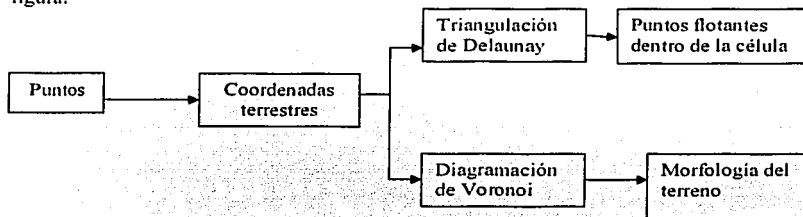


Figura 3.14 Procesamiento de puntos y obtención de triangulación de Delanauy y Voronoi

La definición de las células, depende del resultado de la primera triangulación, que en el caso del ejemplo de los puntos de Acapulco, es de la siguiente manera:

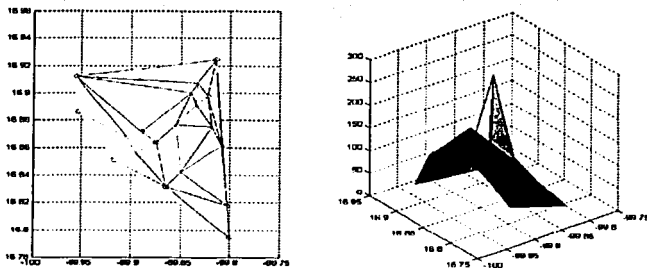


Figura 3.15 Triangulación de Delanauy (izquierda) y definición del terreno con Voronoi (derecha)

Como se muestra en la figura 3.15 de la derecha, la primera diagramación de Voronoi determina la influencia de cada uno de los puntos sobre el área; de acuerdo a su posición dentro del terreno. Además como se muestra en la misma figura, si se incluye el factor de la altura, la representación se aproxima al perfil del terreno.

Con ambos métodos matemáticos que además son complementarios, se forma la base para la referencia terrestre. Esta base funciona en dos vertientes:

1.- Como una referencia fija para aquellos puntos que presenten movimiento dentro del área de la célula (Triangulación de Delaunay)

2.- Para estudiar cambios en la morfología del terreno, al obtener las nuevas células que se forman al introducir al terreno, nuevos puntos. En el caso de que suceda un movimiento, esta técnica diagnóstica el estado actual del terreno.

Con las técnicas anteriores, podemos estudiar y conocer cuantitativamente, el comportamiento de un punto dentro de la zona de puntos fijos que hemos definido. La parte interesante de los algoritmos de Delaunay (triangulación) y Voronoi (diagramación), es que relacionan a cualquier punto que se añada a la nube de puntos con sus vecinos más próximos. Con Delaunay conocemos las distancias a sus vecinos más cercanos y con Voronoi su influencia o vecindad sobre estos mismos puntos. [23]

Se debe señalar que la primera triangulación, esto es, la nube de puntos formada solo por las coordenadas geográficas de los sitios o radiobases dentro de una ciudad determinada, es utilizada como referencia fija por la referencia espacial, de una manera particular que se describe en la sección siguiente.

En la primera triangulación también se elige la célula donde estará localizado el PM, de esta célula en particular se calculará la distancia al satélite, que servirá para medir la separación entre ciudades, con la convención de que en otra ciudad se deberá realizar lo mismo.

Las triangulaciones que sigan, dependerán del número de puntos que se desean estudiar y de los movimientos que sufran estos. Se puede decir que se trata de mapas que tienen como variable al tiempo, pues como se ejemplifica en la figura 3.16 esto puede cambiar. En la misma figura, hemos definido tres mapas, el primero de ellos nos muestra la primera triangulación y diagramación, el segundo nos muestra como cambia al incluirse el punto que se quiere estudiar y en el último, observamos que se realiza una nueva triangulación, si se añade un nuevo punto o el punto del mapa anterior tiene un movimiento.

No solo la triangulación nos define la distancia que el punto ha variado con respecto al sitio fijo, sino que también, nos describe cuando ha sido el sitio que se creía fijo el que ha sufrido un movimiento y su nueva situación con respecto a sus vecinos y su posición en el terreno con la diagramación.

La diagramación y la triangulación, dependen definitivamente del tiempo en el que se tomen las muestras.

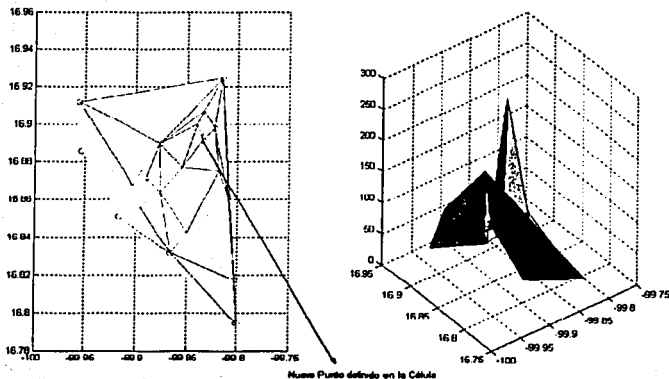


Figura 3.15 Segunda Triangulación de Delaunay (izquierda) y segunda definición del terreno con Voronoi (derecha), se indica lugar del punto (PM) nuevo.

III.4.2 Referencia Total: Configuración mediciones entre localidades

El PM, como lo hemos identificado es un punto que se encuentra dentro de cualquiera de las células definidas en el área o ciudad que estudiaremos, se trata físicamente de un dispositivo GPS que encargará de darnos la posición (latitud, longitud y altura) de este, PM como lo señalamos en la referencia terrestre, es importante realizar las adecuaciones pertinentes para adaptar esta posición al datum de referencia para México.

La definición de los PM dependerá de lo que se requiere estudiar, que puede ser el movimiento de un edificio, el comportamiento de un terreno o de cualquier otra estructura.

Sin embargo, para esta configuración se deberá elegir un punto o varios para comparar su separación con otros puntos en otras localidades o ciudades.

Para esta metodología es de especial importancia el tener a un solo satélite geoestacionario de referencia, en el cual se basarán todos nuestros cálculos de distancias.

Supongamos que hemos definido dos PM en dos ciudades distintas, la primera función del PM dentro de la célula en la que se definió es la de encontrar una proporción de su posición con respecto a las aristas que se encuentran alrededor de éste. A esta característica la hemos denominado Grado de Movimiento (GM), que se define como la razón de la distancia al satélite del PM entre la distancia al satélite de cada una de las aristas de la célula.

$$GM = \text{Distancia al satélite arista de célula} / \text{Distancia al satélite del PM}$$

Por ejemplo para un PM definido dentro de la célula formada por los sitios:

ACA-001, ACA-002 y ACA-003, la distancia al satélite calculada es la siguiente:
 Satelite de Referencia SATMEX V, 117° ,longitud oeste.

Nombre de Sitio	Distancia al satélite(km)	GM
ACA-001	36789.255623	0.9984
ACA-002	36745.568956	0.9996
ACA-003	36795.691120	0.9982
PM	36731.695269	1

Tabla 3.3 Cálculo de los GM para un PM en una célula de Acapulco

Como podemos notar de la tabla anterior el GM nos entrega una posición relativa con respecto a las aristas de la célula, es notorio también que el punto PM se encuentra más cercano a la arista ACA-002. De esta forma el PM resulta una herramienta útil y de referencia para conocer el estado de uno o varios puntos definidos dentro de una célula.

El método para conocer la distancia de cada uno de los puntos al satélite se describe en el capítulo II de esta tesis. La segunda función de los puntos PM es detectar la distancia horizontal ($L_{localidad}$) entre dos ciudades. Para este caso hemos supuesto que sobre la ciudad de Monterrey y Acapulco se han diseñado diferentes células para la referencia terrestre y por diferentes consideraciones se han elegido PM en células determinadas en cada ciudad.

En la figura 3.16 se muestra la forma en la que interactúan ambas células en diferentes localidades. Como se explica en la referencia espacial, esta parte del sistema requiere de un dispositivo de GPS para medir la posición del PM.

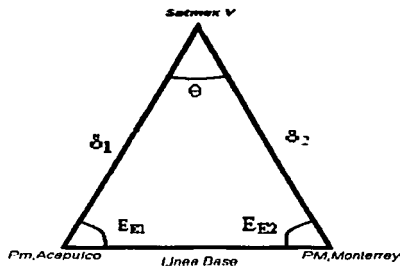


Figura 3.16 PM de ejemplo en Acapulco y Monterrey

Como se muestra en la figura 3.16, se calculan las δ_1 y δ_2 para cada uno de los PM y se obtiene la abertura θ con alguno de los métodos descritos en la referencia espacial, con esta información formaremos el triángulo cuya base representa $L_{\text{localidad}}$ entre ambas ciudades.

El ángulo de abertura θ , representa el factor a medir en caso de que se presente un movimiento horizontal en alguna de las ciudades. Para obtener mejores mediciones, se pueden establecer diferentes PM en cada ciudad en la que se requiera definir esta aplicación.

El hecho de solo tomar al satélite como medio de referencia y no de medición, libera de alguna forma a este sistema de convivir con los errores intrínsecos de los movimientos relativos del satélite en su propia posición.

De otra forma, si por la perturbaciones naturales que sufre el satélite, este presentará movimiento, tendríamos que diseñar un sistema más complejo para saber si el cambio de la posición se hizo por causa del movimiento de alguno de los PM o del satélite mismo.

Así mismo, un movimiento del satélite representaría resincronizar toda la información y sería difícil establecer un patrón de movimiento respecto al tiempo.

III.5 Descripción del Sistema Omeyocan

III.5.1 Descripción por Bloques

Omeyocan proviene de un vocablo náhuatl que quiere decir: "El que se crea a sí mismo". En cierta forma ese término se aplica a las condiciones que hemos definido y estructurado a lo largo de los capítulos predecesores a éste.

Mediante criterios y reglas podemos definir a Omeyocan como una estructura que procesa la información proveniente de los sitios y de los PM que se hayan definido dentro de la estructura. Así como de la relación de los PM en diferentes ciudades para el caso de la referencia espacial.

En este subcapítulo se presenta por bloques la estructura del flujo de la información y de como es procesada esta para llenar las tablas de la base de datos del sistema. Así mismo, se explica la presencia y uso de la estructura de la misma y de como se puede obtener información de ésta.

En la figura 3.17 se muestra un diagrama de bloques de Omeyocan y se detalla después la descripción de cada uno de sus elementos.

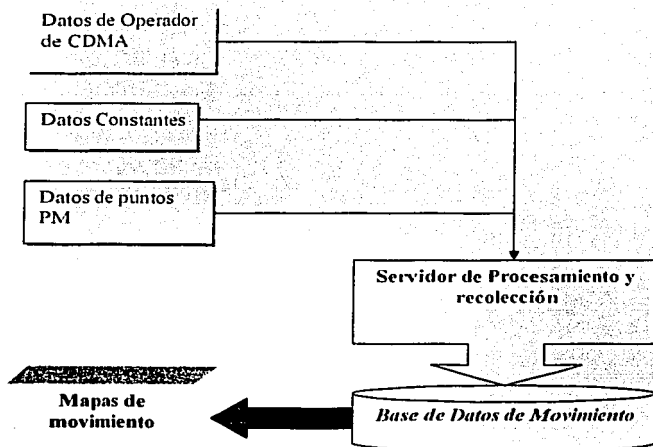


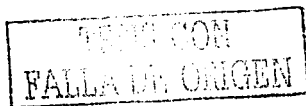
Figura 3.17 Sistema Omeyocan, diagrama de bloques

El principal acceso a la información para este sistema son los archivos planos provenientes de las ciudades con cobertura CDMA de algun proveedor de este servicio, con la información de la fecha y hora de la toma de muestra, así como la cantidad de sitios y la posición de cada sitio. Los datos constantes son proporcionados por el tipo de Datum que se ha definido para México y puede ser que para la región en específico exista alguno y otros datos que son útiles para el cálculo de las distancias como el satélite de referencia.

Los datos de los puntos PM, contiene la información de todos los puntos flotantes, su posición y la fecha en la que se tomo ésta, así como el tipo de estructura donde se encuentra localizado dicho PM. Toda la información es recolectada y procesada por el servidor que se encargará entre otras cosas de discriminar la información, calcular los desplazamientos si estos se dieron y realizar la construcción de las estructuras de tablas de la base de datos.

En la Base de Datos de Movimiento (BDM) se encuentra el principal trabajo del sistema OMEYOCAN ya que es capaz de almacenar la información de los datos con respecto a fechas, esto es de los operadores de CDMA, como de los PM y relacionar toda esta información.

El resultado de todo este flujo de información son los Mapas de Movimiento que básicamente existen de dos tipos: Metropolitanos y Nacionales.



Los datos para la referencia terrestre (RT) y la espacial (RE) no requieren mayor procesamiento por parte del operador donante, la recolección de esta información forma parte de las herramientas de monitoreo de su sistema CDMA.

III.5.2 Servidor de procesamiento y recolección

En este servidor como mencionamos antes se realizan las siguientes actividades:

- 1.- Formación de la Referencia Terrestre (RT)
- 2.-Formación de la Referencia Espacial (RE)
- 3.- Análisis de los movimientos (Grados de movimiento, desplazamientos)
- 4.- Primera triangulación Delanauy (Solo con los datos de los sitios celulares)
- 5.- Segunda triangulación Delanauy (Con los datos de los sitios y de los PM)
- 6.- Primera diagramación de Voronoi (Solo con los datos de los sitios)
- 7.- Segunda diagramación de Voronoi (Con los datos de los sitios y los PM)

Después de procesar esta información el servidor se encargará de cargarla a la Base de Datos de Movimiento, con la siguiente estructura:

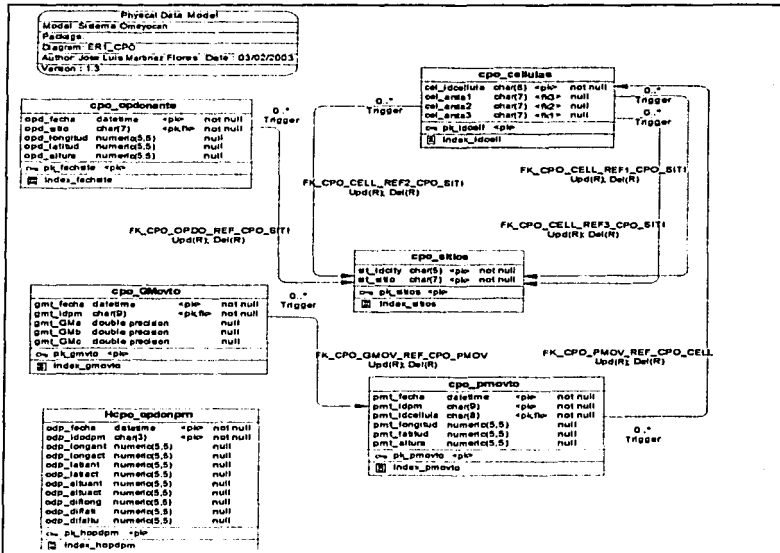


Figura 3.18 Sistema Omeyocan, estructura de datos



III.5.3 Mapas de Movimiento Metropolitanos

Este tipo de información se representa sobre mapas geográficos en donde se registran los movimientos de las aristas en una localidad, así como la cuantificación de la distancia en línea recta que se desplazó con respecto a las aristas de su misma célula, así como de aristas de células vecinas. Este el resultado se debe al procesamiento de las triangulaciones que se realicen a diversos puntos de prueba que se pongan dentro de las células de la ciudad.

Como lo indicamos antes, la primera triangulación sirve para observar el estado actual de la ciudad, cuando se incluyen nuevos puntos, entonces se debe recalculer una nueva triangulación y cuantos más puntos se incluyan más triangulaciones se deben realizar. El algoritmo de la triangulación de Delanauy es sencillo y por ende tiene muy poco consumo en tiempo de procesamiento.

Otro dato interesante, es que se describe la dirección de este movimiento. Con una cantidad considerable de muestras, se pueden ensanblar los diferentes mapas de movimiento y obtener una animación como se muestra en el siguiente capítulo.

Con la triangulación, esta relacionado el tema de la diagramación que nos entrega la morfología actual del terreno dependiendo del número de puntos que se hayan definido para una ciudad. Se debe notar también que la diagramación también es afectada por las triangulaciones, esto quiere decir que si se realiza la primera triangulación estará directamente relacionada con la primera diagramación, si se incluyen nuevos puntos, será necesario recalculer una nueva diagramación y así sucesivamente.

En la figura 3.19 se muestra un mapa de movimiento de ejemplo, donde se ejemplifica un movimiento de un punto, la cuantificación de la distancia que se desplazo con respecto a las aristas de su célula y una tabla que muestra los cambios con respecto a otras aristas de otras células. Se incluye la dirección de dicho movimiento y la fecha y hora en la que se tomo la muestra. Esta figura muestra dos fases, la primera triangulación que describe el estado de la ciudad y la segunda triangulación que introduce un punto de prueba en las células.

En la misma figura, también se presenta la morfología del terreno en la primera y la segunda diagramación. Se puede notar como se definen nuevas células de Voronoi al introducir el punto de prueba en el terreno.

Sin embargo, como lo vemos en la figura 3.19, el incluir nuevo puntos PM para triangulación nos representa un problema, porque aunque ganamos resolución, perdemos la noción de en que célula se encontraba nuestro objeto, ya que se definen nuevas células con la nueva triangulación.

Las siguientes figuras en 3.20, nos muestran el movimiento que ha sufrido el punto de prueba y su comparación con el estado anterior, se notan los mapas de triangulación y la diagramación con sus cambios respectivos.

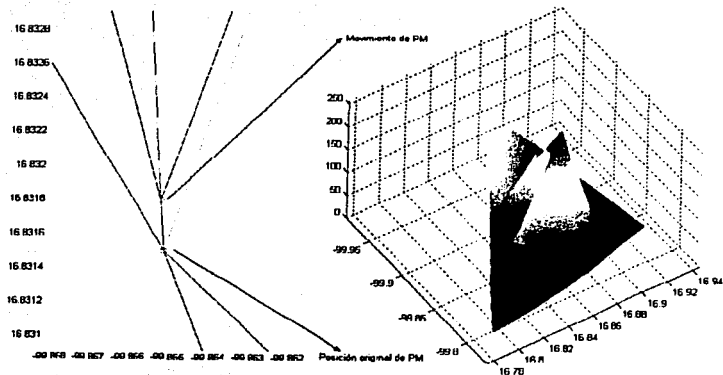
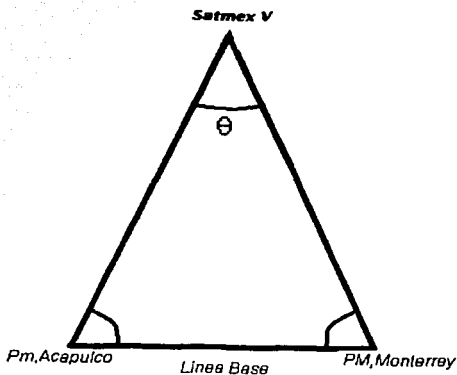
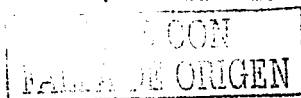


Figura 3.19 Ejemplo de movimiento de un PM y las múltiples triangulaciones logradas



31/01/03 **Distancia entre PMACA y PMMonterrey: 1869.5889 Km**
1/02/03 **Distancia entre PMACA y PMMonterrey: 1869.5890 Km**
Diferencia: 0.001 Km

Figura 3.20 Ejemplo de movimiento de un PM y cambio en línea base



III.5.5 Grado de Movimiento

Este tipo de información nos representa la cercanía del PM (tiempo de propagación medido) con alguna de las aristas dentro de las cuales se encuentra. De allí, que se represente como la razón del tiempo de propagación medido entre el calculado de cada una de las aristas.

El GM, nos indica el movimiento del PM dentro de la célula donde se encuentra. Como se indica en la figura 3.21 si la relación es menor a 1, indica que el PM esta cercano a la arista. si es igual a 1 prácticamente esta en la arista y si es mayor a 1 la tendencia es alejarse de este punto.

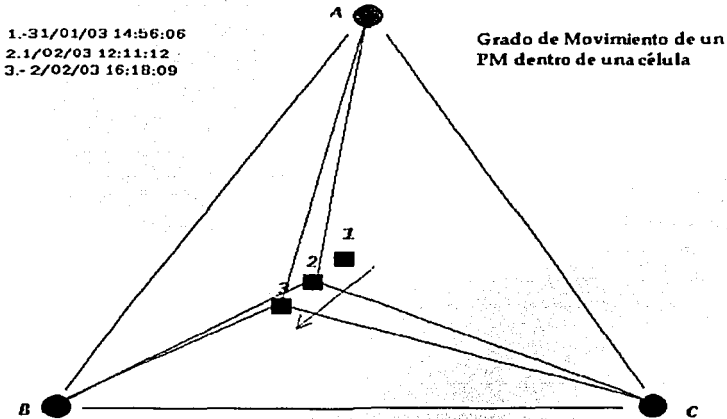


Figura 3.21 Grado de Movimiento ejemplo de un punto

GM es un parámetro muy útil para estudiar el comportamiento del PM dentro de la célula de cada una de las localidades que fueron definidas en la referencia espacial.

III.5.6 Triángulos de desplazamiento

Esta herramienta nos ayuda a determinar la distancia en línea recta, que se ha separado un PM de otro. Hay que señalar que esta herramienta es válida cuando se quiere conocer la

distancia entre dos PM. Como lo muestra la figura 3.20, un triángulo de desplazamiento es una representación gráfica que muestra:

- Distancia entre dos PM
- En caso de movimiento, cuantificación de la distancia de diferencia
- Latitud, longitud y altura de cada PM

III.5.7 Mapas de movimientos Nacionales

En esta herramienta podemos observar la distancia entre todos los PMs definidos en la referencia espacial, tal y como lo muestra la figura 3.22, solo se ponen en el mapa las distancias entre PMs que han cambiado y en una tabla a la izquierda del mapa, se presentan las distancias entre algunos PMs definidos.

Reporte de Movimientos en diferentes PM en el país





	PMAcapulco Diferencia de 0.001 Km con respecto a PMMonterrey 01/02/03- 15:23:56
	PMAcapulco Diferencia de 0.005 Km con respecto a PMPuebla 01/02/03- 15:23:56
	PMAcapulco Diferencia de 0.002 Km con respecto a PMMéxico,DF 01/02/03- 15:23:56
	PMAcapulco Diferencia de 0.012 Km con respecto a PMMérida 01/02/03- 15:23:56

Figura 3.22 Ejemplo de Movimiento Nacionales

III.5.8 Criterios de movimientos locales

En este punto es importante analizar los criterios mediante los cuales se detecta un movimiento local. Como se ha expuesto anteriormente, la fuente de estos movimientos son las aristas descritas por las células de la referencia terrestre. La información que se

Geología Satelital

recolecta de estas aristas es por si misma la única fuente que tenemos para detectar movimiento. En una situación local se pueden detectar dos tipos de movimientos:

1. Cuando el movimiento se debe al desplazamiento de un sitio o de varios pero de forma independiente. Esto modificará a la primera triangulación y a las subsecuentes.
2. Cuando el movimiento se debe al desplazamiento de toda la ciudad, es decir todas las aristas registran movimiento. Los cambios en este punto modifican totalmente la primera triangulación.

En el primero de los casos, dicho movimiento puede deberse a un evento geológico o un desplazamiento en la localidad. En ese caso junto con los mapas de movimiento se debe revisar si sucedió un sismo durante el período de tiempo entre una muestra y otra.

En el segundo caso puede ser que todas las aristas registren movimiento, lo cual debe ser poco probable, ya que recordemos que este tipo de referencia tiene resoluciones muy grandes y los movimientos tendrían que ser del orden de metros. Sin embargo, se debe realizar la correlación de esta información con la referencia espacial.

III.5.9 Criterios de movimientos nacionales

Para este caso y como en los criterios locales, aplican dos vertientes:

1. Cuando el movimiento del PM es solo dentro de la célula
2. Cuando el movimiento del PM se verifica con el movimiento de algún otro PM en la misma ciudad.

Para el primero de los casos, puede suceder que por alguna vibración o incluso desplazamiento local, el PM presente movimiento, esto debe descartarse de ser un movimiento nacional o entre localidades. La forma de descartarse es usando un segundo PM y revisar su comportamiento, si efectivamente registra movimiento, entonces se puede considerar que la ciudad o al menos una parte de esta presenta movimiento.

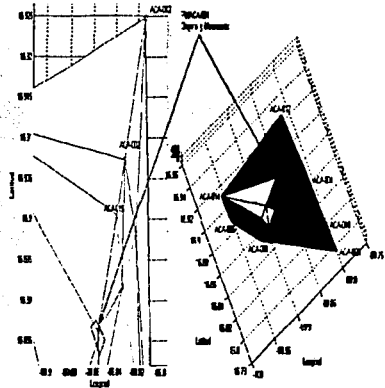
Para el segundo caso, un PM presenta movimiento y después de revisar las condiciones antes mencionadas, determinamos que el PM ha sufrido un movimiento, la forma de corroborarlo es con las aristas de las células (que es poco probable que describan movimiento) y su análisis en cuanto a un movimiento local.

Los criterios anteriores, en los movimientos nacionales como en los locales, no nos sirven para descartar datos, sino tan solo para clasificarlos.



Capítulo IV

Resultados



IV.1 Movimientos dentro del área de referencia fija.

IV.1.1 Ejemplo para Acapulco

Para estudiar este caso definiremos un PM dentro de una de las células definidas para la ciudad de Acapulco:

PM	Latitud	Longitud	Altura (m)	Fecha
ACA-PM-001	16.901	-99.844	22	23-07-03 13:45:02

Tabla 4.1 Definición del PM dentro de la ciudad

En la siguiente figura (4.1) se definen los sitios de Acapulco con los PM definidos. ACA-PM-001, se encuentra definido como "UNO":

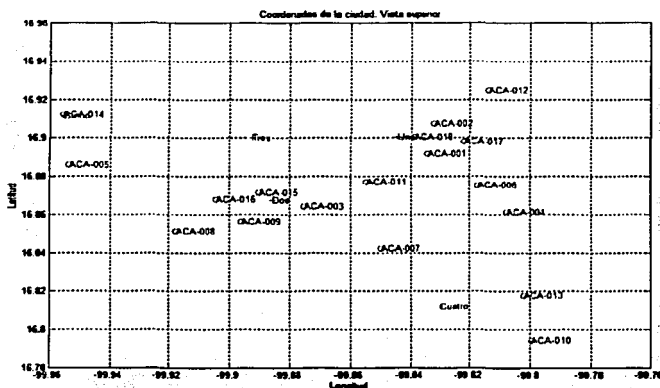


Figura 4.1 Definición de PMs y Sitios en la ciudad de Acapulco

En la figura 4.2 presentamos el algoritmo de Delaunay aplicado a los diferentes sitios de la ciudad de Acapulco, sin tomar en cuenta los PM. Podemos notar la forma de la estructura de la referencia fija, los triángulos creados son de diferentes tamaños, dependiendo de la distancia de uno a otro. Con el algoritmo de Delaunay, los diferentes puntos de los sitios de referencia fija forman una estructura. Cada uno de los triángulos forma lo que en otros capítulos hemos denominado células.

Para particularizar hemos definido PM dentro de los triángulos, sin embargo hemos definido relaciones de los PM con todos los puntos de referencia fija, no así con los otros PM.

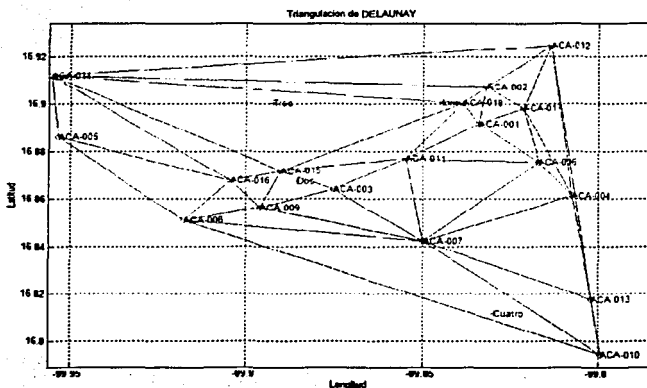


Figura 4.2 Algoritmo de Delaunay y la estructura fija definida para Acapulco, podemos notar que los PM no están implicados en la definición de esta estructura.

En la siguiente tabla se muestran las condiciones de cada uno de los GM para el PMACA-001:

Punto	GM	FECHA
ACA-014	0.9968	23-07-03 13:48:12
ACA-015	1.0051	23-07-03 13:48:12
ACA-018	1.0002	23-07-03 13:48:12
ACA-PM-001	1	23-07-03 13:48:12

Tabla 4.2 GM para el PMACA-001

En esta tabla podemos notar la cercanía del ACA-PM-001 a la arista ACA-014, por mera aproximación y basándonos en el hecho de que en el mismo plano de la Tierra no existen dos distancias al satélite iguales. La referencia es el SATMEX V en la posición 117.5 ° longitud Oeste.

Geología Satéltal

En la figura 4.3 se muestra el triángulo o célula que rodea al ACA-PM-001 o punto "UNO".

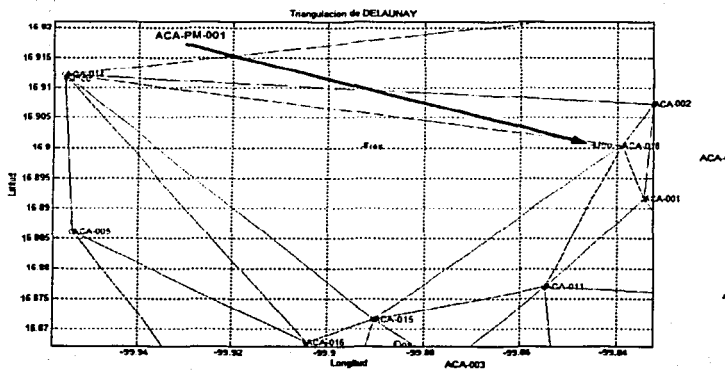


Figura 4.3 Acercamiento del PM "Uno"

En las figuras 4.4 y 4.5 se muestra el algoritmo de Voronoi, en la primera de las figuras se muestra el total de los sitios dentro de la estructura fija y en el segundo se hace un acercamiento al PM "UNO" ó ACA-PM-001.

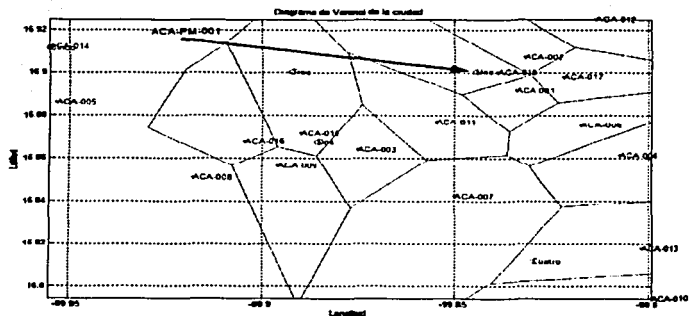


Figura 4.4 Algoritmo de Voronoi para Acapulco

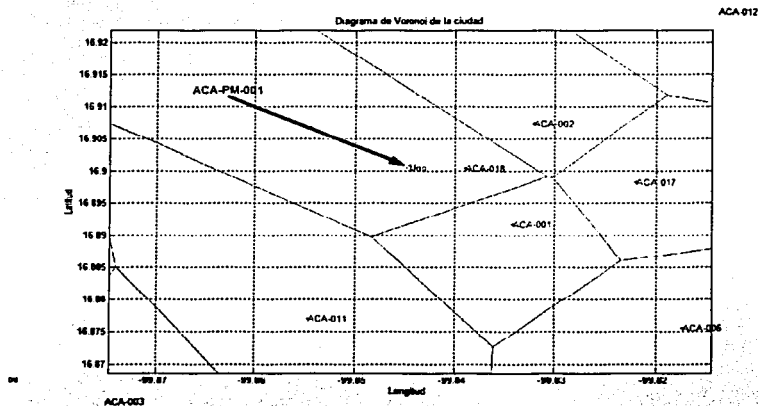


Figura 4.5 Algoritmo de Voronoi para PM "Uno" o ACA-PM-001

Podemos notar en esta figura que el PM "Uno", se encuentra en la zona de influencia o de vecindad del sitio ACA-018, esto nos dice no solo que el PM se encuentra dentro de la influencia de este punto, sino que este sitio es el más cercano al PM. (El sitio ACA-018 es el más cercano a ACA-PM-001).

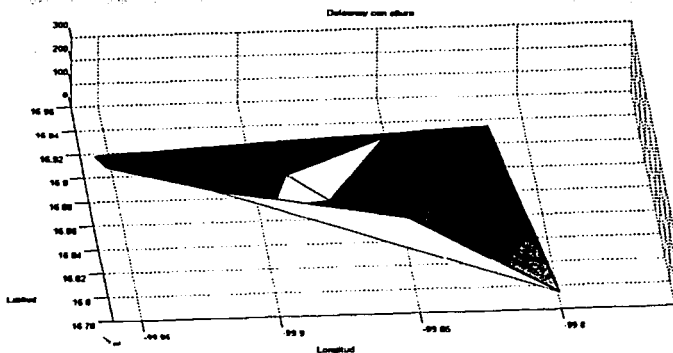


Figura 4.6 Estructura tridimensional que incluye la altura, resultado de Dehnay

Geología Satéltal

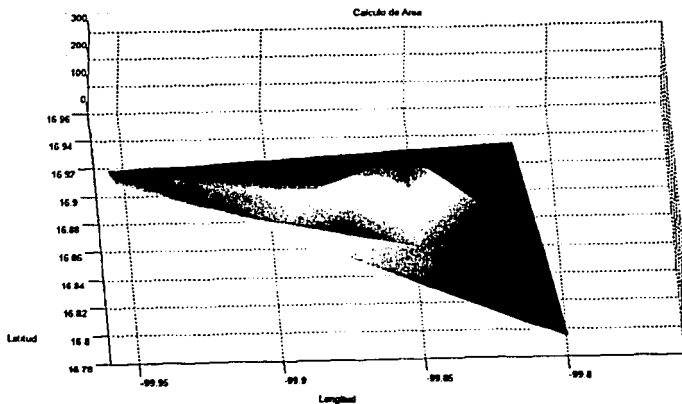


Figura 4.7 Estructura tridimensional suave que incluye la altura, resultado de Delaunay

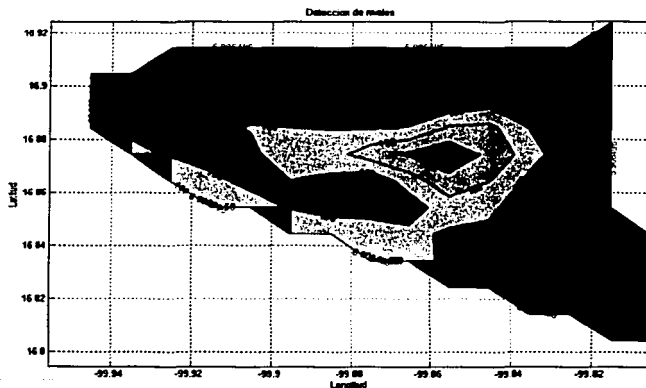


Figura 4.8 Curvas de nivel resultado del área definida por el algoritmo de Delaunay para los sitios de Acapulco

Geología Satelital

En las figuras 4.6 y 4.7 se muestran las representaciones tridimensionales, resultado de la aplicación del algoritmo de Delaunay y de la altura de cada sitio. La figura 4.6, muestra la interrelación de los triángulos y la 4.7 muestra la misma estructura, pero de una forma suavizada destacando los puntos más altos del terreno.

Por último la figura 4.8 muestra las curvas de nivel para la misma área definida por los sitios de la referencia fija o sitios fijos.

En la siguiente tabla se muestran las distancias en kilómetros del PM "Uno" ó ACA-PM-001, con respecto a todos sitios fijos de Acapulco, se muestra también en gráfica en la figura 4.9.

PM	FECHA	Distancia en KM	Sitio Fijo
ACA-PM-001	23/07/2003 00:00:00	"0,5473"	ACA-018
ACA-PM-001	23/07/2003 00:00:00	"1,4486"	ACA-002
ACA-PM-001	23/07/2003 00:00:00	"1,478"	ACA-001
ACA-PM-001	23/07/2003 00:00:00	"2,3745"	ACA-017
ACA-PM-001	23/07/2003 00:00:00	"2,9005"	ACA-011
ACA-PM-001	23/07/2003 00:00:00	"4,0183"	ACA-006
ACA-PM-001	23/07/2003 00:00:00	"4,1754"	ACA-012
ACA-PM-001	23/07/2003 00:00:00	"5,2705"	ACA-003
ACA-PM-001	23/07/2003 00:00:00	"5,8723"	ACA-004
ACA-PM-001	23/07/2003 00:00:00	"5,9013"	ACA-015
ACA-PM-001	23/07/2003 00:00:00	"6,5758"	ACA-007
ACA-PM-001	23/07/2003 00:00:00	"7,4107"	ACA-016
ACA-PM-001	23/07/2003 00:00:00	"7,4387"	ACA-009
ACA-PM-001	23/07/2003 00:00:00	"9,6217"	ACA-008
ACA-PM-001	23/07/2003 00:00:00	"10,2961"	ACA-013
ACA-PM-001	23/07/2003 00:00:00	"11,772"	ACA-005
ACA-PM-001	23/07/2003 00:00:00	"11,9187"	ACA-014
ACA-PM-001	23/07/2003 00:00:00	"12,7828"	ACA-010

Tabla 4.3 Distancia del ACA-PM-001 a cada uno de los sitios de Acapulco

Podemos notar en la siguiente tabla que a diferencia del GM, esta distancia describe cuantitativamente la condición del PM dentro de la estructura fija definida por los sitios para Acapulco. Recordemos que todas las mediciones son hechas en una misma fecha.

Esta distancia se encuentra calculada en base a la separación del PM con cada uno de los sitios, tomando como punto de referencia el centro de la Tierra y calculando la separación angular del PM con cada uno de los sitios, utilizando trigonometría esférica.

La figura 4.9 muestra la cercanía del punto ACA-018 con el PM "Uno", observemos que esto es exactamente igual a la función de cercanía de Voronoi, pero en este caso, no solo se conoce la cercanía del PM a algún sitio, sino además su distancia a todos los puntos de la estructura fija, la fecha es la misma para todas las muestras.

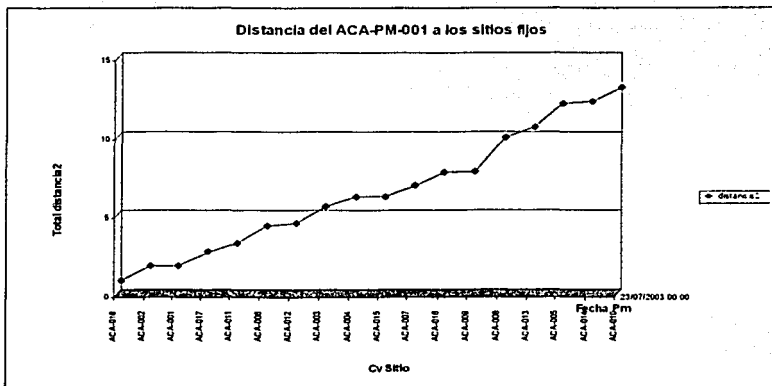


Figura 4.9 Distancia del ACA-PM-001 a cada uno de los sitios de Acapulco

IV.1.2 Ejemplo para México D.F.

Enseguida se muestran las coordenadas para el ejemplo en la Ciudad de México:

PM	Latitud	Longitud	Altura (m)	Fecha
MEX-PM-001	19.48	-99.115	22243	23-07-03 15:45:02

Tabla 4.4 Coordenadas del PM para la ciudad de México

El tamaño de la Ciudad de México, requiere de muchos sitios para que la cobertura de los sitios sea suficiente para cubrir la ciudad, así que para este ejemplo se incluyen 239 sitios que definirán la estructura fija para este lugar.

Los puntos PM que se definieron para este ejemplo son cinco, estos solamente se ven en las gráficas y no se definen sus coordenadas.

Las alturas que ha cada uno de los sitios se les ha asignado valores aleatorios, superiores a los 2240 metros, esto es la altura promedio de ciudad de México sobre el nivel del mar.

Geología Satéltal

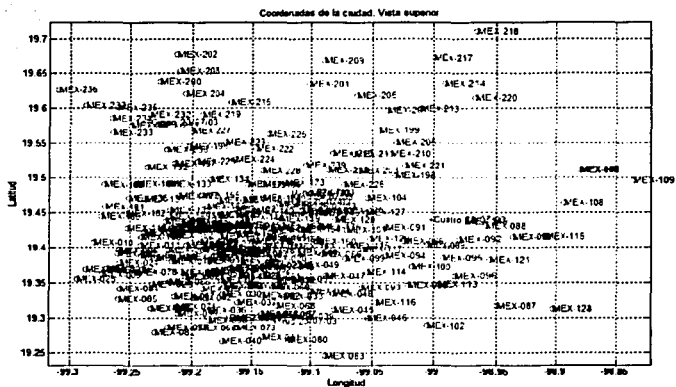


Figura 4.10 Sitios de la Ciudad de México

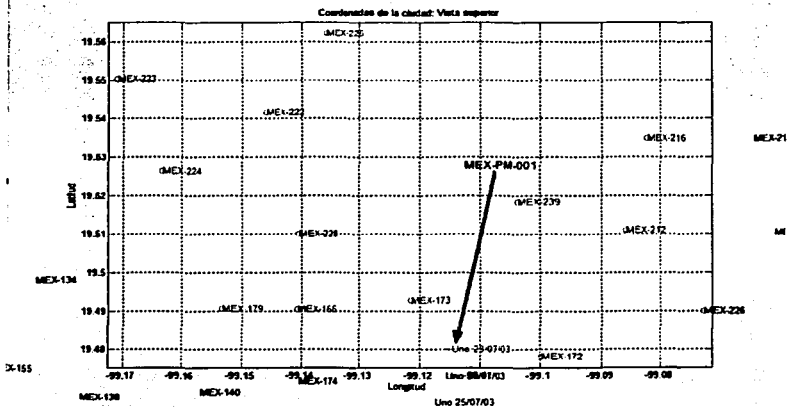


Figura 4.11 Acercamiento al PM dentro de los sitios de la Ciudad de México

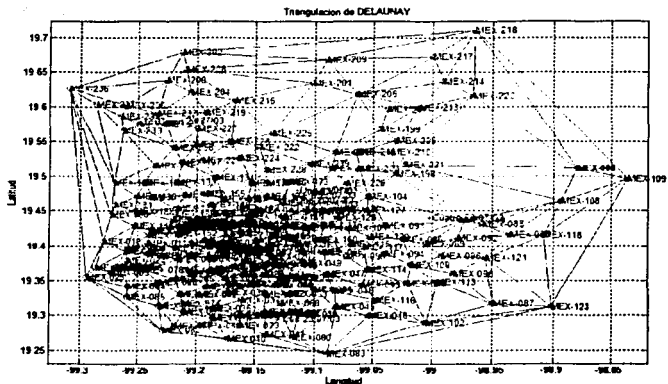


Figura 4.12 Aplicación del algoritmo de Delaunay a los sitios de la ciudad de México

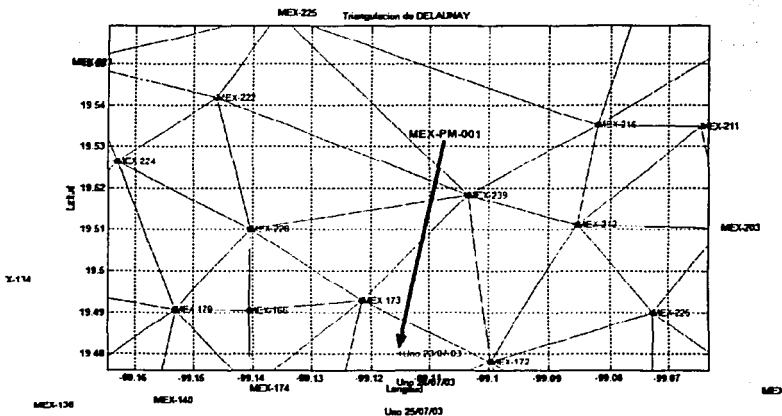


Figura 4.13 Acercamiento al PM dentro de los sitios de la Ciudad de México con Delaunay

Punto	GM	FECHA
MEX-141	1.0026	23-07-03 13:48:12
MEX-172	1.0006	23-07-03 13:48:12
MEX-173	0.9979	23-07-03 13:48:12
MEX-PM-001	1	23-07-03 13:48:12

Tabla 4.5 GM para el MEX-PM-001

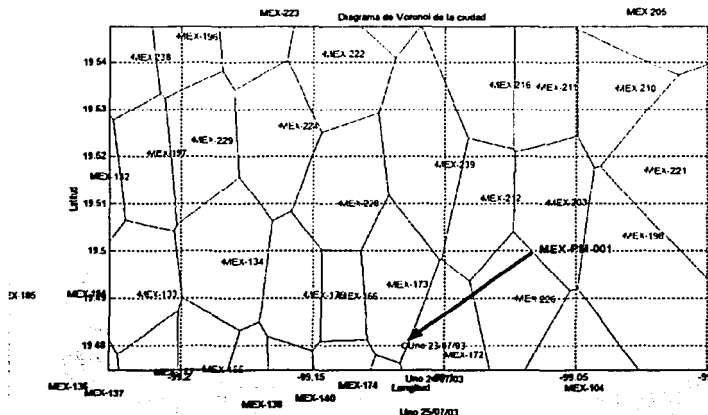
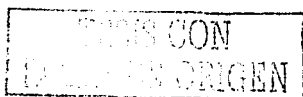


Figura 4.14 Acercamiento al PM "Uno" después de aplicar el algoritmo de Voronoi a los sitios de México

Podemos notar de la tabla 4.5 que el GM menor es el del MEX-173 y de la figura 4.14 podemos notar que la influencia del punto MEX-173 coincide con la cercanía del PM a este punto. Esto es correcto para ese ejemplo, pero no así para el anterior, es decir para el caso de la ciudad de Acapulco, en el que el GM no coincide con la cercanía definida por Voronoi y por el método de las distancias del PM a cada uno de los puntos.

Los GM como lo hemos descrito en el capítulo anterior, son valores calculados en base a la distancia a un punto de referencia fijo, que en este caso es el satélite, sin embargo por las distancias implicadas en este cálculo, la cantidad de errores en los que se infringe resulta en una mala ubicación de los puntos PM dentro de las células, así que después de distintas pruebas entre las que se incluye la función de cercanía de la triangulación de Delaunay que nos dice a que punto de la célula esta más cercano un PM dentro de ésta, se llega a la conclusión de que el PM tiene que estar muy cerca de algún punto de la célula para determinar su cercanía a un punto de la célula. (Tabla 4.5)



El mejor método para encontrar la cercanía del PM a las células es medir la distancia de cada PM a las aristas de las células. Pero también existen dos alternativas para esta circunstancia: una es tomando como base la distancia al satélite y otra es tomando la distancia al centro de la Tierra, estas alternativas se calculan en base la ley de los cosenos, como se explico para el caso de medir la longitud de la línea base en el capítulo anterior.

PM	FECHA	Distancia en KM	Sitio
MEX-PM-001	23/07/2003 00:00:00	"27,5717"	MEX-172
MEX-PM-001	23/07/2003 00:00:00	"34,8224"	MEX-226
MEX-PM-001	23/07/2003 00:00:00	"40,4099"	MEX-174
MEX-PM-001	23/07/2003 00:00:00	"50,5339"	MEX-155
MEX-PM-001	23/07/2003 00:00:00	"54,7761"	MEX-140
MEX-PM-001	23/07/2003 00:00:00	"62,7542"	MEX-177
MEX-PM-001	23/07/2003 00:00:00	"64,8714"	MEX-138
MEX-PM-001	23/07/2003 00:00:00	"70,6301"	MEX-198
MEX-PM-001	23/07/2003 00:00:00	"85,9175"	MEX-166
MEX-PM-001	23/07/2003 00:00:00	"86,7918"	MEX-173
.			
.			
.			
.			
.			

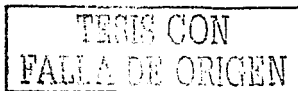
Tabla 4.6 Tabla de distancias del PM a los sitios de la ciudad de México, basado en la distancia al satélite de referencia

Sin embargo, en la primera de las opciones, el problema del cálculo del GM se hereda también a esta alternativa y resulta en una aproximación inexacta al punto más cercano de la célula. Podemos notar que en esta caso la tabla 4.6, nos dice que el sitio más cercano a MEX-PM-001 es el MEX-172, cuando GM y Voronoi dicen que es MEX-173.

Al realizar la segunda de las opciones, los cálculos son mejores y además de obtener el punto más cercano al PM, también se puede conocer una distancia con una aproximación considerable. (Tabla 4.7)

PM	FECHA	Distancia en Km	Sitio
MEX-PM-001	23/07/2003 00:00:00	"1,5753"	MEX-173
MEX-PM-001	23/07/2003 00:00:00	"1,6196"	MEX-172
MEX-PM-001	23/07/2003 00:00:00	"2,3028"	MEX-141
MEX-PM-001	23/07/2003 00:00:00	"2,8114"	MEX-174
MEX-PM-001	23/07/2003 00:00:00	"2,9254"	MEX-166
MEX-PM-001	23/07/2003 00:00:00	"3,2551"	MEX-178
MEX-PM-001	23/07/2003 00:00:00	"4,0902"	MEX-145
.....			
.....			

Tabla 4.7 Tabla de distancias del PM a los sitios de la ciudad de México, basado en la distancia al centro de la Tierra



En la tabla 4.7 podemos notar que la función de cercanía de Delaunay coincide con esta segunda alternativa, en la que se toma como base el centro de la Tierra, la tendencia del movimiento del PM dentro de la célula y aun fuera de esta se registra y nos sirve para comparar el comportamiento de este punto, en toda la estructura fija.

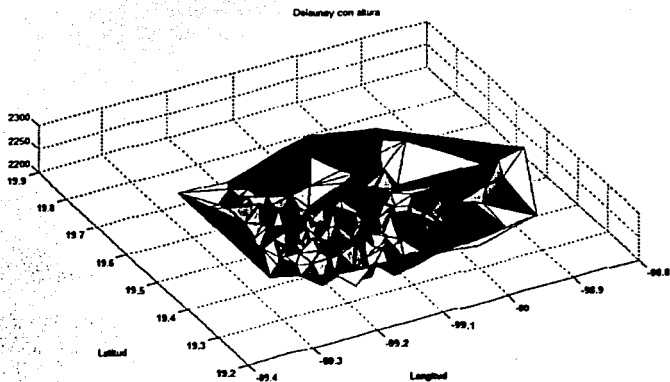


Figura 4.15 Estructura tridimensional resultado de la aplicación del algoritmo de Delaunay

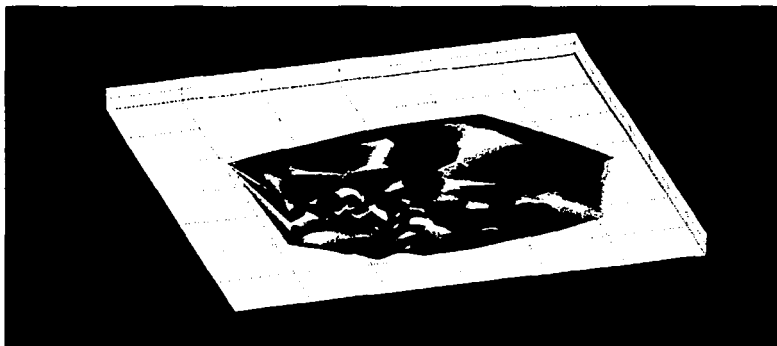


Figura 4.16 Estructura tridimensional suavizada del algoritmo de Delaunay

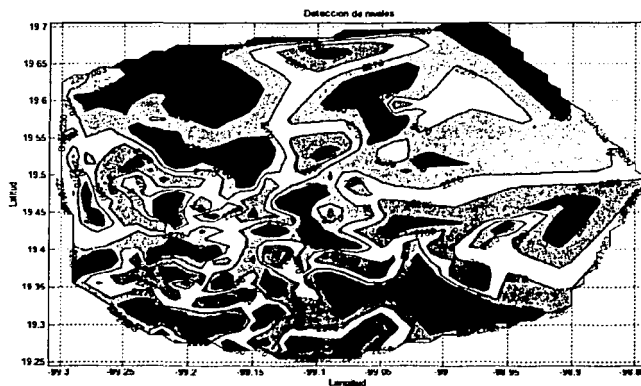


Figura 4.17 Curvas de nivel para la estructura tridimensional del algoritmo de Delaunay

IV.1.3 Ejemplo para México D.F. con PM en movimiento

El objetivo de esta sección es la de mostrar la efectividad del método de medir la distancia de cada uno de los PM a los sitios para encontrar su cercanía con un punto y su relación con el resto de los puntos. Se compara con el método de Voronoi al darle a cada punto su influencia en el conjunto de puntos.

CV_PM	Longitud_PM	Latitud_PM	Altura_PM	Fecha_PM
MEX-PM-001	-99.115	19.48	2266.835	23/07/2003
MEX-PM-001	-99.116	19.473	2266.835	24/07/2003
MEX-PM-001	-99.118	19.466	2266.835	25/07/2003
MEX-PM-001	-99.114	19.46	2266.835	26/07/2003
MEX-PM-001	-99.121	19.449	2266.84	27/07/2003

Tabla 4.8 Coordenadas del PM MEX-PM-001, con su variación respecto a distintas fechas

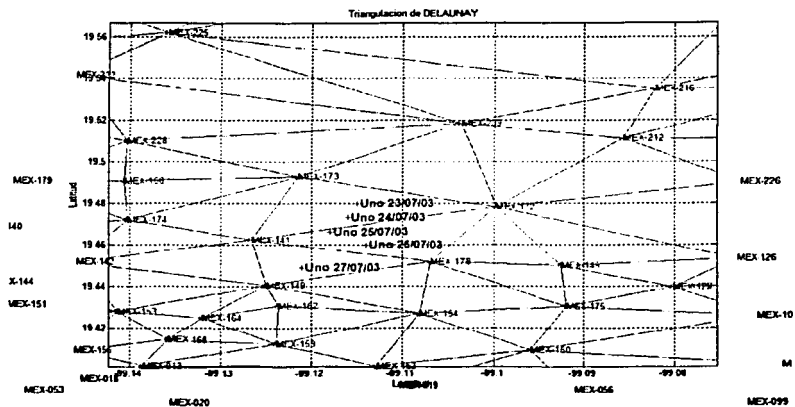
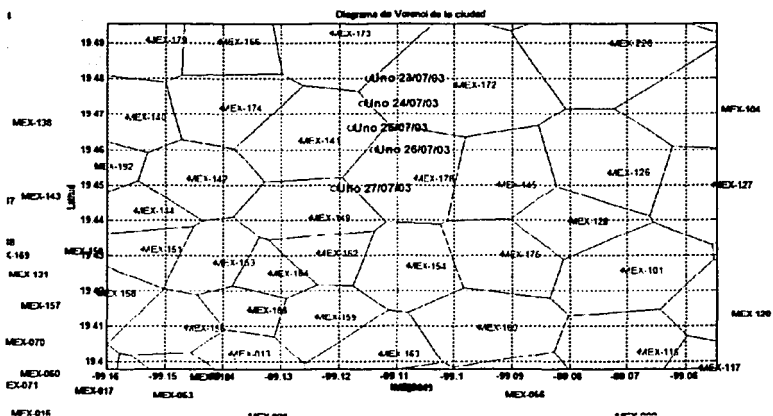
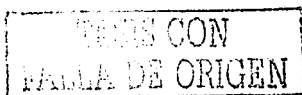


Figura 4.18 Movimiento de PM MEX-PM-001 y su paso por distintos triángulos o células



4.19 Movimiento de PM MEX-PM-001 y su paso por zonas de influencias de Voronoi



En las figuras anteriores se muestra el paso del PM MEX-PM-001 con respecto a los sitios de referencia fija, primero con la triangulación de Delaunay y en segundo lugar con el algoritmo de Voronoi, que entre otras cosas nos describe el acercamiento o no del PM a un sitio por su ruta de movimiento.

La sensibilidad de nuestra detección depende de los instrumentos de GPS que se utilicen para realizar la medición de los PM.

IV.2 Movimientos entre Sitios de diferentes ciudades.

Este movimiento se encuentra basado en el hecho que se establece un triángulo que se forma con el satélite en el vértice superior y los vértices inferiores, con un sitio en una ciudad y otro sitio en otra. (Incluso esta regla se puede realizar para sitios en diferentes ciudades)

Establezcamos como en los casos anteriores un ejemplo, supongamos que tenemos dos sitios en dos ciudades separadas por algunos kilómetros y un satélite de referencia. En la tabla 4.4 podemos ver las condiciones de este ejemplo:

Sitio	Longitud	Latitud	Altura(m)
ACA-001	-99.8342	16.8916	22
MEX-083	-99.083	19.2453	2245

Tabla 4.9 Localización de ambos sitios

Se prefiere utilizar sitios que forman la referencia fija de la ciudad, ya que así podemos estudiar la separación entre éstos sitios. Si tomamos a los PM como puntos de medición entre ciudades, serían necesarias más correcciones ya que los PM se suponen en constante movimiento dentro de la estructura fija. Aunque en la tabla anterior se consideran dos puntos, uno en la ciudad de Acapulco y otro en México, D.F. el punto en la México, D.F. puede medir la distancia no solo con ACA-001, sino con el resto de los que se encuentra en Acapulco.

Omeyocan realiza algunas consideraciones en los datos, una de las primeras no tomar la altura en los sitios y así solo tomamos la separación en línea recta de los sitios. De otra forma la línea base no sería recta sino diagonal.

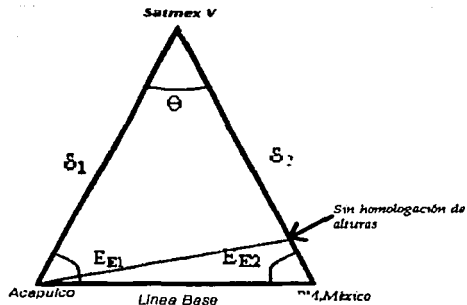


Figura 4.20 Ilustración del triángulo que forman los sitios y del porque homologar la altura.

En la figura anterior podemos observar que con la homologación de las alturas se logra un triángulo cuya base es la separación entre los sitios. El ángulo θ se encuentra formado por las latitudes y longitudes de los sitios, así que aplicando trigonometría esférica:

$$\theta = \text{Sen}(\text{Latitud_Sitio1}) * \text{Sen}(\text{Latitud_Sitio2}) + \text{Cos}(\text{Longitud_Sitio1} - \text{Longitud_Sitio2}) * \text{Cos}(\text{Latitud_Sitio1}) * \text{Cos}(\text{Latitud_Sitio2})$$

$$\theta = 0.9991^\circ$$

Obteniendo la distancia de cada una de las ciudades al satélite de referencia al centro de la tierra, obtenemos:

$$\delta_1 = 6,378.14 \text{ Km (ACA-001-Centro de la Tierra)}$$

$$\delta_2 = 6,389.34 \text{ Km (MEX-083-Centro de la Tierra)}$$

y aplicando la ley de cosenos:

$$\text{línea base} = 269.6223 \text{ Km (tomada 23-07-03)}$$

Como al final del subcapítulo anterior, en este caso el usar como referencia al satélite infringe una cantidad de errores en el cálculo de la distancia entre sitios y tomar como

referencia el centro de la Tierra nos entrega una mejor aproximación entre sitios de distintas ciudades. Esto se muestra en la tabla 4.10.

Sitios México	Fecha/hora	Distancia entre sitios (Km)	Sitios Acapulco
MEX-083	23/07/2003 00:00:00	"269,6223"	ACA-012
MEX-083	23/07/2003 00:00:00	"272,0506"	ACA-002
MEX-083	23/07/2003 00:00:00	"273,788"	ACA-001
MEX-083	23/07/2003 00:00:00	"274,9936"	ACA-006
MEX-083	23/07/2003 00:00:00	"275,6257"	ACA-014
MEX-083	23/07/2003 00:00:00	"275,9751"	ACA-011
MEX-083	23/07/2003 00:00:00	"276,2271"	ACA-004
MEX-083	23/07/2003 00:00:00	"277,9908"	ACA-003
MEX-083	23/07/2003 00:00:00	"278,3001"	ACA-005
MEX-083	23/07/2003 00:00:00	"279,4845"	ACA-009
MEX-083	23/07/2003 00:00:00	"279,5346"	ACA-007
MEX-083	23/07/2003 00:00:00	"280,7304"	ACA-013
MEX-083	23/07/2003 00:00:00	"280,7778"	ACA-008
MEX-083	23/07/2003 00:00:00	"283,1549"	ACA-010

Tabla 4.10 Distancia entre MEX-083 y los sitios de Acapulco

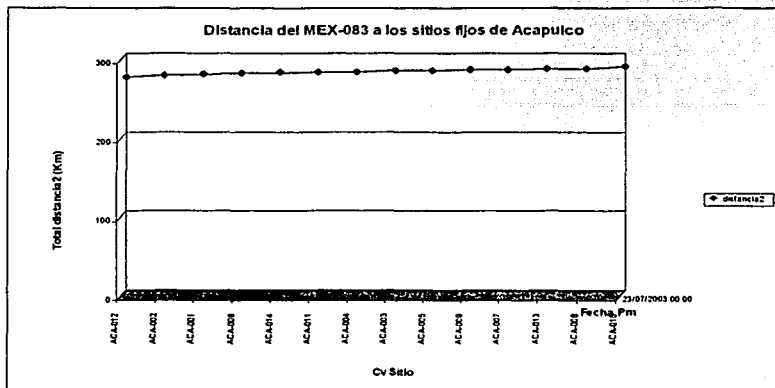


Figura 4.21 Gráfico de las distancias de los sitios de Acapulco al MEX-083

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Geología Satéltal

Al final del capítulo III, se mencionan varios casos para decir si un sitio se movió debido a un movimiento local o se trata de un movimiento de un lote de terreno o de toda la ciudad. En este caso las múltiples referencias con las que contamos, deberán ser tomadas en cuenta, de acuerdo al método que hemos presentado.

Sin embargo y a diferencia del método anterior, estos resultados deberán tomarse con más cuidado ya que para que sucediera el evento de que toda una ciudad se mueva, debido tal vez a un sismo reciente o algún otro suceso, se deberá revisar otros parámetros como sismos o incluso comparar todos los sitios de una ciudad con lugares más estables como el norte del país donde la frecuencia sísmica es menor.

Como en el caso acerca de las mediciones locales, el factor del tiempo es de suma importancia para poder generar históricos y otras referencias que nos permitan estudiar el movimiento en una ciudad o discriminar si tan solo se trata de un movimiento de tipo local.

Conclusiones

El movimiento sobre nuestro planeta se encuentra relacionado con diversos factores, algunos ligados al constante roce de las placas tectónicas que afectan a nuestro país, otros tantos por vibraciones causadas por el hombre como movimientos de Tierra y otros más bruscos como los terremotos.

A lo largo de este trabajo hemos expuesto como se puede aprovechar la distribución de un sistema de comunicaciones móviles dentro de una ciudad y de como se pueden relacionar estas distancias por medio de algoritmos computacionales como Delanauy y Voronoi que nos dan otra perspectiva del terreno y encuentran de una manera dinámica la relación entre estos puntos.

El uso de los PM para estudiar puntos precisos nos da una herramienta móvil que sirve para el análisis dentro de nuestra referencia fija, además de tener la ventaja de poderse instalar en cualquier estructura que se encuentre dentro de ésta misma referencia.

El análisis con las triangulaciones de Delanauy y la posterior formación del terreno con Voronoi ofrecen herramientas precisas y cuyas iteraciones no consumen demasiados recursos de cómputo, por lo cual se pueden utilizar en aplicaciones medianas y pequeñas de nubes de puntos sin el temor de sobrecargar los sistemas de cómputo.

El uso de un grado de movimiento (GM) nos facilita la observación y estudio de un PM, ya que facilita (sin triangular) la ubicación y tendencia que contiene un punto sobre el terreno o el lugar inicial donde lo comenzamos a estudiar.

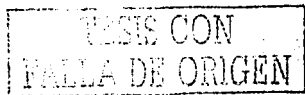
Los mapas de movimiento son los productos más sobresalientes de este trabajo, ya que de acuerdo a una referencia fija, podemos notar el movimiento natural de estas estructuras o puntos y además con las correcciones de éstos, realizadas con respecto al datum con que en México se realizan las mediciones topográficas.

Omeyocan demuestra que con una inversión muy pequeña y con la cooperación de diversos operadores de comunicaciones móviles, se puede construir un sistema que nos ayude a estudiar el terreno, ya que esta información se puede extraer de los sistemas de monitoreo de las estaciones base.

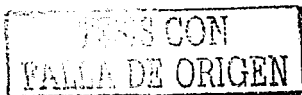
Esta opción debe ser considerada seriamente para el futuro, ya que con la ayuda del gobierno federal (quien concede los permisos de operación), los sitios de las estaciones base, pueden ser verdaderos centros de instrumentación y podríamos hacer multivariable nuestro estudio ya que se pueden sumar la temperatura o la presión atmosférica. Las estaciones base de los operadores son muy buenos candidatos, ya que por si mismas son sistemas autónomos que pueden sobrevivir a muchos eventos, incluso a la falta de energía y se encuentran protegidos y aislados dentro de las zonas urbanas en las cuales ofrecen servicios.

Bibliografía

- [1] "Principles of Physical Geology", John E. Sanders., Edit. Wiley & Sons, USA 1981, Páginas: 15-41, 412-433, 441-454.
- [2] "Earth history and plate tectonics", Carl K. Seyfert/Leslie A. Sirkin, USA 19179, Páginas: 1-12, 82-103.
- [3] "Interferometry and Synthesis in Radioastronomy", Richard Thompson, James M. Moran, Edit. John Wiley & Sons. USA 1986. Páginas :1-106, Páginas:247-308
- [4] "Página WEB del JPL (Jet Propultion Laboratory)", <http://www.jpl.nasa.gov>, sección del VLBI y del grupo geodésico.
- [5] "Página WEB de NASA", <http://www.nasa.gov>, sección del VLBI y del grupo geodésico.
- [6] "Página WEB del Geological Crustal", <http://www.usgs.gov>, sección geológica.
- [7] "Página WEB del GPS", <http://www.trimble.com/gps/index.html>, sección topográfica y geológica.
- [8] "Página WEB del Sistema Sismológico Nacional, <http://www.ssn.unam.mx>
- [9] "Cosmos", Carl Sagan, Edit. Planeta, España 1987, Páginas:45-71, 73-135, 137-165
- [10] "Página WEB de la Agencia Espacial Europea (ESA)",
- [11] "Evolución de los conceptos de Física", Arnold B. Arons, Edit. Trillas, México 1970, Páginas: 518-533
- [12] "Óptica", Hecht-Zajac, Edit. Addison Wesley-Longman, México 1998, Páginas: 207-227, 233-283, 293-345, 350-417, 422-429, 451-463.
- [13] "Introduction to modern Optics", Grant R. Fowles, Edit. Dover, USA 1986, Páginas: 57-96.
- [14] "Página WEB de Japón", <http://quake.wr.usgs.gov/spudich>
- [15] "Third Euro-Latin American Space Conference 1997", Edit. ESA, México 1998, Páginas: 3-101, 319-369.
- [16] "Cuasares, en los confines del Universo", Déborah Dultzin, Edit. Fondo de Cultura Económica, México 1998, Páginas: 17-84.

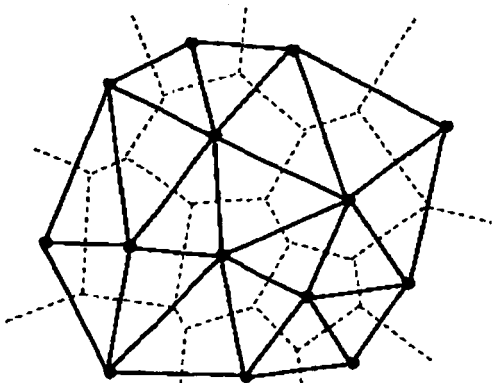


- [17] "Satellite Communications Systems", Maral-Busquet , Edit. Addison Wesley, Inglaterra 1993, Páginas: 1-69, 181-208, 223-307, 311-386.
- [18] "Computational Methods of Signal Recovery and Recognition", Mammone , Edit. Wiley series in Telecommunications, USA 1992, Páginas: 265-289
- [19] "Expert Systems Principles and Programming", Giarratano-Kiley , Edit. Addison Wesley, USA 1994, Páginas: 1-54, 63-86, 363-436.
- [20] "Microwaves devices", Pozart , Edit. Addison Wesley-Longman, USA 1998.
- [21] " Understanding GPS. Principles and applications", Artech House Publishers, USA 1996
- [22] "Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática", <http://www.inegi.gob.mx>
- [23] "Geometrical Computing", Departamento de Informática, Universidad Complutense de Madrid, Universidad de Texas, Universidad de Alberta <http://www.delanay.com> , <http://www.voronoi.org>
- [24] "Comunicación por satélite", Carlos Rosado, AHCJET, Suiza 2000



Apéndice 1

*Diagramas de Voronoi y
Triangulaciones de Delaunay*



TESIS CON
PASAJE DE ORIGEN

Diagramas de Voronoi

Los diagramas de Voronoi son estructuras muy útiles, frecuentemente se encuentran en muchas disciplinas, por su modelo de proceso de crecimiento y la relación entre distancias de objetos; no es una sorpresa su uso en el estudio del crecimiento de cristales o en estudios de las grandes estructuras del Universo. En la naturaleza, se pueden observar en las estructuras cristalinas o en la concha de una tortuga o en el cuello reticular de una jirafa.

Los diagramas de Voronoi se encuentran muy relacionados con muchas de las estructuras geométricas: polítipos, triangulaciones y arreglos. Sus propiedades matemáticas son numerosas e interesantes.

Los diagramas de Voronoi, también se usan como estructuras de datos con los cuales se pueden resolver múltiples problemas: planeación del vecino cercano y movilidad, por ejemplo.

A.1 Definiciones y propiedades básicas

Sea $P = \{ p_1, p_2, \dots, p_n \}$ un conjunto de puntos en el plano euclidiano bidimensional. Estos puntos son llamados sitios. Particionamos el plano, asignando a cada punto en éste a su sitio más cercano. Todos estos puntos asignados a p_i forman la región de Voronoi $V(p_i)$. $V(p_i)$ consiste de todos los puntos p_i al menos cercanos más que a cualquier otro sitio:

$$V(p_i) = \{ x : |p_i - x| \leq |p_j - x| \text{ para toda } i \neq j \} \quad \text{Ec. A.1}$$

Notemos que hemos definido a este conjunto como cerrado. Algunos puntos no tienen un único sitio vecino o vecino más cercano. El conjunto de todos los puntos que tienen más de un sitio vecino cercano, forman el diagrama de Voronoi $V(p)$ para el conjunto de sitios.

Después definiremos los diagramas de Voronoi para el conjunto de objetos más general que solo puntos. Por ahora veremos los diagramas solo con algunos sitios antes de detallar sus propiedades para una gran número de sitios n .

Dos sitios

Considere solo dos sitios, p_1 y p_2 . Sea $B(p_1, p_2) = B_{12}$ es el bisector perpendicular del segmento $p_1 p_2$. Entonces cada punto x en B_{12} es equidistante de p_1 y p_2 . Esto se puede verificar dibujando el triángulo (p_1, p_2, x) como se muestra en la figura A.1. Por el teorema de ángulo de lado de Euclides, $|p_1 x| = |p_2 x|$.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

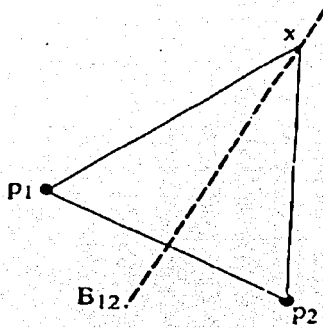
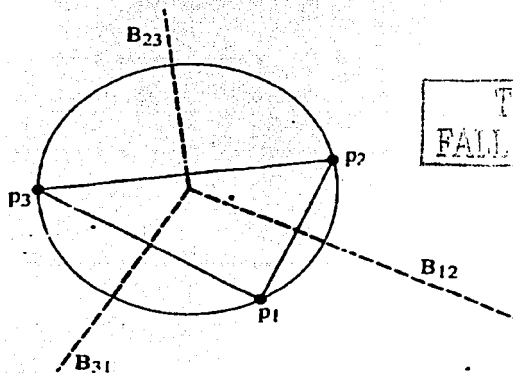


Figura A.1 Dos sitios $|p_1x| = |p_2x|$.

Tres sitios

Para tres sitios, es claro que lejos del triángulo (p_1, p_2, p_3) , el diagrama contiene los bisectores B_{12} , B_{23} y B_{31} . Lo que es no claro es lo que pasa en la vecindad de éste triángulo. Una vez más por Euclides los bisectores perpendiculares de los tres lados del triángulo todos pasan por un punto, el circuncentro, el centro del único círculo que pasa por los vértices del triángulo. Por esto el diagrama de Voronoi para los tres puntos debe aparecerse a la figura A.2.



TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Figura A.2 Tres sitios: los bisectores se encuentran en el circuncentro.

A.2 Medios Planos

La generalización detrás de los tres puntos es sin embargo, no del todo clara, pero es ciertamente claro que los bisectores B_{ij} jugarán un papel importante. Sea $H(p_i, p_j)$ cercano al medio plano con frontera B_{ij} y conteniendo p_i . Entonces $H(p_i, p_j)$ se puede ver como todos los puntos cercanos a p_i que lo que están a p_j . Ahora recordemos que $V(p_i)$ es el conjunto de todos los puntos cercanos a p_i más que a ningún otro sitio: en otras palabras, los puntos cercanos a p_i que a p_1 y más cercanos a p_i que a p_2 y más cercanos a p_i que a p_3 y así continuamente. Esto demuestra que podemos escribir esta ecuación para $V(p_i)$:

$$V(p_i) = \bigcap_{i \neq j} H(p_i, p_j), \quad \text{Ec. A.2}$$

Donde la notación implica que la intersección será tomada sobre toda i y toda j tal que $i \neq j$.

La ecuación A.2 inmediatamente nos da la propiedad de los diagramas de Voronoi. Las regiones de Voronoi son convexas, para la intersección de cualquier número de medios planos es un conjunto convexo. Cuando las regiones se limitan, éstas son polígonos convexas. Los bordes de las regiones de Voronoi son llamados bordes de Voronoi y los vértices son llamados vértices de Voronoi. Notese que un punto en el interior de los bordes de Voronoi tiene dos vecinos cercanos y un vértice de Voronoi tiene al menos tres sitios muy cercanos.

Cuatro sitios

El diagrama para cuatro puntos forma las esquinas de un rectángulo que se muestra en la figura A.4(a). Notese que los vértices de Voronoi es de cuarto grado. Ahora spongamos que un sitio se mueve ligeramente, como en la figura A.4(b). En un sentido este diagrama es normal y la figura A.4(a) es anormal o degenerada. Es degenerada porque se encuentran cuatro puntos cocirculares. Esto es sumamente útil cuando necesitamos excluir este tipo de degeneración.

Muchos sitios

Un diagrama típico con muchos sitios es el mostardo en la figura A.5. No se muestra un vértice de Voronoi en esta figura: Los dos rayos horizontales cercanos que se alejan del diagrama hacia la izquierda, no son del todo paralelas y se intersectan en un vértice de Voronoi a unos 70 centímetros a la izquierda de la figura.

TESIS CON
FALSA DE ORIGEN

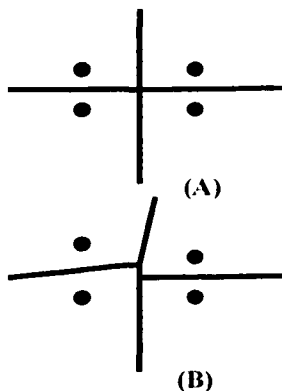


Figura A.3 (a) Diagrama de Voronoi de cuatro puntos cocirculares; (b) El diagrama después de mover el punto superior izquierdo

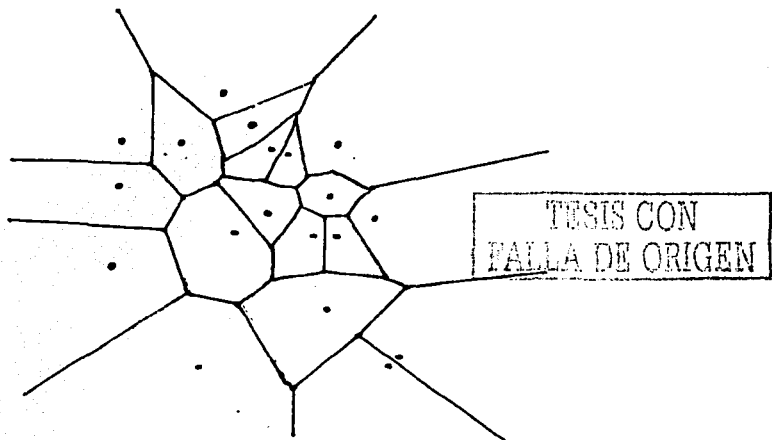


Figura A.4 Diagrama de Voronoi de $n = 20$ sitios

Triangulaciones de DELAUNAY

En 1934 Delaunay probó que cuando la gráfica dual se dibuja con líneas rectas, se produce una triangulación planar de los sitios de Voronoi P (si cuatro sitios no son cocirculares), llamada a triangulación de Delaunay $D(P)$. La A.5 muestra la triangulación de Delaunay para el diagrama de Voronoi de la figura A.4 y la figura A.6 muestra la triangulación de Delaunay superimpuesta en su diagrama de Voronoi correspondiente.

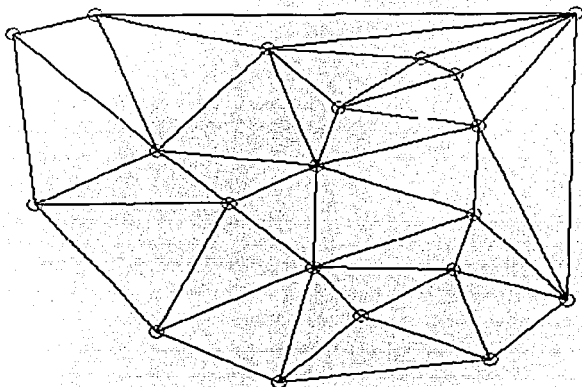
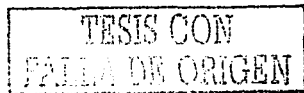


Figura A.5 Triangulación de Delaunay para los sitios de la figura A.4



A.3 Propiedades de las triangulaciones de Delaunay

Ya que las triangulaciones de Delaunay y los diagramas de Voronoi son estructuras duales, cada una de éstas contiene la misma información, en cierto sentido, pero que se encuentra representada en una forma distinta. Para tener control sobre estas complejas estructuras, es importante tener un conocimiento acerca de las relaciones entre las triangulaciones de Delaunay y sus correspondientes diagramas de Voronoi. A continuación se lista, sin probar ninguna, muchas propiedades de Delaunay y algunas consistentes de Voronoi:

Tenemos un conjunto fijo de puntos P .

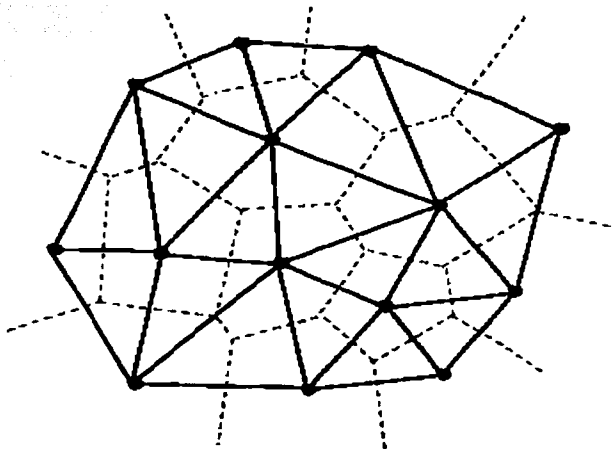


Figura A.6 Triangulación de Delaunay y los diagramas de Voronoi: Figuras A.4 y A.5 juntas.

- D1. $D(P)$ es una línea recta dual de $V(P)$. Estos es por definición.
- D2. $D(P)$ es una triangulación si ninguno de cuatro puntos de P son cocirculares: Cada cara es un triángulo. Este es el teorema de Delaunay. Las caras de $D(P)$ son llamadas triángulos de Delaunay.
- D3. Cada cara (del triángulo) de $D(P)$ corresponde a un vértice de $V(P)$.
- D4. Cada borde de $D(P)$ corresponde a un borde de $V(P)$.
- D5. Cada nodo de $D(P)$ corresponde a una región de $V(P)$.
- D6. La frontera de $D(P)$ es la estructura convexa de los sitios.
- D7. El interior de cada cara (triángulo) de $D(P)$ no contiene sitios. (Compare con V5)

Las propiedades D6 y D7 son las más interesantes; se pueden verificar en las figuras A.5 y A.6. Por otro lado las de Voronoi son las siguientes:

- V1. Cada región de Voronoi $V(p_i)$ es convexa

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Geología Satelital

V3. Si v es un vértice de Voronoi en el empalme de $V(p_1)$, $V(p_2)$ y $V(p_3)$, entonces v es el centro del círculo $C(v)$ determinado por p_1 , p_2 y p_3 . (Esta reivindicación generaliza a los vértices de Voronoi de cualquier grado).

V4. $C(v)$ es el circuncírculo para el triángulo de Delaunay correspondiente a v .

V5. El interior de $C(v)$ no contiene sitios. (Compare con **D7**)

V6. Si p_j es el vecino más cercano a p_i , entonces (p_i, p_j) es un borde de $D(P)$.

V7. Si hay un círculo que atraviesa p_i y p_j entonces no contiene otros sitios y (p_i, p_j) es un borde de $D(P)$. Lo contrario también se mantiene: Para cada borde de Delaunay, existe un círculo vacío.

La propiedad **V7**, la menos intuitiva, es una importante caracterización de los bordes de Delaunay y es muy usada para muchas demostraciones.

Bibliografía: "*Computational Geometry in C*", Second Edition, Joseph O' Rourke, Cambridge, USA 2000.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN