



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

ESTIMACIÓN DEL VAPOR DE AGUA EN LA
ATMÓSFERA A PARTIR DE DATOS GPS

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

INGENIERO GEOMÁTICO

PRESENTA:

ROBERTO PINEDA LEÓN

DIRECTORA DE TESIS:

M.C. MARÍA ELENA OSORIO TAI



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2018

*El ayer es historia,
el mañana un sueño,
y el hoy, una realidad.*

Dedicatoria

Para esa mujer maravillosa que tengo la fortuna de poder llamar madre, siendo ella sin duda alguna, el pilar central de mi vida, quien con sus incansables regaños e inagotables consejos formó lo que fui, lo que soy y gran parte de lo que seré, y que sin ella este logro no hubiera sido posible, ella que estuvo a mi lado durante las noches mas largas; inquebrantable, fuerte y estoica, logrando sacar siempre de mi ese plus que requieren algunas cosas.

Para todas las personas especiales que de alguna u otra forma me han apoyado; mi pareja, mis hermanos, mis hermanas, amigos, a los que tristemente ya no están y demás personas que he tenido la fortuna de encontrar en lo que llevo de este trayecto llamado vida, y que sin ellos hubiese sido más difícil el llegar a concluir el día de hoy uno de los principales ciclos de mi vida.

Para mi hermana menor, mis primos y sobrinos; que sabiendo que soy el mayor y en cierta forma un ejemplo, o una excusa para sus decisiones académicas, les he dejado un camino no muy fácil, pero que de todo corazón espero superen, siguiendo su propio camino, pero con la meta de ser siempre mejores.

Y por último y no menos importante, para toda la serie de errores que he cometido en mi vida, y obviamente también para toda la serie de aciertos que he cometido, que me han llevado a ser lo que soy, y que me han ayudado a ser alguien cada vez mas fuerte, orgulloso de sus logros, e igualmente orgulloso de sus fracasos, convirtiéndome en alguien que busca superarse día a día, esperando algún día poder tocar el cielo.

Agradecimientos

A mi madre por estar a mi lado desde mis comienzos en esta vida, por cuidarme, apoyarme y alentarme a seguir, siempre confiando en mí y en mis capacidades, por ser pilar fundamental de mi vida y de mis estudios, y más que nada por brindarme su amor incondicionalmente, su cariño, y sus muy valiosos y necesarios consejos durante cada desvelada que sufrimos a lo largo de este camino.

A mi pareja, por todo el apoyo que me ha brindado desde que decidió entrar en mi vida, por ser ese apoyo en mi día a día, por comprenderme y entenderme (que no son tareas fáciles) por ser una parte esencial en el funcionamiento de las cosas, y más que nada por ser esa bocanada de aire fresco cuando la he necesitado.

A mi tío Miguel Ávila Chávez, quien sin conocer la persona que soy decidió brindarme su apoyo, contribuyendo en gran medida a mis últimos años de universidad, permitiéndome continuar con mis estudios hasta la conclusión de los mismos.

A mis hermanos (Gabriel, Jesús y Miguel) y hermanas (Martha, Teresa y Magdalena) que a pesar de las circunstancias y de las dificultades, siempre han estado ahí para apoyarme, desde su postura, y a su manera, pero siempre han estado ahí.

A mis profesores, que sin ellos no hubiera sido posible llegar a este momento cumbre en mi vida, haciendo mención especial al Ing. Bartolo Lara Andrade, que sin duda alguna es una de las personas más preparadas que conozco, o como siempre he dicho es una enciclopedia andante; al Dr. Jorge Zavala Hidalgo que sin su apoyo no hubiera sido posible la elaboración de este trabajo, una gran persona con una pasión única, preocupado y ocupado por las personas que lo rodean; y una mención más que especial para mi directora de tesis y gran amiga la Mtra. María Elena Osorio Tai, que desde que tuve la fortuna de llevar clases con ella siempre me ha apoyado, una persona con un enorme conocimiento y con grandes ganas de transmitirlo, que pese a ser alguien muy joven tiene la sabiduría de un anciano; sin duda alguna una niña prodigio.

A todos mis amigos (Armandito, Amandita, Bazan, Fabs, Katya, Los Moluscos, Marts, Rodo y Saulo), que gracias a ellos, mi estancia en la universidad fue placentera, además de hacer que las pocas desveladas que tuve fueran amenas, a Arantxa y Oscar que me ayudaron con muchos problemas técnicos que surgieron durante la escritura de este documento, y gracias también por hacer agradables todas las tardes que estuve en el CCA. Y por último pero no menos importante gracias a la Universidad, mi alma mater, que me permitió crecer y desenvolverme como ser humano, por cobijarme y hacer de mí una mejor persona en todos los aspectos.

A la Subsecretaría de Educación Superior (SES) de la Secretaría de Educación Pública (SEP), a través de la Coordinación Nacional de Becas de Educación Superior (CNBES), en conjunto con la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), en colaboración con la Dirección General de Cooperación e Internacionalización (DGECI), y la Fundación UNAM, A.C. (FUNAM); por la oportunidad de participar en el Programa de Becas Estudiantiles SEP-UNAM-FUNAM 2017, mediante la Beca de Capacitación en Métodos de Investigación, brindándome la oportunidad de asistir por un período de dos meses a la Universitat Politècnica de València, en la cual realicé estudios que contribuyeron al presente trabajo.

Esta investigación ha sido financiada por el Fondo Sectorial CONACyT - SENER - Hidrocarburos, proyecto 201441. Esta es una contribución del Consorcio de Investigación del Golfo de México (CIGoM).

Al Dr. José Luis Berné Valero, y a la Dra. Natalia Garrido Villén, por brindarme su apoyo durante mi estancia en Valencia, y por contribuir a mi formación y conocimientos haciendo de está una experiencia única e inolvidable.

Abreviaturas

GPS	Global Positioning System (Sistema de Posicionamiento Global)
NAVSTAR	NAVigation System Timing And Ranging
TIMATION	TIME navigATIOn
GLONASS	GLObal'naya NAVigatsionnaya Sputnikovaya Sistema (Sistema Global de Navegación con Satélites Rusos)
SIG	Sistemas de Información Geográfica
CCA	Centro de Ciencias de la Atmósfera
NSF	National Science Foundation
UNAM	Universidad Nacional Autónoma de México
PBO	Plate Boundary Observatory
COCO-Net	Continuously Operating Caribbean GPS Observational Network
GNSS	Global Navigation Satellite System (Sistema Global de Navegación por Satélite)
TLALOC-Net	Trans-boundary, Land and Atmosphere Long-term Observational and Collaborative Network
UTC	Universal Time Coordinated (Tiempo Universal Coordinado)
USA	United States of America (Estados Unidos de América)
IERS	International Earth Rotation Service (Servicio Internacional de Rotación de la Tierra)
ITRS	International Terrestrial Reference System (Sistema Internacional de Referencia Terrestre)
PWV	Precipitable Water Vapor (Vapor de Agua Precipitable)
NASA	National Aeronautics and Space Administration
ZHD	Zenith Hydrostatic Delay (Retardo Seco Cenital)
ZWD	Zenith Wet Delay (Retardo Húmedo Cenital)

Resumen

Existe una infinidad de aplicaciones del Sistema Global de Navegación por Satélite (GNSS), que se pueden dividir en dos grupos; de uso militar y de uso civil, siendo éste último de donde se desprende la aplicación en el campo de la meteorología, el cual es el tema principal del presente escrito.

En la meteorología, el Sistema de Posicionamiento Global (GPS) resulta de gran utilidad en las mediciones de vapor de agua precipitable (PWV), debido a la sensibilidad de las señales GNSS frente al vapor de agua contenido en la atmósfera. A pesar de ser un tema relativamente nuevo, ya se han realizado estudios de este tipo en diversas partes del mundo, llegando a resultados satisfactorios, pero sin emplear los resultados como alternativas en la cuantificación de vapor de agua y la asimilación de ésta variable para mejorar los pronósticos meteorológicos.

El presente escrito se centra en el retardo que sufre la señal GNSS al atravesar la tropósfera, entendiendo como tropósfera o atmósfera neutral, la fracción de atmósfera que se extiende desde la superficie de la Tierra, hasta los 50 km de altitud, debido a que es en esta área en donde se concentra el 75 % de la masa atmosférica, así como la mayor parte del vapor de agua, jugando un papel importante en la regulación de la temperatura, debido a la propiedad que posee el vapor de agua de absorber la energía solar y la radiación térmica de la superficie de la Tierra.

El retraso en la señal GNSS debido a la región troposférica, es causado por las características del medio de propagación, teniendo mayor influencia el índice de refracción y por ende la refractividad atmosférica, debido a que se encuentran en función de la presión, temperatura y humedad, parámetros que se obtienen de los archivos RINEX meteorológicos de las estaciones GPS. En la actualidad existe una infinidad de modelos, para calcular el retardo troposférico húmedo, hidrostático y total, siendo los principales los propuestos por *Saastamoinen*, *Hopfield* y por *Goad y Goodman*, o modelo modificado de Hopfield. En el presente estudio solo se consideran los modelos desarrollados para cuantificar el retardo de la señal en la región húmeda de la tropósfera.

Índice general

Portada	I
Dedicatoria	V
Agradecimientos	VII
Abreviaturas	IX
Resumen	XI
Índice general	XIII
Índice de figuras	XVII
Índice de tablas	XIX
1. Introducción	1
1.1. Antecedentes	1
1.2. Objetivos	8
1.2.1. Objetivo general	8
1.2.2. Objetivos particulares	8
2. Principios del GNSS	9
2.1. Sistemas Globales de Navegación por Satélite (GNSS)	11
2.2. Sistemas de coordenadas	12
2.2.1. Sistemas de referencia terrestres	13
2.2.2. Sistemas de referencia celestes	15
2.3. Sistemas de tiempo	18
2.4. Señal GPS	20
3. Observables GPS	23

3.1. Pseudodistancia	24
3.2. Fase de la portadora	26
4. Fuentes de error	29
4.1. Errores relativos al satélite	30
4.1.1. Sincronización de los relojes	30
4.1.2. Errores orbitales	31
4.1.3. Efemérides del GPS	32
4.2. Errores relativos a la propagación de la señal	33
4.2.1. Retraso ionosférico	34
4.2.2. Retraso troposférico	37
4.2.2.1. Modelos para cuantificar el Retardo Húmedo Cenital (ZWD)	49
4.2.2.2. Funciones de mapeo	52
4.2.3. Disponibilidad selectiva	52
4.2.4. Efecto multitrayectoria	53
4.3. Errores relativos al receptor	56
4.3.1. Ruido en la medición del receptor	57
4.3.2. Variación del centro de fase de la antena	57
4.3.3. Dilución de la precisión	59
5. Postproceso en las observaciones GPS	63
5.1. Recolección de datos y el formato RINEX	63
6. Meteorología	67
6.1. Vapor de agua precipitable (PWV)	69
6.2. Meteorología con GNSS	70
6.2.1. Elementos de las estaciones GPS-Meteorológicas	75
7. Métodos y datos	77
7.1. Cálculo de vapor de agua mediante GNSS	79
7.2. Cálculo de vapor de agua mediante radiosondeo	85
8. Resultados	89
8.1. Referentes al GNSS	89
8.2. Referentes a radiosondeo	94
8.3. Comparativa de resultados	95

9. Discusión y conclusiones	103
Anexo I	105
Anexo II	107
Anexo III	111
Anexo IV	113
Bibliografía	115

Índice de figuras

1.1. Primer Satélite Artificial: Sputnik I	2
1.2. Estaciones que conforman la Red TLALOC-Net	5
1.3. Estaciones pertenecientes a la Red COCO-Net	6
2.1. Elementos que componen un GNSS	10
2.2. Sistemas de referencia y sistemas de coordenadas	13
2.3. Esquema de los diferentes polos y planos de apoyo	14
2.4. Estructura de una señal GPS	21
3.1. Diferencias de tiempo	24
3.2. Fase de la portadora	27
4.1. Capas de la ionósfera	35
4.2. Capas de la tropósfera	37
4.3. Ley de Snell	38
4.4. Diferencia geométrica	41
4.5. Efecto multipath	53
4.6. Antena Choke Ring	59
4.7. Dilución de la precisión	59
6.1. Temperatura en superficie	73
6.2. Temperatura media de la columna de vapor de agua	73
6.3. Recta de ajuste con mínimos cuadrados	75
7.1. Mapa de distribución de estaciones de radiosondeo	77
7.2. Estaciones GPS-Met en la República mexicana de la red TLALOC-Net	78
7.3. Estaciones que componen la red UCAR SuomiNet	78
7.4. Estaciones con los tres archivos RINEX	79
7.5. Estaciones de la red TLALOC-Net empleadas en el presente estudio	80

7.6. Datos de temperatura, extraídos del archivo RINEX meteorológico, para la estación TNCU	81
7.7. Datos de presión, extraídos del archivo RINEX meteorológico, para la estación TNCU	81
7.8. Datos de humedad relativa, extraídos del archivo RINEX meteorológico, para la estación TNCU	82
7.9. ZWD a partir del modelo de Saastamoinen en estación TNCU	82
7.10. ZWD a partir del modelo de Hopfield en estación TNCU	83
7.11. ZWD a partir del modelo de Ifadis en estación TNCU	83
7.12. ZWD a partir del modelo de Berman en estación TNCU	84
7.13. Comparación de los resultados obtenidos de ZWD	84
7.14. Estaciones de radiosondeo y GPS-Met empleadas	85
7.15. Humedad Relativa obtenida con radiosondeos	86
7.16. Presión atmosférica obtenida con radiosondeos	87
7.17. Temperatura obtenida con radiosondeos	87
8.1. Vapor de agua precipitable para la estación CN24	89
8.2. Vapor de agua precipitable para la estación CN25	90
8.3. Vapor de agua precipitable para la estación TGMX	90
8.4. Vapor de agua precipitable para la estación TNAM	91
8.5. Vapor de agua precipitable para la estación TNBA	91
8.6. Vapor de agua precipitable para la estación TNCU	92
8.7. Vapor de agua precipitable para la estación TNHM	92
8.8. Vapor de agua precipitable para la estación TNPP	93
8.9. Vapor de agua precipitable para la estación TNTB	93
8.10. Comparación en el cálculo de vapor de agua precipitable con datos de radiosondeo . .	94
8.11. Comparación en el cálculo de vapor de agua precipitable, estación CN24	95
8.12. Comparación en el cálculo de vapor de agua precipitable, estación CN25	96
8.13. Comparación en el cálculo de vapor de agua precipitable, estación TNBA	96
8.14. Comparación en el cálculo de vapor de agua precipitable, estación TNHM	97
8.15. Comparación en el cálculo de vapor de agua precipitable, estación TNPP	97
8.16. Comparación en el cálculo de vapor de agua precipitable, estación TNTB	98
8.17. Comparación en el cálculo de vapor de agua precipitable, estación TGMX	98
8.18. Comparación en el cálculo de vapor de agua precipitable, estación TNAM	99
8.19. Comparación en el cálculo de vapor de agua precipitable, estación TNCU	99

Índice de tablas

4.1. Tabla de errores relacionados con el GNSS.	29
4.2. Datos de corrección de órbita en el mensaje de navegación, tomada de Valero <i>et al.</i> (2013).	32
4.5. Valores propuestos para las constantes de refractividad.	46
5.1. Estructura general del encabezado de un archivo RINEX.	65
6.1. Distribución de las capas atmosféricas de acuerdo a sus características.	67
6.2. Modelos de temperatura media	72
8.1. Correlaciones de los diferentes métodos empleados.	100
8.2. Error absoluto promedio de los diferentes métodos empleados.	100
8.3. Raíz del error cuadrático medio de los diferentes métodos empleados.	101

Introducción

Desde tiempos remotos han surgido interrogantes de todo tipo para el ser humano, tales como el conocer la posición que ocupan sitios representativos, y la forma de acceder a esos sitios. Ante estas premisas surgen los sistemas de posicionamiento también llamados sistemas de referencia, los cuales se conforman por un punto de referencia denominado origen y un sistema de ejes coordenados ortogonales. En estos sistemas se pueden definir vectores de magnitud unitaria, los cuales indican la dirección de los ejes. Los sistemas de coordenadas tienen como objetivo principal determinar la posición mediante coordenadas en un sistema espacial, el cual puede ser bidimensional o tridimensional.

1.1. Antecedentes

El GPS tiene su origen en la llamada era de la geodesia espacial, la cual fue iniciada por la URSS en Octubre de 1957, con el lanzamiento del primer satélite artificial, Sputnik I, (Fig. 1.1). Uno de los resultados fue la posibilidad de establecer la órbita de un satélite, a partir de la determinación del corrimiento Doppler de las señales radiodifundidas por dicho satélite, dando paso a la planeación inversa, es decir, si se conoce previamente la órbita, se puede determinar la posición de un receptor en una ubicación cualquiera, teniendo como única limitante la realización de observaciones durante varios pasos del satélite. Este fue el punto de partida para el desarrollo del sistema Transit, el cual se creó con fines exclusivamente militares, entrando en operaciones en 1964.

En 1967, el sistema Transit se comenzó a utilizar en trabajos de tipo geodésico. En 1969 el sistema Transit dejó de operar para dar paso a la implementación de un nuevo sistema, llamado NAVSTAR, el cual cubrió deficiencias que caracterizaban al sistema Transit, siendo las más significativas, la afectación de las órbitas por las variaciones del campo de gravedad provocada por la escasa altura, la alteración de la transmisión de la señal debido a la baja frecuencia de emisión, y huecos producidos en las observaciones grandes, en consecuencia de la configuración del sistema y al reducido número

1. INTRODUCCIÓN

de satélites que conformaban la constelación (entre 5 y 7) (Huerta E, 2005).

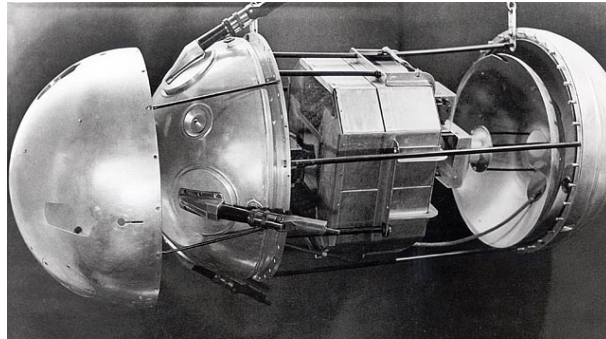


Figura 1.1: Primer Satélite Artificial: Sputnik I, tomada de: http://mentallandscape.com/S_Sputnik1.htm

Aunque hoy en día el GPS ya no es únicamente de carácter militar, es notable la importancia que aún tiene en este campo, puesto que es un componente esencial para los sistemas militares; utilizándose en armas dirigidas de alta precisión, posicionamiento de vehículos terrestres, aéreos o marinos. Pero sin duda alguna la mayor utilidad del GNSS se encuentra en el sector civil, en donde destacan aplicaciones en diversas áreas:

- Automoción
- Ferrocarriles
- Aviación
- Navegación marítima
- Inspección y mapeo de territorios (geodesia y geofísica)
- Sincronización de equipos
- Telefonía móvil
- Servicios de localización y emergencia
- Movimiento tectónico
- Telecomunicaciones
- Control de riesgos
- Meteorología
- Elaboración de mapas de la ionósfera

Siendo su aplicación en la meteorología el uso principal para el desarrollo de este trabajo. De acuerdo a Cabral (2016) quien menciona a Gutman y Benjamin (2001), las aplicaciones del GPS en la meteorología son; la asimilación en modelos numéricos de predicción de tiempo y mediciones de vapor de agua precipitable. Esto se debe a la sensibilidad de las señales GPS frente al contenido de vapor de agua en la atmósfera, pudiendo obtener una tomografía de vapor de agua, así como la descripción de su evolución temporal.

A mediados de los años 80 la comunidad científica encontró en el GPS un método alternativo en el monitoreo de vapor de agua atmosférico, mediante el uso de las señales transmitidas por los satélites de GPS. A pesar de ser relativamente nuevo este campo de acción, ya se han realizado diversos estudios en distintas partes del mundo, que tienen como principal punto de acción la medición de vapor de agua en la atmósfera, entre los que destacan:

El trabajo que desarrolló a manera de tesis Mirovan Šverko Navarrete en Noviembre de 2012, que lleva por título “Método de estimación del vapor de agua precipitable, por detección remoto, mediante el sistema de Posicionamiento Global (GPS) con aplicación en el mejoramiento del pronóstico del estado del tiempo en la ciudad de Bogotá, D.C.”. Šverko Navarrete (2012) opta por dejar a un lado los softwares institucionales y comerciales como, GAMIT, GIPSY y BERNESE, para trabajar directamente con los archivos crudos en formato ASCII, concluyendo que al evaluar los modelos de retardo cenital hidrostático, el modelo de Saastamoinen proporcionó resultados mas exactos que el modelo de Hopfield. Por otra parte, los datos de vapor de agua precipitable (PWV) obtenidos a partir del GPS muestran una buena compatibilidad con los radiosondeos, ya que tuvieron un coeficiente de correlación de 0.94, mientras que al compararlos con el modelo Global Forecast System (GFS) con resolución de 1° se presentó una correlación de 0.74.

Otro trabajo que sigue la misma línea de acción, es el que desarrollaron Cioce *et al.* (2011) realizado de Julio a Septiembre de 2011 que lleva por título “Determinación del vapor de agua troposférico a través de observaciones GPS: Primeros ensayos en Venezuela”. A diferencia de Šverko Navarrete (2012), este trabajo fue posible, gracias al diseño de una estrategia de procesamiento con el software Bernese GPS v5.0 orientada a la estimación del retardo húmedo cenital de la señal satelital, considerando datos meteorológicos in situ; para la conversión de retardo húmedo cenital a vapor de agua integrado se apoyó en la aplicación TROPOSWASSER v1.0. Cabe mencionar que trabajaron únicamente con datos GPS, siendo imposible realizar una comparación con otras metodologías.

1. INTRODUCCIÓN

Otros autores que han trabajado en esta temática son Fernández *et al.* (2009), en su trabajo “Determinación del contenido de vapor de agua precipitable (PVW) a partir de mediciones GPS: Primeros resultados en Argentina”. Estos autores proponen el uso de GPS para determinar el contenido de vapor de agua precipitable, aprovechando las ventajas del sistema, como lo son, el bajo costo, la medición continua en todos los puntos del planeta y en cualquier condición climática.

Encontrar nuevos campos de aplicación de los datos obtenidos mediante GPS, es un tema que se encuentra en principios del desarrollo para México, teniendo a científicos, como el Doctor David Adams, como su principal promotor, quién en 2013, propuso calcular la cantidad total de vapor de agua presente en la atmósfera en la zona noroeste de México y el suroeste de Estados Unidos; apoyándose en las redes meteorológicas ya establecidas. Si bien, éste es uno de los proyectos que mayor fuerza tiene en el campo de la meteorología con GNSS para México, no es el primero, puesto que ya se han intentado realizar diversos proyectos de este tipo, como lo es el North American Monsoon Experiment, también llamado NAME, logrando en el 2004, un esfuerzo coordinado internacionalmente con el objetivo de comprender mejor la precipitación pluvial en Norteamérica y proveer información para hacer modelos numéricos.

Otro proyecto de suma importancia para nuestro país, es el que dio inicio en Septiembre de 2010, cuando 35 investigadores de México y USA, financiados por el Consejo Nacional de Ciencias y Tecnología (CONACYT) y la National Science Foundation (NSF), se reunieron en Puerto Vallarta para planear, usos y estrategias para la implementación de una red GPS-Meteorológica (GPS-Met), la cual tuviese aplicaciones en el pronóstico meteorológico, así como en el estudio de procesos sísmicos, y volcánicos en México, dando como resultado la red TLALOC-Net ¹, la cual permitiría extender las observaciones GPS-Met que se realizan en el resto de Norteamérica (PBO) y el Caribe (COCO-Net).

TLALOC-Net es una red GPS-Met (Fig. 1.2), perteneciente a México, la cual se diseñó para la investigación del ciclo sísmico, geodinámica, tectónica, subsidencia, procesos atmosféricos y clima espacial. Planeada en dos fases, instalando 38 estaciones GPS-Met en la fase inicial, para posteriormente, en la segunda fase instalar 22 estaciones adicionales. Se planeó instalar 6 estaciones en áreas insulares, como lo son algunas islas del Océano Pacífico, Mar de Cortés y Golfo de México, permitiendo con estas acciones tener presencia en todos los estados del país.

¹Para mayor información consultar :
<https://www.unavco.org/projects/major-projects/tlalocnet/tlalocnet.html> y
<http://cardi.geofisica.unam.mx/tlalocnet/>



Figura 1.2: Estaciones que conforman la red TLALOC-Net, imagen tomada de <http://tlalocnet.udg.mx/tlalocnetgsac/gscapi/site/search>.

Aunque aún se encuentra en desarrollo, hoy en día se cuentan con 32 estaciones, las cuales se distribuyen en el centro, sur, occidente y noroeste de México. Se iniciaron sus operaciones en Julio de 2014; todas las estaciones cuentan con conexión a internet, para facilitar su reporte de datos, que se realiza de manera periódica y automatizada (Cabral E, 2016). Cuando se haya completado esta red, además de abarcar a todo el país, se unirá a la infraestructura GPS existente en América del Norte y el Caribe. Por lo tanto la ubicación de las estaciones funcionales, resulta ser de suma importancia, puesto que algunas estaciones, como las que se encuentran en los estados de Chiapas y Quintana Roo pertenecen a COCO-Net, creando de esta manera una cobertura continua de estaciones GPS desde Alaska hasta América del Sur.

Debido a que esta red trabaja con una política de datos abiertos y libres, los archivos de observables GPS, así como el registro meteorológico complementario de las estaciones, se encuentra disponible a través de su repositorio de datos en <http://tlalocnet.udg.mx>.

COCO-Net es financiada por UNAVCO, y aunque aún no esta completa, se conformará por 50 estaciones GPS-atmosféricas de operación continua, sumadas a las 50 estaciones GPS ya existentes operadas por la NSF. Hasta el año 2017 son 61 las estaciones puestas en funcionamiento, las cuales se pueden apreciar en la figura 1.3. Los datos GPS y meteorológicos obtenidos se envían diariamente

1. INTRODUCCIÓN

al centro de datos de UNAVCO, localizado en Boulder, Colorado, Estados Unidos. Los datos de las estaciones COCO-Net están disponibles vía FTP y a través del portal de datos de UNAVCO en <http://facility.unavco.org/data/dai2/dai2.html>.

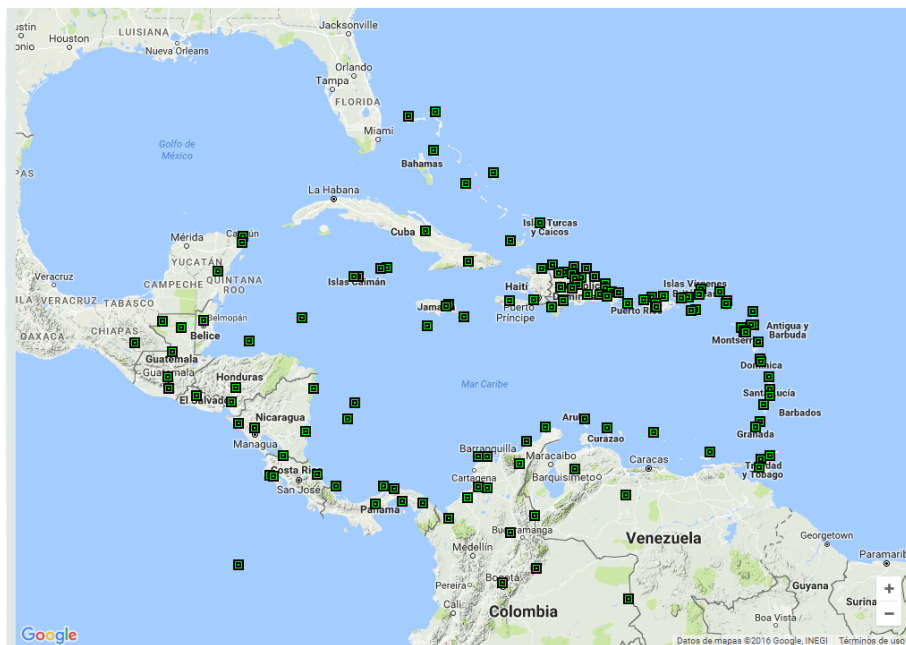


Figura 1.3: Estaciones que conforman la red COCO-Net, imagen tomada de <http://www.unavco.org/instrumentation/networks/status/coconet>.

A manera de guía se describe la información contenida en cada capítulo del presente escrito, con la finalidad de una mejor comprensión inicial de los alcances del presente trabajo.

En el primer capítulo se realiza un breve recorrido histórico en el campo de la geodesia satelital, así como un análisis de los trabajos que se han realizado previamente en diversas partes del mundo, y los alcances que obtuvieron los mismos. Estos fungieron como punto de partida para el presente trabajo.

En el segundo capítulo se detallan los elementos que conforman un sistema GNSS, la utilidad y funcionamiento de estos sistemas, así como los elementos necesarios para poder desarrollar un GNSS. Además se explican algunos sistemas de coordenadas, la utilidad de cada uno, y los principales elementos que los conforman, así como los diferentes sistemas de tiempo que existen, y la relación que presentan con diversos fenómenos naturales, mencionando la estructura de una señal GNSS y las variaciones que existen entre una señal de uso civil y una señal de uso militar.

En el tercer capítulo se describen los observables GPS, los métodos que se pueden emplear para el cálculo de distancias a partir de datos GNSS, y la posterior aplicación de estos para el posicionamiento espacial mediante coordenadas, explicando las ventajas y desventajas que presentan los diferentes métodos que se emplean para el cálculo de distancias empleando datos GNSS.

En el cuarto capítulo se abordan los errores presentes en una observación GNSS, los cuales se clasifican en tres grupos principales, siendo referentes al satélite, al receptor, y al medio de propagación; así como las formas de mitigar dichos errores y el grado en que afectan a la precisión de las observaciones GNSS.

El quinto capítulo menciona brevemente lo que es un archivo RINEX, y las extensiones utilizadas por el sistema GPS.

El sexto capítulo explica el procedimiento matemático necesario para la obtención del vapor de agua a partir de datos de radiosondeo, así como los elementos e instrumentos necesarios para una estación GPS meteorológica.

En el séptimo capítulo se presenta, a manera de mapas, la distribución de las estaciones de radiosondeo y GPS-Met empleadas para el presente trabajo, así como los resultados parciales que se obtienen al calcular el vapor de agua precipitable con GNSS y con radiosondeo.

En el octavo capítulo se abordan los resultados obtenidos en el presente trabajo, así como la comparativa de dichos resultados y su correlación con datos de radiosondeo y datos GNSS calculados con software especializado (Bernese) de la red UCAR SuomiNet.

En el noveno capítulo se concluye brevemente el trabajo, mencionando los alcances obtenidos.

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo general

El presente trabajo tiene como finalidad, brindar una herramienta que permita la medición y posterior análisis de la cantidad de vapor de agua precipitable presente en la atmósfera, apoyándose en datos GPS, sin requerir software especializado para el procesamiento de datos GPS como lo es Bernese o GIPSY - OASIS, sin que se afecte la precisión en los resultados.

1.2.2. Objetivos particulares

- Estudiar el efecto atmosférico en los retrasos de la señal GPS y en particular el vapor de agua presente en la atmósfera.
- Representar gráficamente de los elementos atmosféricos necesarios para el cálculo de vapor de agua precipitable en la atmósfera.
- Comparar los resultados generados mediante modelos teóricos a partir de datos GNSS, y de los resultados obtenidos a partir de datos de radiosondeo.
- Comparar los resultados generados mediante modelos teóricos a partir de datos GNSS, y de los resultados obtenidos mediante el software Bernese.
- Generar datos de alta resolución temporal.

Principios del GNSS

Los Sistemas Globales de Navegación por Satélite (GNSS), son un conjunto de elementos, los cuales fueron diseñados con el propósito de mitigar los problemas relacionados con el posicionamiento y la navegación, puesto que su principal objetivo es obtener la ubicación en tiempo real de cualquier punto sobre la superficie terrestre.

Los GNSS son un sistema continuo, que se encuentra disponible para cualquier usuario en el mundo, debido a que trabaja de manera continua bajo cualquier condición meteorológica. Tomando en cuenta esta característica, se consideraron nuevas aplicaciones del sistema, las cuales se mencionan en la sección (1.1) de esta tesis. Según Šverko Navarrete (2012), quien menciona a Ramos López *et al.* (2009), al ser un sistema continuo supone una de las mejores herramientas en la actualidad a nivel internacional, para el análisis de la evolución del vapor de agua en la columna atmosférica.

Los sistemas de navegación por satélite tienen una estructura claramente definida, la cual se divide en tres segmentos distintos, entendiendo que si falta alguno de estos componentes, no se podría considerar un GNSS (Fig. 2.1):

- **Segmento espacial:** Se compone por los satélites que pertenecen al sistema, sin importar la finalidad de estos, ya que puede haberlos tanto de navegación, como de comunicación. El segmento espacial de un GNSS, debe tener el número suficiente de satélites de navegación, con la finalidad de poder garantizar una cobertura global en cualquier instante, además de poder asegurar un gran número de satélites visibles para obtener un posicionamiento de mayor precisión, y contemplar la posibilidad de que algún satélite deje de prestar servicio y aún así garantizar el adecuado funcionamiento del sistema.
- **Segmento control:** Este segmento está conformado por estaciones en tierra, las cuales se

encargan de realizar el seguimiento de los satélites para supervisión, sincronización y corrección de fallas. Cada país o conjunto de países dependiendo del sistema satelital cuenta con su propio segmento control. Las estaciones que forman parte del segmento control, se dividen en tres tipos diferentes: estación de control maestra, estación *uplink* y estación monitora.

■ **Segmento usuario:** Se compone por los dispositivos GNSS que reciben las señales provenientes del segmento espacial, los cuales pueden ser de distintos tipos. Debido a la diversidad de aplicaciones del sistema GNSS, sin importar el tipo de receptor, o la clasificación que se tome en cuenta, todos los receptores fueron diseñados para que se hagan cargo de tres funciones principales:

- *Satellite Manager:* se encarga de la gestión de los datos que envía el satélite. Debido a que el receptor está inicialmente en modo INIT, el cual se encarga de almacenar el almanaque y el estado de los satélites en una memoria, para posteriormente pasar al modo NAV en el cual se almacenan los datos necesarios para los cálculos.
- *Select Satellite:* se encarga de encontrar los satélites con geometría óptima para la navegación (mínimo cuatro satélites).
- *SV Position Velocity Acceleration:* calcula la posición y velocidad de los satélites empleados en la navegación.

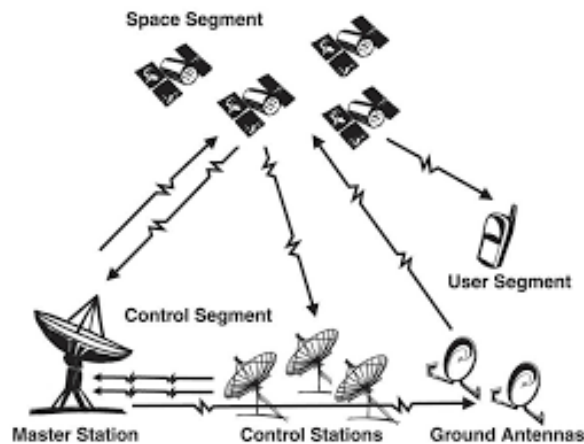


Figura 2.1: Componentes de un GNSS, imagen tomada de : <https://shivkumardas.wordpress.com/agri-tech/an-introduction-to-gps-gis-and-its-uses-in-agriculture/>

2.1. Sistemas Globales de Navegación por Satélite (GNSS)

- **NAVSTAR - GPS:** Compuesto por 30 satélites, distribuidos en 6 planos orbitales con una inclinación de 55° con respecto al Ecuador y situados a una altitud de 20 200 km, viajando a una velocidad de 7 000 millas por hora. Además de tener en tierra una estación de control maestra, la cual se sitúa en Colorado Springs, y dos estaciones de reserva en California y Maryland. Provee dos niveles de servicio conocidos como: SPS (Standard Positioning Service), disponible a nivel mundial de manera gratuita y PPS (Pulse Per Second) exclusivo para uso militar.
- **GLONASS:** Conformado por 31 satélites, de los cuales 24 se encuentran en activo, 3 satélites son para repuesto, 2 se encuentran en mantenimiento, 1 en servicio y 1 en pruebas. Se ubican en tres planos orbitales inclinados aproximadamente 65° respecto al Ecuador, en Tierra cuenta con una estación maestra ubicada en Moscú, además de contar con una red de estaciones de seguimiento, control, telemetría y posicionamiento, situadas en San Petersburgo, Schelkovo, Yenisseysk, Komsomolsk-Amur y Moscú.
- **GALILEO:** Cuando el proyecto finalice contará con 30 satélites, situados a una altura de 23 222 km, con una inclinación de 56° sobre el Ecuador, de los cuales 3 serán de repuesto, tardando 14 horas en completar una órbita a la Tierra. Actualmente cuenta con 27 satélites en órbita, y dos estaciones maestras en tierra, las cuales se encargan del control de los satélites. Debido a que GALILEO es considerado el primer sistema de navegación de nueva generación, uno de los factores a considerar, es que dependiendo de la señal de navegación será el servicio que prestará.
- **BeiDou:** Actualmente cuenta con 14 satélites en órbita, siendo un sistema operativo, pero aun en desarrollo, pretendiendo culminar su obra en 2020 con un total de 49 satélites en órbita.
- **IRNSS:** Se compone de 7 satélites distribuidos en dos planos orbitales, los cuales brindan datos de uso civil y de uso exclusivo para la milicia.
- **QZSS:** Es un sistema compuesto por 4 satélites, el cual brinda servicio para la región de Asia y Oceanía, pretendiendo contar en 2023 con 7 satélites.

2.2. Sistemas de coordenadas

En las matemáticas se trabaja con espacios abstractos, los cuales representan al espacio físico mediante el análisis numérico. Dentro de estos espacios encontramos algunos elementos como el marco de referencia, el cual desempeña una función esencial cuando de conocer la ubicación de un objeto se trata. El marco de referencia permite ligar el objeto en estudio a otro objeto o punto definido previamente, al cual se le denomina origen.

La propiedad más significativa de cualquier sistema de coordenadas, es el número de dimensiones que posee, refiriéndonos al número de coordenadas necesarias para poder describir la posición de puntos propios a su espacio.

Un sistema de referencia sirve para conocer la ubicación de un objeto en el espacio referido a un origen; situación que se mantiene cuando se trabaja con satélites, debido a que ocupan una posición en el espacio. Los satélites se encuentran en constante movimiento, por lo cual es necesario definir un sistema de referencia que cumpla con las mismas características, surgiendo la necesidad de trabajar con sistemas de referencia dinámicos, es decir, ligados a un objeto que se encuentre en constante movimiento, como lo es el centro de la Tierra, o algún punto sobre la superficie terrestre.

Algunos autores como Furones (2010), mencionan que para poder trabajar con los datos de los satélites es necesario definir previamente, un marco de referencia, un sistema de coordenadas, y un sistema de referencia, los cuales de acuerdo a su definición se entienden como:

- Sistema de referencia: es una triplete de ejes coordenados en diferentes direcciones en el espacio, los cuales comparten un punto denominado origen.
- Marco de referencia: es un conjunto de puntos (lugares localizados en la superficie terrestre) con coordenadas y velocidades conocidas en un sistema de referencia.
- Sistema de coordenadas: es la parametrización de las coordenadas de los puntos que forman el marco de referencia. En este sentido existen infinitos sistemas de coordenadas para parametrizar el marco de referencia.

En el campo de la ingeniería, cuando se habla de un sistema de coordenadas, es común referirse al sistema de coordenadas cartesianas, el cual está conformado por ejes coordenados ortonormales que se cruzan en un mismo punto denominado origen. Sin embargo siempre es necesario especificar el

sistema de coordenadas, puesto que existe una infinidad de sistemas de coordenadas y cada uno tiene características particulares.

En el caso particular de la geodesia, que es el estudio que nos ocupa en el presente trabajo, son necesarios dos tipos de sistemas de referencia (Sistema de referencia terrestre y sistema de referencia celeste), de los cuales se desprenden diversos sistemas de coordenadas (Fig. 2.2):

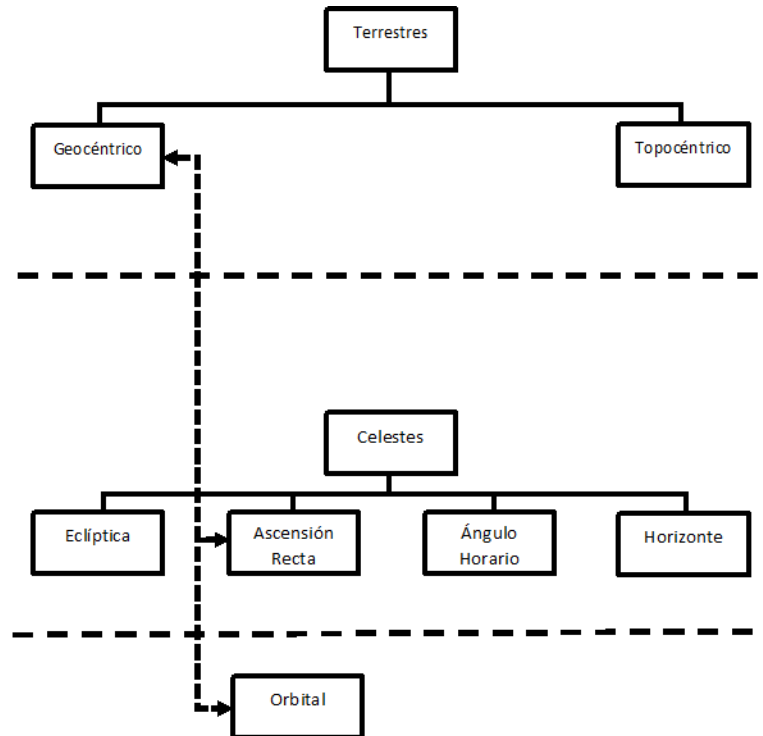


Figura 2.2: Sistemas de referencia y sistemas de coordenadas, modificado de Krakiwsky *et al.* (1971)

De acuerdo a Krakiwsky *et al.* (1971), los movimientos de rotación y de traslación de la Tierra, sumados al movimiento orbital de los satélites (naturales y artificiales), son elementos fundamentales para la definición de sistemas de coordenadas y sistemas de tiempo.

2.2.1. Sistemas de referencia terrestres

Estos sistemas se encuentran fijos a la Tierra y se utilizan para conocer la ubicación de puntos sobre la superficie terrestre o en sus proximidades. Apoyándose en coordenadas, estos sistemas al igual que la Tierra, se encuentran en continuo movimiento, de tal manera que las coordenadas de un punto, serán siempre las mismas. Existen dos tipos de sistemas terrestres llamados sistema de

coordenadas geocéntrico y sistema de coordenadas topocéntrico. Krakiwsky *et al.* (1971), menciona algunos conceptos que sirven de base para el análisis de los sistemas de coordenadas, explicando que la orientación de los ejes de los sistemas de coordenadas se pueden describir en términos del polo primario y secundario, así como del plano primario y secundario, y del eje primario, secundario y terciario Fig(2.3).

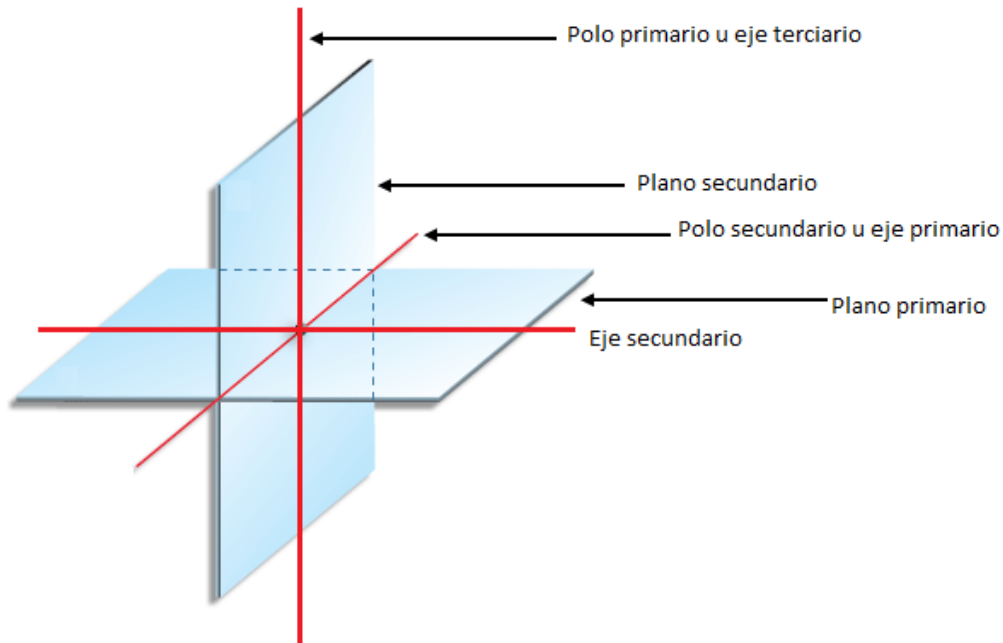


Figura 2.3: Esquema de los diferentes polos y planos de apoyo, tomada y modificada de <https://doutormatematico.blogspot.mx/2017/03/geometria-espacial-de-posicao.html>

Definiendo al polo primario como el eje de simetría de los sistemas de coordenadas, por ejemplo el eje de rotación de la Tierra. Al plano primario como el plano perpendicular al polo primario, por ejemplo el plano ecuatorial de la Tierra. El plano secundario como el plano perpendicular al plano primario además de contener al polo primario. El polo secundario es la intersección del plano primario y el plano secundario. El eje primario es el polo secundario. El eje terciario es el polo primario. El eje secundario es perpendicular a los otros dos ejes, el cual se puede elegir en función de la orientación del sistema, es decir, si es un sistema de mano derecha, o un sistema de mano izquierda.

De acuerdo a Krakiwsky *et al.* (1971), algunas de las características de los sistemas de referencia geocéntricos son:

- El origen es cercano al centro de la Tierra y se puede definir como el centro de masa terrestre o

geocentro, el cual se obtiene considerando a la atmósfera y a los océanos.

- El polo primario se alinea con el eje de rotación de la Tierra, y el plano primario es perpendicular a este polo, siendo el plano ecuatorial.
- El eje primario es la intersección entre el plano ecuatorial y el plano que contiene al Meridiano de Greenwich, además de estar contenido en el plano del Ecuador. Internacionalmente se conoce como el meridiano origen o el meridiano cero desde 1884.
- El eje secundario esta contenido en el plano del Ecuador dando como resultado que su sentido será de tal manera que se forme un sistema de mano derecha.

Por otra parte, de acuerdo a Krakiwsky *et al.* (1971) algunas de las características de los sistemas de referencia topocéntricos son:

- El origen es un punto cercano a la superficie de la Tierra.
- El plano primario es el plano tangencial a un punto de la superficie de la Tierra.
- El eje primario contiene al polo norte, es decir la intersección entre el plano tangencial y el plano que contiene al eje de rotación de la Tierra.
- Es un sistema de mano izquierda.

Con lo anteriormente mencionado se puede entender que cualquier punto sobre la superficie terrestre, se define por coordenadas, las cuales pueden ser del tipo cartesianas, es decir, coordenadas (X,Y,Z) o coordenadas esféricas, es decir (r,φ,λ) , en donde r es la distancia radial al geocentro, φ la latitud geocéntrica (ángulo entre el punto y el plano del Ecuador) y λ la longitud geocéntrica (ángulo entre el plano meridiano de Greenwich y el del punto de cálculo, medido sobre el plano del Ecuador).

2.2.2. Sistemas de referencia celestes

Si se emplearan los sistemas de referencia terrestres para la obtención de coordenadas de un objeto fijo en el espacio, variarían constantemente debido a la rotación y traslación terrestre. Por ello para definir la situación de las estrellas que, aunque no son cuerpos estáticos, se pueden considerar como objetos fijos debido a la lejanía, es necesario emplear sistemas que puedan cubrir las deficiencias que presentan los sistemas terrestres.

Un elemento de suma importancia para el planteamiento de estos sistemas, es la esfera celeste, la cual es una esfera imaginaria de radio arbitrario, con centro en un punto cualquiera del espacio, pero de tal

manera que en su superficie, los astros se dispongan tal como se ven en el cielo. Es necesario aclarar que a pesar de que el centro de ésta resulta arbitrario, se consideran tres tipos de esfera de acuerdo a su centro:

- Esfera Topocéntrica, la cual se centra en un punto de la superficie terrestre.
- Esfera Geocéntrica, en la cual su centro coincide con el centro de la esfera terrestre.
- Esfera Heliocéntrica, la cual se hace coincidir con el centro del sol.

La esfera celeste, tiene como función principal, ser el apoyo para determinar la posición de un astro mediante dos ángulos, conformándose por diversos elementos:

- El eje de rotación; el cual intersecta a la esfera celeste en dos puntos que se denominan polos, teniendo:
 - El Polo Boreal, también llamado polo celeste norte, desde el cual un observador que se encuentra fuera de la esfera celeste y o participa en la rotación, la observa en un sentido horario.
 - El polo austral, o Polo Celeste Sur en el cual si se observa en iguales condiciones que el anterior se observa una rotación en sentido antihorario.
- Los meridianos celestes, círculos horarios o círculos de declinación,; son círculos máximos que contienen al eje de rotación. Perpendicular a estos existe un plano que pasa por el centro de la esfera celeste, el cual se llama plano ecuatorial celeste, y al corte generado con la esfera celeste se le llama Ecuador Celeste.
- La vertical del lugar es la dirección del vector de gravedad en un punto dado y corta a la esfera celeste en dos puntos llamados zenit y nadir. La dirección del vector de gravedad se determina por la dirección de la línea de la plomada, los círculos máximos que pasan por el zenit y el nadir se llaman círculos verticales. Por el centro de la esfera pasa un plano perpendicular a la vertical del lugar, el cual se llama plano de horizonte matemático o verdadero, paralelos a este, existen círculos menores llamados almicantarats.

De acuerdo a Krakiwsky *et al.* (1971), son cuatro los sistemas que se consideran celestes:

- **Sistema de coordenadas horizontal**, se define por los siguientes elementos:
 - Origen de tipo heliocéntrico.
 - El polo primario (eje z) es el zenit del observador (la vertical del lugar).
 - El plano primario es el horizonte del observador.

- El eje primario (eje x) es el punto norte.
 - El eje “y” se elige de manera que sea un sistema de mano izquierda.
 - Las coordenadas de este sistema son; el acimut astronómico (a), definido como el arco medido en el sentido horario sobre el horizonte astronómico, desde el punto sur hasta la vertical del astro. Este ángulo puede tomar valores de 0° a 360° y la altura (h), la cual se define como el ángulo que forma el vector del astro con el horizonte matemático, es decir, es el arco medido sobre la vertical del astro, desde el horizonte matemático hasta el almicerat del astro. Puede tomar valores de 0° a 90° , en sentido positivo hacia el Norte y en sentido negativo hacia el Sur. El ángulo complementario es la distancia cenital (z), la cual se define como el ángulo que forma el vector del astro con el eje z, en sentido horario, tomando valores de 0° a 180° .
- **Sistema de coordenadas ecuatoriales horarias**, de acuerdo a Krakiwsky *et al.* (1971), las principales características de este sistema son:
- Origen de tipo heliocéntrico.
 - El plano primario es el plano ecuatorial.
 - El plano secundario es el plano del meridiano celeste del observador.
 - El eje “y” se elige de tal forma que sea un sistema de mano izquierda.
 - Las coordenadas de este sistema son, ángulo horario (H), el cual es el arco sobre el Ecuador celeste que se mide desde el meridiano del lugar hasta el meridiano celeste del astro, en sentido horario. Esta magnitud se puede expresar en grados u horas, teniendo el rango de 0° a 360° , o de 0^h a 24^h , respectivamente y declinación (δ), siendo el arco medido sobre el meridiano celeste del astro, a partir del Ecuador celeste hasta el paralelo celeste del astro, en sentido directo. Esta medición puede tomar valores de 0° a 90° de manera positiva para el hemisferio Norte y de manera negativa para el hemisferio austral.
- **Sistema de coordenadas ecuatoriales absolutas o de Ascensión recta**, de acuerdo a Krakiwsky *et al.* (1971) las principales características de este sistema son:
- Origen de tipo heliocéntrico.
 - El plano primario es el plano del Ecuador y el polo primario (eje z) es el polo norte celeste.
 - El eje primario (eje x) es el equinoccio vernal.
 - El eje “y” se elige de tal manera que sea un sistema de mano derecha.

- Las coordenadas son; ascensión recta (α), siendo un arco de Ecuador celeste medido desde el punto Aries hasta el meridiano celeste que contiene al astro, en sentido antihorario. Se expresa en horas minutos y segundos, teniendo como rango de 0^h a 24^h y la declinación (δ), siendo un ángulo medido a partir de la intersección del arco del meridiano del astro con el Ecuador celeste, hasta el mismo astro. Su valor está dado en grados, minutos y segundos y puede tomar valores de 0° a 90° . Es positiva en el caso de las estrellas del hemisferio boreal y negativa para las del hemisferio austral.
- **Sistema de coordenadas eclípticas**, debido a la variación que experimenta el polo en el espacio, es necesario definir un sistema de coordenadas basado en el Sol como punto de referencia, teniendo las siguientes características, (Krakiwsky *et al.*, 1971):
 - Origen de tipo heliocéntrico.
 - El plano primario es el plano eclíptico (el plano de la órbita de la Tierra) y el polo primario (eje z) es el polo norte eclíptico.
 - El eje primario (eje x) es el equinoccio vernal.
 - El eje “y” se elige de tal manera que el sistema sea de mano derecha.
 - Las coordenadas son longitud eclíptica o celeste (λ), siendo el arco medido sobre la eclíptica desde el punto aries (Υ) hasta el meridiano del astro, en sentido directo. Se suele expresar en magnitud angular y va de 0° a 360° y la latitud eclíptica o celeste (β), la cual es el arco medido sobre el meridiano del astro, a partir del plano de la eclíptica hasta el paralelo, puede tomar valores de 0° a 90° con signo positivo hacia el norte y con signo negativo hacia el sur.

2.3. Sistemas de tiempo

A lo largo de la historia de la humanidad ha existido la necesidad de cuantificar el entorno que nos rodea, así como asignarle unidades que faciliten su entendimiento, a pesar de existir elementos de difícil comprensión, como lo es el tiempo. En 1543 Copernico demostró que la sucesión de los días y las noches era gracias a la rotación de la Tierra sobre su propio eje, además de éste, los movimientos de la luna y el resto de movimientos de la Tierra, son los que definen las unidades básicas de tiempo; el día, el mes y el año. Actualmente la unidad básica de medición del tiempo es el segundo, el cual es definido por relojes atómicos con muy alta precisión (Ballesteros Paredes, 2007).

En áreas como la astronomía y la astrofísica se utilizan diferentes definiciones de tiempo, debido a que resultan ser más útiles en la observación de fenómenos celestes, que el tiempo civil. De acuerdo a Sanchez Moreno (2016), el tiempo se puede clasificar de la siguiente manera:

- Tiempo Rotacional.
 - Tiempo Solar.
 - Tiempo solar verdadero: Un día solar se define como un intervalo de tiempo entre dos pasos sucesivos del sol verdadero por el mismo meridiano.
 - Tiempo solar medio: Se determina por dos pasos sucesivos del sol medio (astro ficticio) por el mismo meridiano. Este astro, en lugar de recorrer una órbita circular o uniforme, recorre una órbita elíptica, generando una pequeña variación con respecto al día solar verdadero. Si se pretende tener días solares medios uniformes, es decir que la duración de los días sea la misma, sin importar la época del año, se resuelve planteando la velocidad de la Tierra alrededor del sol como una constante.
 - Tiempo civil: Se define como el tiempo solar medio aumentado en 12 horas, es decir que tiene su inicio en la medianoche (00 horas).
 - Tiempo Universal: Parte de la unificación de criterios sobre el establecimiento de la hora en los distintos puntos de la Tierra, se basa en la introducción de husos horarios, donde cada uno abarca 15° , además de considerar al tiempo civil de Greenwich como el origen, cuya longitud geográfica es cero. Por lo tanto para obtener el tiempo universal, se suman el tiempo civil y la longitud del lugar, donde esta última se multiplica por $\frac{1}{15}$.
 - Tiempo Universal Coordinado: Parte del Tiempo Universal, y es el sucesor del Greenwich Mean Time, teniendo como característica dominante, que se basa en estándares atómicos, mientras que el Tiempo Universal se basaba en estándares celestes.
 - Tiempo Sidéreo
 - Tiempo Sidéreo Medio: Se define como el intervalo de tiempo, entre dos pasajes sucesivos del equinoccio vernal aparente por un meridiano local.
 - Tiempo Sidéreo Verdadero: Se define como el intervalo de tiempo, entre dos pasajes sucesivos del equinoccio vernal verdadero por el mismo meridiano.
- Tiempo dinámico: El cual es un sistema derivado del movimiento de los planetas en el sistema solar. El Tiempo Terrestre Dinámico (TDT), es llamado formalmente como tiempo de las

efemérides, con el cual se puede describir el movimiento de los satélites alrededor de la Tierra, basándose en el movimiento de traslación de la Tierra alrededor del sol, a diferencia del tiempo sidéreo que se basa en el movimiento de rotación terrestre.

- **Tiempo Físico:** En la práctica, el tiempo de efemérides es de difícil determinación y sólo se conoce con precisión al cabo de años de observaciones de los movimientos del Sol y de la Luna. Debido a esto, suele sustituirse por el tiempo atómico, el cual es un tiempo uniforme suministrado por los relojes atómicos, ajustados de modo que el segundo atómico coincida con el segundo de efemérides.

2.4. Señal GPS

Una señal de GPS contiene tres tipos de información, un código pseudoaleatorio, datos de efemérides y datos de almanaque. El código pseudoaleatorio es simplemente un código de identidad que identifica cual satélite esta transmitiendo la información y ésta identificación se puede observar en el receptor de GPS. Los datos de almanaque son transmitidos constantemente por cada satélite y contienen información sobre el estado del satélite (sin importar si el estado es saludable o no), la fecha y tiempo actuales, esta parte de la señal es esencial para el cálculo de la posición. Los datos de efemérides le informan al receptor GPS la ubicación de los satélites en cualquier instante del día.

Los satélites transmiten una señal en el espectro disperso de microondas de radio en la banda L. Las microondas son ondas electromagnéticas definidas en un rango de frecuencias, generalmente entre 300 MHz y 300 GHz, con longitudes de onda que van desde 1 mm a 1 m. Según los estándares del IEEE (Institute of Electrical and Electronic Engineers) lo sitúa en el rango de frecuencias entre 1 GHz y 300 GHz y con longitudes de onda entre 1 mm y 30 cm. La Banda L es un rango de radiofrecuencia de las Microondas IEEE 802.16, ¹ que usa las frecuencias de 1.5 a 2.7 GHz. Emitiendo en tres frecuencias diferentes y derivadas de una frecuencia fundamental de 10.23 MHz conocidas como Link1 (L1) de frecuencia 1575.42 MHz (1.575 GHz), con longitud de onda de 19.05 cm, Link2 (L2), con una frecuencia de 1227.6 MHz (1.227 GHz) con longitud de onda de 24.45 cm y una señal Link5 (L5), con una frecuencia de 1176.45 Mhz con longitud de onda de 23.43 cm, la cual emite los códigos I5 y Q5.

El sistema GPS utiliza 2 tipos de código, uno de ellos denominado C/A (Coarse /Adquisition) o de código abierto, el cual se utiliza para la adquisición de datos de posición y para la navegación con una precisión baja; el otro se conoce como código P y se utiliza para la navegación de alta precisión

¹Serie de estándares inalámbricos de banda ancha publicados por el IEEE

y su uso es reservado para la milicia.

Cada satélite transmite señales en ambas frecuencias siendo estas una combinación de tres componentes: onda portadora, códigos de distancia y el mensaje de navegación. Los códigos y mensajes (Fig. 2.4) son modulados en estas frecuencias portadoras, llamadas secuencias de ruido pseudo-aleatorio o PRN (por sus siglas en inglés de pseudorandom-noise). Las ondas portadoras están diseñadas para llevar códigos binarios en un proceso conocido como modulación.

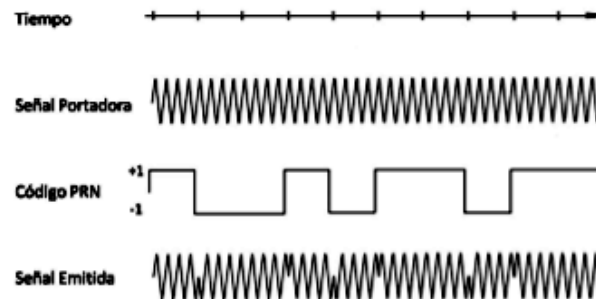


Figura 2.4: Estructura de una señal GPS, tomada de Šverko Navarrete (2012).

De acuerdo a Šverko Navarrete (2012), existen tres tipos de código binario de números pseudoaleatorios o PRN, con los cuales se modulan las señales portadoras L1 y L2.

- El código C/A (Coarse Acquisition) se encarga de modular la señal portadora L1. Se transmite usando la frecuencia fundamental por 10 teniendo una frecuencia de 1023 MHz y es referida como L1 C/A. Al ser un código pseudo-aleatorio y diferente para cada vehículo espacial, se puede utilizar como una forma de identificación de los satélites GPS con un número PRN.
- El código P, el cual provee una precisión en la medición del retraso en el tiempo de propagación de la señal, se encarga de modular las señales L1, L2 y L5 a la frecuencia fundamental de 10.23 MHz. Este código al ser de uso militar resulta más complejo que el código C/A, y por lo tanto resulta más difícil la captación o adquisición del mismo por los receptores comunes. Para aumentar la seguridad de la información contenida en éste, es encriptada en un código Y, por lo cual el código P(Y), sólo lo puede manejar personal autorizado.
- El mensaje de navegación se encuentra en una señal de baja frecuencia que se transmite a 50 Hz y se encarga de modular las dos ondas portadoras L1 y L2. Contiene las efemérides (Parámetros orbitales del satélite), información del tiempo (horario) y estado del reloj del satélite, así como el modelo para corregir los errores producidos por la propagación en la ionósfera y la tropósfera.

2. PRINCIPIOS DEL GNSS

El proceso de modulación se refiere a la superposición de los códigos sobre la onda portadora y, debido a que se trata de código binario, solo pueden tener dos valores, entendiendo que cada vez que el valor cambia, se ve reflejado en la fase portadora.

Observables GPS

Cuando se pretende determinar la posición de un punto mediante GPS, se utilizan los observables GPS. El observable básico del GNSS es el tiempo que tarda en viajar la señal desde el centro de fase de la antena del satélite (instante de emisión) hasta el centro de fase de antena del receptor (instante de recepción), a partir del cual se puede efectuar la medición de la distancia entre el satélite y receptor, basándose en la propagación de la señal y el efecto Doppler (Valero *et al.*, 2013).

- Medidas de tiempo.
- Diferencias de fase.

De acuerdo a Valero *et al.* (2013) existen tres grupos de observables GPS:

- Observables del tiempo, los cuales permiten obtener las pseudodistancias a partir del código, teniendo a su vez:
 - Código C/A modulado sobre la portadora L1.
 - Código P modulado sobre la portadora L1.
 - Código P modulado sobre la portadora L2.
- Observables de diferencia de fase, que tienen:
 - Diferencia de fase de la portadora L1.
 - Diferencia de fase sobre la portadora L2.
- Observables Doppler, teniendo:
 - Desplazamiento Doppler de la portadora L1.
 - Desplazamiento Doppler de la portadora L2.

3.1. Pseudodistancia

La pseudodistancia o pseudorange es la medida de la distancia entre el satélite y el receptor en la época de transmisión y recepción de las señales, calculada a partir de la diferencia de tiempos en los relojes del satélite y el receptor multiplicado por la velocidad de la luz (Berrocoso Domínguez, 2016). Esquema mostrado en la figura (3.1).

La señal que se envía es una secuencia aleatoria. Cada parte es diferente de cualquier otra, por lo cual es llamado código pseudo-aleatorio. Todos los receptores GPS conocen esta secuencia y la repiten internamente, por lo tanto, los satélites y los receptores deben estar sincronizados. El receptor recibe la transmisión del satélite y compara la señal de entrada con la señal interna del receptor. Al comparar ambas señales, se encuentra la diferencia que presenta la señal del satélite, con lo cual se determina el tiempo de transmisión.

Es necesario considerar que la pseudodistancia es diferente de la distancia geométrica entre el satélite y el receptor. Esto es debido a que el pseudorange incluye errores, causados por los relojes del satélite y del receptor, así como la influencia que tiene el medio de transmisión de la señal; en este caso la tropósfera y la ionósfera.

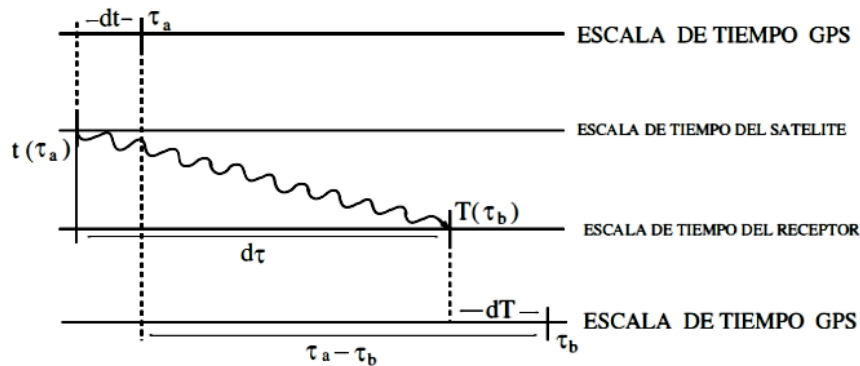


Figura 3.1: Pseudodistancias, tomada de Berrocoso Domínguez (2016).

Donde:

- $t(\tau_a)$: Es el instante de emisión de la señal.
- τ_a : Es el mismo instante, pero en la escala de tiempo GPS.
- τ_b : Es el tiempo GPS en el que es recibida la señal.
- $T(\tau_b)$: Es el instante de recepción.

- dt : Retardo del oscilador del satélite.
 dT : Retardo del oscilador del receptor.

Si la señal del GPS viaja en el vacío, la señal se encontraría libre de errores y de retrasos, por lo tanto, la pseudodistancia medida sería igual a la distancia geométrica entre el satélite y el receptor, es decir, dicha distancia quedaría definida como:

$$d = \sqrt{(x_s - x_r)^2 + (y_s - y_r)^2 + (z_s - z_r)^2} \quad (3.1)$$

Donde:

- x_s : Coordenada x del satélite.
 x_r : Coordenada x del receptor.
 y_s : Coordenada y del satélite.
 y_r : Coordenada y del receptor.
 z_s : Coordenada z del satélite.
 z_r : Coordenada z del receptor.

Considerando los retrasos de tiempo tanto del receptor como del satélite, se tiene:

$$\tau_a = t(\tau_a) + dt \quad (3.2)$$

$$\tau_b = T(\tau_b) + dT \quad (3.3)$$

$$d\tau = T(\tau_b) - t(\tau_a) \quad (3.4)$$

Sustituyendo (3.2) y (3.3) en (3.4), se tiene

$$d\tau = \tau_b - \tau_a + dt - dT \quad (3.5)$$

Al multiplicar (3.5) por la velocidad de la luz, nos queda:

$$cd\tau = c(\tau_b - \tau_a) + c(dt - dT) \quad (3.6)$$

En donde dt y dT , corresponden a los errores de los reloj del satélite y del receptor respectivamente.

El término dT se puede conocer mediante la determinación de la órbita del satélite GPS. El primer término de la ecuación (3.6) corresponde a la distancia geométrica, como se definió en la ecuación (3.1). El tiempo de transmisión de una señal GPS, que viaja desde el satélite hasta la antena del receptor, es de aproximadamente 0.07 s, incluyendo los retardos debidos a la propagación y al desfase del reloj.

Para efectuar el cálculo de la distancia real, es decir considerando errores presentes a lo largo del trayecto de la señal, se deben agregar correcciones por efectos ionosféricos, troposféricos, de marea terrestre, de trayectoria múltiple, así como efectos debidos a la rotación terrestre. Expresando de manera completa, la ecuación de pseudodistancia se podría definir de la siguiente forma:

$$R_b^a = d_b^a(\tau_b, \tau_a) - c(dt - dT) + d_{ion} + d_{trop} + d_{marea} + d_{mult} + d_{rel} + \varepsilon \quad (3.7)$$

Donde:

- $d_b^a(\tau_b, \tau_a)$: Distancia geométrica.
- dT : Diferencia en marcha del reloj del receptor.
- dt : Diferencia en marcha del reloj del satélite.
- c : Velocidad de la luz.
- d_{ion} : Corrección por refracción debido al cruce de la señal por la ionósfera.
- d_{trop} : Corrección por refracción debido al cruce de la señal por la tropósfera.
- d_{mult} : Corrección por ambigüedades debido al efecto multitrayecto.
- d_{rel} : Adiciones por efectos relativistas.
- ε : Efectos que afectan a la señal, pero no resultan ser significativos.

Para un análisis más detallado de las afectaciones que sufre la señal GPS, se puede revisar el capítulo (4).

3.2. Fase de la portadora

Cuando uno se refiere a la medición de la fase portadora, hace hincapié en el cambio de fase que ocurre como resultado del viaje de la señal GPS. De acuerdo a Šverko Navarrete (2012) este observable es una medida que representa la diferencia en fase entre la onda portadora transmitida desde el satélite

y la señal del oscilador del receptor en una época en particular, de tal manera que la medición se realiza desplazando la fase generada por el receptor para rastrear la fase recibida (Fig. 3.2). Para que la fase de una onda tenga sentido debe de estar relacionada con otra onda en la misma frecuencia. Es decir, la fase que emite el satélite y la que genera el receptor deben de tener la misma frecuencia.

Cuando la señal llega a la antena la onda portadora ha recorrido una distancia D , la cual corresponde a un cierto número entero de ciclos, $Int(\phi, t_0, t)$, contados desde que se recibe la señal t_0 , hasta el instante t , más una cierta parte fraccional, $Fr(\phi)$, referida al instante de adquisición de la señal y un número entero de ciclos, $N(t_0)$, correspondientes al intervalo de tiempo transcurrido desde que la señal fue emitida hasta que el receptor la adquirió. Este número de ciclos desconocido, denominado ambigüedad inicial, es particular de cada satélite y de cada receptor.

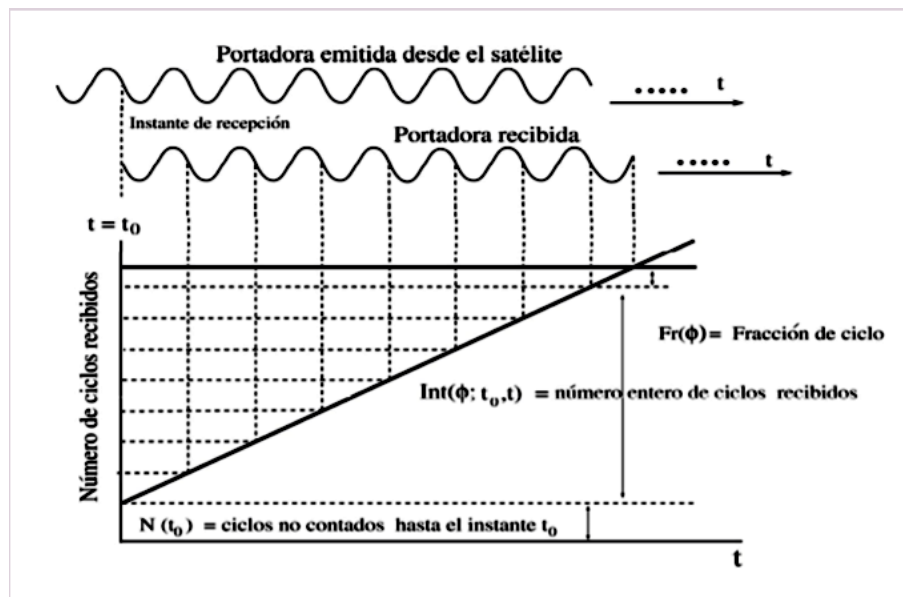


Figura 3.2: Fase de la portadora, obtenida de Berrocoso Domínguez (2016).

Un modelo general que representa la fase medida, cuando el medio de propagación es el vacío, es decir que no se toman en cuenta errores que se pueden presentar en la propagación, se puede representar como:

$$\phi_{total} = \phi_r(t_0) - \phi_s(t_0) + N(t_0) \quad (3.8)$$

Lo cual se puede expresar también como:

$$\phi_{total} = Fr(\phi) + Int(\phi, t_0, t) + N(t_0) \quad (3.9)$$

Además, si se consideran elementos como: la distancia geométrica, el tiempo de transmisión, y considerando también que la propagación se realiza en la atmósfera terrestre, se adicionan otros elementos que afectan la trayectoria, así, la fase observada en un receptor que recibe la señal de un satélite puede modelarse, teniendo en cuenta la ecuación (3.9), como:

$$\Phi = d + c(dt - dT) + N\lambda - d_{ion} + d_{trop} + d_{mult} + d_{marea} + d_{rel} + \varepsilon \quad (3.10)$$

Donde:

- d : Distancia geométrica entre el satélite y el receptor.
- dt : Error del reloj del receptor.
- dT : Error del reloj del satélite.
- c : Velocidad de la luz.
- d_{ion} : Corrección debida al retraso ionosférico.
- d_{trop} : Corrección debida al retraso troposférico.
- d_{mult} : Corrección debida al efecto multitrayecto.
- $N\lambda$: Corrección por ambigüedad.
- d_{marea} : Corrección por mareas.
- d_{rel} : Efectos relativistas.
- ε : Otros errores presentes en la observación.

De acuerdo a Šverko Navarrete (2012), quien menciona a Fernández *et al.* (2010), la ecuación (3.10) representa la distancia que separa un satélite de un receptor en Tierra; para un lugar dado se acumulan tantas ecuaciones como satélites en el rango de visión se tengan en el momento de la observación. Los datos se registran cada 30 segundos y se acumulan en archivos diarios, los cuales se someten a un proceso de análisis previo a publicar un valor aceptable.

Fuentes de error

En una observación con tecnología GPS, existen diversos errores (ver tabla 4.1), los cuales inician con la emisión de la señal mediante los satélites, continuando a lo largo de la trayectoria que sigue la señal concluyendo en el receptor en Tierra. Esto afecta la calidad de la observación, y por ende teniendo una precisión menor a la deseada.

Clasificación de los errores	Fuente de error
Relativos al satélite	Errores orbitales
	Sincronización de los relojes
	Efemérides GPS
Relativos a la propagación de la señal	Retraso ionosférico
	Retraso Troposférico
	Disponibilidad selectiva
	Efecto Multitrayecto
Relativos al receptor	Ruido en la medición del receptor
	Variación del centro de fase de la antena GPS
	Dilución de la precisión.

Tabla 4.1: Tabla de errores relacionados con el GNSS.

4.1. Errores relativos al satélite

Iniciando por los errores causados por los satélites, se tiene:

4.1.1. Sincronización de los relojes

Los satélites cuentan con relojes atómicos con oscilador de cesio o de rubidio. A pesar de su alta precisión (aproximadamente 3 nanosegundos), en algunas ocasiones presentan una pequeña variación en la velocidad de marcha debido al desfase que tiene el reloj del satélite respecto al tiempo GPS, produciendo errores, que se ven reflejados en la precisión o confiabilidad de los datos obtenidos.

De acuerdo a Valero *et al.* (2013) estos errores se pueden expresar de la siguiente manera:

$$dt_s = dt + dt_r \quad (4.1)$$

Donde:

- dt : Es el offset del reloj, el cual se refiere a que no existe una sincronización con el tiempo atómico definido por la estación de control maestra, tanto en el reloj del receptor como en el reloj del satélite.
- dt_r : Es el error relativista, el cual causa que el reloj del receptor y el del satélite tengan variación en la oscilación debido a que los campos gravitacionales que los afectan son diferentes.

Lo que ocurre generalmente, es un adelanto del reloj debido a que el satélite se encuentra en un campo gravitatorio más débil, es por esto que los relojes se diseñan de tal manera que estando en Tierra se atrasen, para que cuando se pongan en órbita funcionen adecuadamente. Se logra ajustarlos pero no por completo, ya que se tiene una deriva de 1 nanosegundo cada tres horas, la cual se puede modelar de la siguiente manera (Valero *et al.*, 2013):

$$dT = a_0 + a_1(t - t_0) + a_2(t - t_0)^2 \quad (4.2)$$

Donde:

- t : Es la hora del reloj de satélite (segundos en la semana GPS).
- t_0 : También conocido como TOE, es el instante de referencia o momento de cálculo de coordenadas, es decir, es la época de referencia para los coeficientes (segundos en la semana GPS).
- a_0 : Sesgo del reloj.
- a_1 : Deriva del reloj.
- a_2 : Evolución de la deriva del reloj.

Los errores en los osciladores de los satélites pueden eliminarse utilizando las correcciones enviadas en el mensaje de navegación que recibe cada receptor, las cuales son calculadas y enviadas de regreso al satélite por las estaciones de seguimiento. Esto se hace corrigiendo la deriva con más de 10 relojes atómicos de alta precisión en tierra.

4.1.2. Errores orbitales

Las efemérides transmitidas por los satélites tienen un error asociado debido a la variación de la órbita, causando que sea imposible calcular la posición exacta de los satélites.

Los satélites se pueden desviar de las órbitas por diferentes motivos, siendo los más habituales:

- Variación del campo gravitatorio.
- Variaciones en la presión de radiación solar.
- Fricción del satélite con moléculas libres.

Considerando estas fuentes de error, se han diseñado algoritmos basados en datos empíricos, los cuales se transmiten en el mensaje de navegación, con la finalidad de mitigar los errores (Sánchez Sobrino, 2009).

Las leyes de Kepler sobre la rotación de un cuerpo en una órbita, son la base del funcionamiento de los satélites GPS, y estas se plantearon idealizando un campo gravitatorio esférico uniforme. Por tal motivo cualquier satélite que se encuentre alrededor de la Tierra no representa un caso ideal, viendo afectada la posición kepleriana debido a las variaciones en la fuerza gravitatoria. Estas fuerzas se deben a la forma de la Tierra, que no es una esfera perfecta, y no tiene una distribución de masas

homogénea y a la fuerza de atracción que ejercen sobre el satélite diversos cuerpos celestes como planetas y principalmente el Sol y la Luna, debido a su proximidad.

Otro efecto considerable es el ocasionado por el medio en el cual viaja el satélite, ya que al no ser un medio perfecto “vacío”, los satélites experimentan fricciones atmosféricas, las cuales varían en función de la densidad atmosférica y la altura a la cual se encuentran. Así como el impacto de los fotones de luz emitidos por el sol de forma directa e indirecta (efecto albedo), es decir que la presión de radiación solar, es una función del área normal expuesta a la radiación solar, la superficie de reflectividad, la luminosidad del Sol y la distancia al Sol (Sánchez Sobrino, 2009). Para el caso de los satélites GPS ésta es una de las fuentes más difíciles de modelar, lo cual la convierte en la principal fuente de error para el cálculo de la órbita del satélite en tiempo real. Todas las fuerzas perturbadoras de empuje que actúan sobre el satélite son cuantificadas en términos de sus aceleraciones. La corrección de estos parámetros perturbadores de órbita se encuentra en el mensaje de navegación (Tabla 4.2).

Parámetro	Descripción
Δn	Diferencia del movimiento medio.
Ω'	Razón del cambio en la ascensión recta.
Γ	Razón del cambio en el ángulo de inclinación.
C_{rs}	Amplitud de la corrección armónica senoidal del radio orbital.
C_{rc}	Amplitud de la corrección armónica cosenoidal del radio orbital.
C_{us}	Amplitud de la corrección armónica senoidal del argumento de la latitud.
C_{uc}	Amplitud de la corrección armónica cosenoidal del argumento de la latitud.
C_{is}	Amplitud de la corrección armónica senoidal del ángulo de inclinación.
C_{ic}	Amplitud de la corrección armónica cosenoidal del ángulo de inclinación.

Tabla 4.2: Datos de corrección de órbita en el mensaje de navegación, tomada de Valero *et al.* (2013).

4.1.3. Efemérides del GPS

La posición orbital de los satélites puede variar con el tiempo. A estas variaciones se les conoce como errores de efemérides y se soluciona monitoreando constantemente cada satélite para posteriormente transmitir las correcciones a los satélites desde la estación maestra del segmento control. Pese al esfuerzo que se realiza en el segmento control, pueden permanecer algunos errores relacionados con los relojes, los cuales al sumarse con los errores de efemérides, pueden arrojar una variación de

aproximadamente 1 metro al momento de calcular la posición. Para corregir estos errores existen varios algoritmos basados en datos experimentales, cuyos coeficientes se transmiten a través del mensaje de navegación para que el receptor pueda utilizarlos.

4.2. Errores relativos a la propagación de la señal

Analizar la trayectoria de la señal GPS, resulta sumamente difícil, debido a que el medio por el que se desplaza presenta variaciones en cuanto a su densidad, provocando que la velocidad de propagación de la señal no sea constante. Estos cambios resultan más notables en las diferentes capas que componen a la atmósfera, siendo necesario estudiar los diferentes efectos de las capas atmosféricas en la señal, así como las soluciones existentes para su mitigación.

Las capas atmosféricas, principalmente la ionósfera y la tropósfera causan demoras en la señal de GPS, provocando errores de posicionamiento, los cuales se pueden corregir mediante modelación y correcciones matemáticas.

La velocidad de propagación de la señal tiene una gran importancia en la medición de distancias, ya que si se considera la velocidad de la señal y el tiempo que tarda en realizar un recorrido se obtiene una medida de la distancia bastante precisa. Si una onda electromagnética se propaga por el vacío, su velocidad de propagación es igual a la velocidad de la luz. Sin embargo, las señales GPS deben atravesar las capas atmosféricas hasta llegar al receptor en tierra, en las cuales interactúan con partículas cargadas, provocando un cambio en la velocidad y dirección de propagación (Sánchez Sobrino, 2009).

Un medio en el cual la velocidad de propagación de una onda electromagnética depende de su frecuencia se considera un medio dispersivo, y a su vez, en un medio de este tipo la refractividad depende de la frecuencia o de la longitud de onda. Es necesario aclarar que el efecto de dispersión es causado por interacciones electromagnéticas entre un campo electromagnético y un campo externo diferente.

Teniendo dos casos, en los cuales se analiza:

- La velocidad de propagación de la fase de una onda en particular, con una longitud de onda uniforme (velocidad de fase ν_{ph}).

- La velocidad de propagación de un grupo de ondas, generadas por la superposición de ondas de diferentes longitudes de onda (velocidad de grupo ν_{gr}).

Conceptos necesarios, para comprender que las observaciones de fase y pseudorange de las señales GPS, presentan un comportamiento diferente en su propagación por el mismo medio.

Realizando el análisis de una onda electromagnética simple que se propaga en el espacio con una longitud λ y una frecuencia f , se obtiene la velocidad de fase de la portadora de las ondas L1 y L2 de la siguiente manera:

$$\nu_{ph} = \lambda f \quad (4.3)$$

Para un grupo de ondas con frecuencias diferentes, la velocidad de propagación resultante, se define por la velocidad del grupo, es decir:

$$\nu_{gr} = -\frac{df}{d\lambda}\lambda^2 \quad (4.4)$$

Ahora bien, la velocidad de propagación en un medio dispersivo depende de un índice de refracción, del cual es inversamente proporcional.

$$\nu = \frac{c}{n} \quad (4.5)$$

4.2.1. Retraso ionosférico

La ionósfera es la capa de la atmósfera terrestre que se extiende desde los 50 km hasta los 1 000 km de altitud (Shrestha, 2004).

Existen diferentes capas o regiones en la ionósfera, las cuales se conocen como D, E, y F. La región D va de los 50 km a los 90 km de altitud y no tiene un efecto significativo en las frecuencias GPS. Sin embargo, absorbe señales de radio de alta y baja frecuencia de la banda VHF. La región E se extiende de 90 km a 140 km y es producida en altas latitudes, debido a la precipitación de partículas solares en la región auroral, en donde la aurora está asociada con efectos de centelleo en las frecuencias GPS. La región F está dividida en dos regiones: las regiones F1 y F2, la región F1 abarca de los 140 km hasta 210 km y contribuye con el 10% del total del retraso

ionosférico experimentado por las señales GPS. La región F2 se extiende desde los 210 km hasta los 1 000 km (Shrestha, 2004). Esta región es altamente variable y contribuye con la mayoría del retraso en las frecuencias GPS. La figura (4.1) muestra las diferentes regiones presentes en la ionósfera.

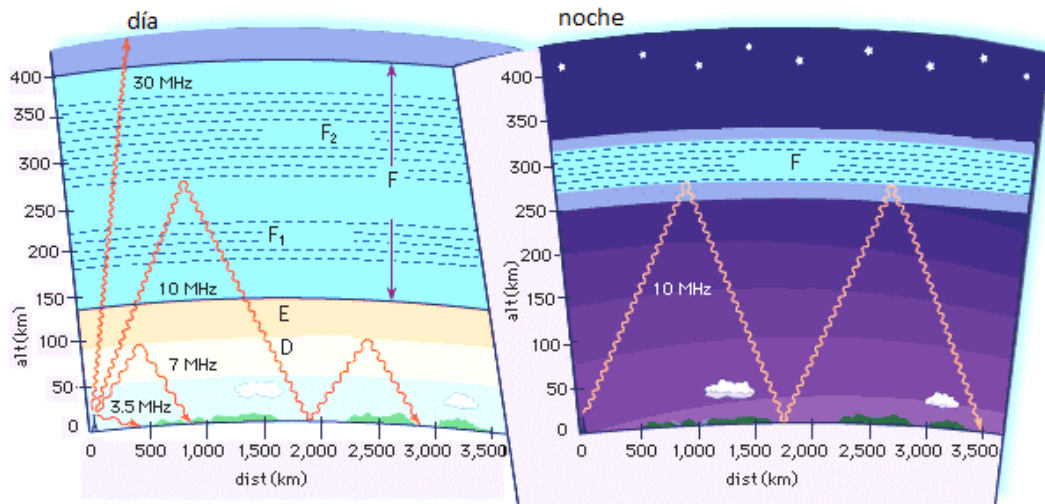


Figura 4.1: Capas de la ionósfera, tomada y modificada de https://www.bibliotecapleyades.net/haarp/esp_HAARP_29.htm

La ionósfera contiene plasma de electrones ionizados, además las radiaciones solares y otras radiaciones ionizan una parte de las moléculas gaseosas liberando electrones, los cuales en conjunto afectan la velocidad de propagación de las ondas de la señal GPS.

El error que causa la ionósfera no tiene el mismo efecto en las mediciones de la fase que en las mediciones de la pseudodistancia, ya que por una parte, para la fase, el error toma un valor negativo debido a que se produce un avance de la portadora, teniendo valores menores, y por otra parte, toma un signo positivo para las pseudodistancias, ya que se produce un retardo, el cual causa que se midan distancias mayores. A pesar de que los signos son diferentes tienen el mismo valor absoluto (Sánchez Sobrino, 2009).

La magnitud de la afectación que sufren las señales depende de la frecuencia de la señal y de la densidad de los electrones libres encontrados a lo largo de la trayectoria de la señal. La densidad de los electrones integrada en una columna vertical con un corte seccional de un área de un metro cuadrado es conocida como el contenido total de electrones (TEC). El rango de errores ionosféricos

del GPS se encuentra en función del TEC a lo largo de la trayectoria de la señal, así como de la frecuencia de la señal.

Shrestha (2004) quien menciona a Lachapelle y Zhang (2001), define el Contenido Oblicuo de Electrones (STEC), como el contenido total de electrones que se encuentra en el rayo de propagación. El STEC se suele medir en Unidades de Contenido Electrónico Total, en donde una unidad de TEC equivale a $10^{16}m^{-2}$, pudiendo expresar el tiempo de retardo ionosférico, de la siguiente manera:

$$\Delta t = \frac{40.3}{f^2} TEC \quad (4.6)$$

Las variaciones temporales y espaciales del TEC en la ionósfera causan variaciones en el tiempo de retardo ionosférico para las mediciones de GPS. El adelanto de la fase portadora puede expresarse utilizando la siguiente ecuación, tomada de Shrestha (2004) quien menciona a Lachapelle y Zhang (2001):

$$\Delta\phi = \frac{1.34 \times 10^{-7}}{f} TEC \quad (4.7)$$

Donde $\Delta\phi$ es el desplazamiento de fase debido al índice de refracción ionosférica.

La propiedad dispersiva de las ondas electromagnéticas de la ionósfera conduce a que al medir los observables en más de una frecuencia se pueda realizar una combinación, con la cual se elimine la mayor parte del retardo ionosférico. Esta combinación es conocida como combinación libre de ionósfera (L3 y P3) (Mohino Harris, 2016):

$$L3 = \frac{f_1^2}{f_1^2 - f_2^2} L1 - \frac{f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} L2 \quad (4.8)$$

$$P3 = \frac{f_1^2}{f_1^2 - f_2^2} P1 - \frac{f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} P2 \quad (4.9)$$

En donde $L1$ y $L2$ son los observables de la fase para las frecuencias f_1 y f_2 , respectivamente y $P1$ y $P2$ los del código. Es necesario aclarar que esta combinación solo se puede realizar, si se cuenta con un receptor bifrecuencia (Mohino Harris, 2016).

4.2.2. Retraso troposférico

La atmósfera neutral consiste de varias capas neutrales, estas capas son definidas por algunas características tales como la temperatura, presión y composición química. La capa más cercana a la Tierra es la tropósfera, la cual inicia en la superficie de la Tierra y se extiende hasta los 9 km aproximadamente. La región que abarca los siguientes 7 km de altitud, es la parte alta de la tropósfera y es llamada tropopausa, la cual comparte algunas características con la tropósfera y la estratósfera, donde ésta última se extiende desde los 16 km hasta los 50 km por encima de la superficie de la Tierra. La tropósfera, tropopausa, y estratósfera son consideradas como la atmósfera neutral debido a que son eléctricamente neutrales.

En la terminología GPS, el término tropósfera generalmente se refiere a la atmósfera neutral la cual se extiende desde la superficie de la Tierra hasta los 50 km de altitud (Shrestha, 2004).

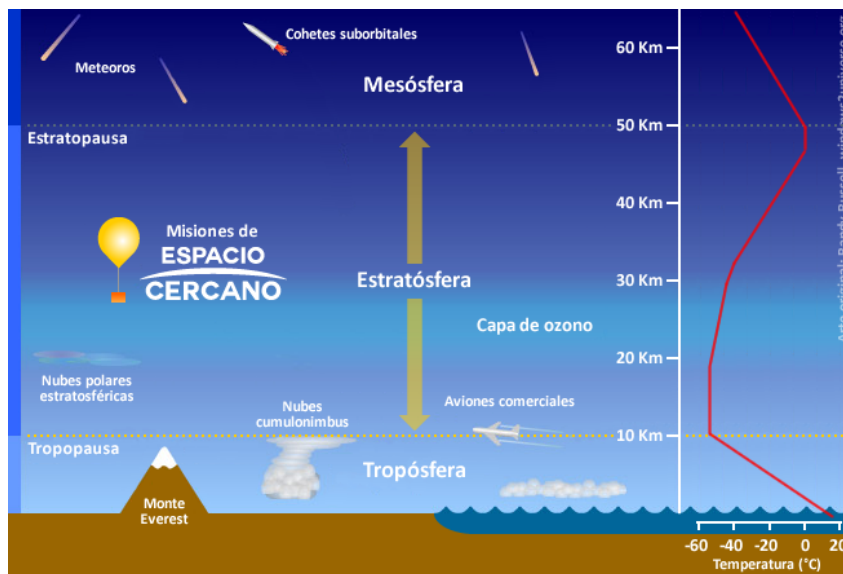


Figura 4.2: Capas de la tropósfera, tomada de <http://laatmosferadelaesquivel.blogspot.mx/2014/05/la-atmosfera.html>

La tropósfera contiene el 75 % de la masa atmosférica y la mayoría del vapor de agua, el cual juega un papel importante en la regulación de la temperatura del aire debido a que absorbe la energía solar y la radiación térmica de la superficie de la Tierra. La temperatura en la tropósfera decrece rápidamente con la altitud, con un aproximado de -5°C a -7°C por kilómetro de altitud por encima del nivel del mar hasta la tropopausa. La tropopausa es una región con una tasa de temperatura

constante, mientras que en la estratósfera la tasa de temperatura se eleva de $+1^{\circ}\text{C}$ hasta $+2^{\circ}\text{C}$ por kilómetro debido al calentamiento provocado por la absorción del ozono, y por otra parte la temperatura es aproximadamente de 0°C a una altura de 50 km por encima de la superficie de la Tierra. En la figura (4.2) se muestran los perfiles térmicos de la tropósfera, así como la relación que existe entre la temperatura y la altura.

La tropósfera es un medio no dispersivo con respecto a las ondas de radio de frecuencias superiores a 15 GHz, por lo tanto, la velocidad de propagación es independiente de la frecuencia y el retardo causado por la tropósfera (debido a la variabilidad combinada de los índices de refracción en la tropósfera, la tropopausa y la estratósfera) no puede ser eliminado como en la ionósfera, utilizando una combinación de dos frecuencias de GPS.

Considerando que la refracción es un fenómeno físico que representa un cambio en la trayectoria de una onda, sea mecánica o electromagnética, al pasar de un medio a otro; al realizar el análisis de una onda electromagnética en particular, se observa que la velocidad de la onda en el medio depende del índice de refracción, lo cual se puede expresar de la siguiente manera:

$$n = \frac{c}{\nu} \quad (4.10)$$

En donde c es la velocidad de la luz en el vacío y ν es la velocidad de la señal en el medio correspondiente, entendiendo que el medio refractivo no sólo modifica la velocidad de propagación de la señal, sino también su dirección de propagación (Šverko Navarrete, 2012).

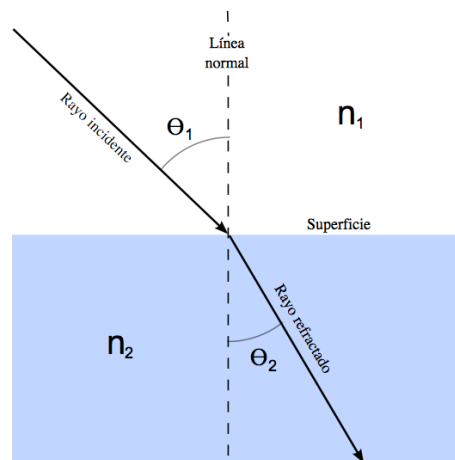


Figura 4.3: Esquema que explica la Ley de Snell, tomada de <http://forum.lawebdefisica.com/threads/11131-Ejercicio-Ley-de-Snell-%28-Reflexion-Total%29>

Cuando una señal GPS llega a la atmósfera en un ángulo incidente que no sea la normal, el recorrido del rayo es curvado de acuerdo a la ley de Snell (Fig. 4.3), la cual se explica mediante la siguiente relación:

$$n_{inc} \sin \theta_{inc} = n_{ref} \sin \theta_{ref} \quad (4.11)$$

Donde n_{inc} y n_{ref} son los índices del medio incidente y refractado respectivamente, debido a que la atmósfera llega a ser más densa en la parte más baja, incrementa el índice de refracción; causando que la onda electromagnética se curve en mayor proporción entre más cerca de la superficie de la Tierra se encuentre. En este aspecto la relación entre los cambios de velocidades que sufre la onda al pasar de un medio a otro, o el cambio de dirección se caracterizan por una constante relativa a los medios de propagación que atraviesa, teniendo:

$$\frac{\nu_2}{\nu_1} = \frac{\sin \theta_2}{\sin \theta_1} = n_{1,2} \quad (4.12)$$

Donde θ_1 , θ_2 , ν_1 y ν_2 , son los ángulos y velocidades de la onda en el medio 1 y medio 2 respectivamente y $n_{1,2}$, es el índice de refracción relativo del medio 1 con respecto al medio 2.

Debido a que las ondas electromagnéticas en la atmósfera se propagan más lento que en el vacío, el índice de refracción de la atmósfera, n , excede la unidad resultando más conveniente expresar el índice de refracción por otra cantidad, denominada refractividad, N :

$$N = 10^6(n - 1) \quad (4.13)$$

Cuando la señal GPS se propaga a través de la tropósfera de la Tierra, es afectada significativamente por la variabilidad que presenta el índice de refracción de la tropósfera. El retardo troposférico es directamente proporcional con el índice de refracción o la refractividad y se puede expresar como una función de la temperatura y de la presión atmosférica.

De acuerdo a Šverko Navarrete (2012) las leyes que rigen el estudio de la refracción se basan en el principio de Pierre de Fermat, también conocido como tiempo mínimo, que dice: “El camino seguido por un haz de luz entre dos puntos es aquel que es recorrido en el menor tiempo posible”. Siguiendo esta declaración se deduce que en un medio homogéneo, el camino óptico, es decir, la trayectoria de

una onda electromagnética, relaciona la longitud del camino recorrido como $L = ns = ct$, en donde n es el índice de refracción y s es la longitud, de tal forma que la distancia que recorre dicha onda en el vacío con una velocidad c , en un tiempo t , es igual al tiempo que demora en propagarse una distancia s en ese medio.

Si el medio por el cual la luz se propaga tiene un índice de refracción n_i variable, el camino óptico viene dado por:

$$L = \sum_{i=1}^n n_i s_i = c \sum t_i \quad (4.14)$$

Lo que representa la ruta recorrida por la onda en las i capas del medio; n_i y s_i representan el índice de refracción y la longitud de la trayectoria en la capa i -ésima, respectivamente. La atmósfera terrestre a pesar de ser un medio estratificado, no es homogéneo, puesto que sus características físicas son variables, por lo que el índice de refracción presenta una variación puntual, surgiendo la problemática de que esta ecuación solo es válida si en cada capa atmosférica el índice de refracción es único. De esta forma, la ecuación (4.14), se puede escribir como una función continua, teniendo:

$$L = \int_0^h n(s) ds \quad (4.15)$$

La cual expresa el camino recorrido por la onda incluyendo los efectos debidos a la refracción, donde L representa la distancia efectiva recorrida por una onda electromagnética cuando se propaga por la atmósfera entre dos puntos cualesquiera a y b .

La observación de señales satelitales implica la medición de la distancia existente entre el receptor y el satélite, lo cual se logra mediante los observables de pseudodistancia y de fase portadora. Las ecuaciones planteadas para el cálculo de la distancia incluyen los errores existentes en la observación, entre los que se encuentran los debidos a la refracción atmosférica, tanto para la parte ionizada (refracción ionosférica), como para la parte neutra (refracción troposférica). En lo que se refiere a los errores causados por la tropósfera, es necesario analizar el doble efecto que tiene esta capa en la señal GNSS:

- En primera instancia, es necesario analizar que la señal viaja en una trayectoria curva (S), en respuesta a la variación existente en los índices de refracción de la atmósfera, a diferencia de las señales que viajan en una trayectoria en línea recta (S_g) en una región con refracción constante.

La diferencia existente entre las longitudes de estos dos recorridos da como resultado el retraso geométrico (Fig. 4.4).

$$\Delta L = S - S_g \quad (4.16)$$

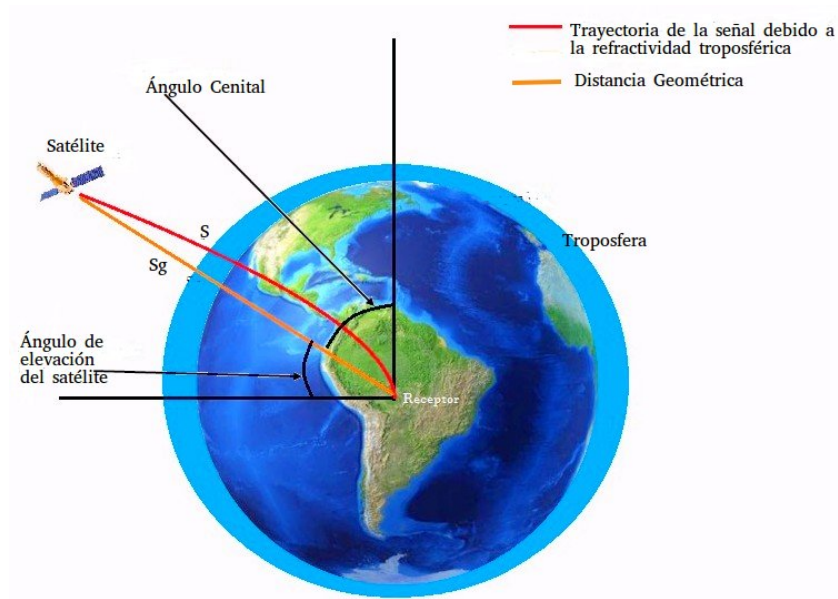


Figura 4.4: Diferencia geométrica causada por la curvatura que sufre la señal al pasar por la tropósfera, tomada y modificada de <http://www.lospedidistas.com.mx/columna/992/de-un-habitante-de-la-tierra-para-ti-marciano>

- Segundamente, las ondas viajan más lento en una región de densidad mayor a cero que en el vacío. El aumento en el tiempo de viaje para cubrir una distancia dada puede expresarse en términos de un incremento en la longitud de camino:

$$\Delta L = \int_{atm} n_{(s)} ds - \int_{vac} ds \quad (4.17)$$

La suma de estas dos componentes define el retraso troposférico total en términos del aumento equivalente en la longitud de recorrido. $n_{(s)}$ es el índice de refracción el cual varía en función de la posición s a lo largo del trayecto L , S_g representa la longitud de la línea recta geométrica a través de la atmósfera y S representa la trayectoria curva que sigue la señal.

$$\Delta L = \int_L [n_s - 1] ds + [S - S_g] \quad (4.18)$$

Para trabajos de vapor de agua sólo se consideran los rayos orientados a lo largo del zenit, teniendo:

$$\Delta L^z = \int_0^h (n_{(s)} - 1) dz \quad (4.19)$$

Siendo éste el retraso troposférico total en dirección del zenit (ZTD). La integral se realiza a lo largo de la trayectoria cenital, desde la superficie terrestre hasta un límite superior h que representa el límite de la tropósfera. El retraso resultante de esta ecuación se expresa en unidades de longitud.

De ésta manera, el retardo de una señal GPS que va desde un satélite a un punto en la superficie debido a la atmósfera neutra puede determinarse al calcular la refractividad a lo largo de su trayectoria de propagación, teniendo:

$$\Delta^{trop} = \int (n - 1) ds = 10^{-6} \int N^{trop} ds \quad (4.20)$$

Esta integral se puede evaluar conociendo el índice de refracción, o mediante funciones analíticas, aunque lo más común es utilizar aproximaciones basadas en modelos atmosféricos, como lo son: el modelo de Hopfield, el modelo de Saastamoinen, el modelo modificado de Hopfield, el modelo de Goad y Goodman, el de Black y el de Robinson, entre otros.

Para estos casos, el retardo troposférico puede separarse en dos componentes: la componente hidrostática o seca y la componente húmeda. El retardo hidrostático es ocasionado por los gases secos en la tropósfera y por la componente no dipolar de refractividad de vapor de agua y puede ser modelado con alta precisión utilizando mediciones de presión en superficie. Sin embargo, el retardo húmedo, que es debido al vapor de agua, es altamente variable y no puede ser modelado solo con mediciones en superficie (Shrestha, 2004).

A menudo el retardo troposférico se representa como una combinación lineal:

$$\Delta^{Trop} = \Delta_d^{Trop} + \Delta_w^{Trop} = 10^{-6} \int N_d dz + 10^{-6} \int N_w dz \quad (4.21)$$

de las componentes hidrostática y húmeda:

$$\Delta_d^{Trop} = 10^{-6} \int N_d^{Trop} dz \quad (4.22)$$

$$\Delta_w^{Trop} = 10^{-6} \int N_w^{Trop} dz \quad (4.23)$$

Para aplicaciones que no exigen una alta precisión, el retardo troposférico se suele presentar, como el retardo troposférico en la dirección del zenit, sobre la antena en tierra, el cual es una combinación del retardo hidrostático en el zenit Δ_d^z y el retardo húmedo en el zenit Δ_w^z , teniendo:

$$\Delta_{Trop}^z = \Delta_d^z + \Delta_w^z \quad (4.24)$$

Esta forma de expresar el retardo, solo se considera válida, si los valores finales no exigen una alta precisión, y si la aplicación que se pretende dar a los resultados así lo permite. En lo que se refiere a posicionamiento, esta expresión solo es válida si las señales recibidas por el receptor se encuentran en dirección cenital, puesto que si no es el caso, se presentará una variación en los resultados causada por el ángulo cenital, y por consiguiente la precisión de los resultados es afectada. Para realizar una modelación adecuada del retardo de la señal GPS, se realiza el modelado considerando el retardo total cenital y funciones de mapeo, las cuales tienen como propósito, incluir el ángulo cenital en el cálculo del retardo de la señal. Estas funciones se dividen en funciones de mapeo para la componente húmeda, y funciones de mapeo para la componente hidrostática, obteniendo la expresión (4.24).

$$\Delta^{Trop} = m_d(\varepsilon)\Delta_d^z + m_w(\varepsilon)\Delta_w^z \quad (4.25)$$

Donde:

$m_d(\varepsilon)$: Es el cálculo de la función de mapeo hidrostática.

$m_w(\varepsilon)$: Es el cálculo de la función de mapeo húmeda.

De acuerdo a Shrestha (2004), el retardo troposférico total en el zenit es cercano a 2.50 m, donde cerca del 90 % de este valor se debe al retardo hidrostático en el zenit, y aproximadamente el 10 % es causado por el retraso húmedo en el zenit; se suele hacer énfasis en los valores cenitales, debido a que los satélites decrecen en elevación a medida que se aproximan al horizonte, provocando un aumento significativo en el error, puesto que la distancia que recorre la señal es mayor que cuando el satélite se encuentra en el zenit.

Para poder realizar el análisis del retardo de la señal GNSS debido a la atmósfera es necesario comprender que en meteorología, el aire se trata como si fuese una mezcla de dos gases ideales, el aire seco y el vapor de agua, pudiendo expresarlos en función de la ecuación de estado, teniendo para el aire seco:

$$Pd = \rho_d R_d T \quad (4.26)$$

Donde Pd es la presión del aire seco, ρ_d es la densidad del aire seco, R_d es la constante de los gases referida al aire seco, la cual a su vez se define como $R_d = \frac{R}{m_d}$, con R , la constante universal de los gases y m_d la masa molecular del aire seco y T la temperatura en grados Kelvin.

Mientras que la presión de vapor de agua, es la presión parcial debida al contenido de vapor de agua en el aire, quedando expresado mediante la ecuación de estado, de la siguiente manera:

$$e = \rho_w R_w T \quad (4.27)$$

Donde e es la presión parcial del vapor de agua, ρ_w es la densidad del vapor de agua, R_w es la constante universal de los gases referida al vapor de agua, siendo definida como $R_w = \frac{R}{m_w}$, con R , la constante universal de los gases y m_w la masa molecular del vapor de agua y T la temperatura en grados Kelvin.

La ecuación 4.27 se puede expresar de manera empírica a partir de la fórmula de Clausius Clapeyron, teniendo:

$$e = \frac{H_r}{100} * e_s \quad (4.28)$$

$$e_s = 6.11 \times 10^3 \left[\frac{7.5(T - 273.15)}{237.3 + (T - 273.15)} \right] \quad (4.29)$$

Expresiones que facilitan el modelado de la refractividad, como una combinación lineal de la parte seca y la parte húmeda, empleando el modelo desarrollado por Essen y Froome (1951), donde el término correspondiente a la parte seca es:

$$N_d = k_1 \frac{Pd}{T} \quad (4.30)$$

Y el correspondiente a la parte húmeda es:

$$N_w = k_2 \frac{e}{T} + k_3 \frac{e}{T^2} \quad (4.31)$$

En la práctica, diferentes modelos son aplicados para el cálculo de la refractividad total en base a la ecuación (4.21). Generalmente, los parámetros meteorológicos superficiales, tal como la presión, temperatura, y humedad son las entradas necesarias requeridas para estos modelos, siendo uno de los más conocidos, el propuesto por Bevis *et al.* (1992).

$$N = (n - 1)10^6 = k_1 \frac{Pd}{T} + k_2 \frac{e}{T} + k_3 \frac{e}{T^2} + k_4 \frac{Pc}{T} \quad (4.32)$$

Donde:

- Pd : Es la presión parcial del aire seco.
- e : Es la presión parcial del vapor de agua.
- Pc : Es la presión parcial debido al CO_2 .
- T : Es la temperatura en superficie en grados Kelvin.
- k_1, k_2, k_3, k_4 : Son las constantes de refractividad.

El cuarto término de la ecuación (4.32) se puede eliminar, sin que influya en la exactitud de la determinación para la refractividad, puesto que la presión debida al CO_2 es muy pequeña, comparada con la presión total, quedando la expresión (4.32) de la siguiente manera:

$$N = k_1 \frac{Pd}{T} + k_2 \frac{e}{T} + k_3 \frac{e}{T^2} \quad (4.33)$$

Algunos investigadores proponen valores para las constantes k_1, k_2, k_3 , para determinar la refractividad de una manera empírica. Los valores más significativos se muestran en la tabla (4.5), tomada de Šverko Navarrete (2012), que menciona a Bevis *et al.* (1992) y a Saastamoinen (1973) y de Shrestha (2004), quien menciona a Mendes (1999).

Modelo	$k_1 \left(\frac{K}{mbar} \right)$	$k_2 \left(\frac{K}{mbar} \right)$	$k_3 \left(\frac{K^2}{mbar} \right)$
Thayer(1974)	77.604 ± 0.014	64.79 ± 0.08	$(3.776 \pm 0.004)10^5$
Boudouris (1963)	77.593 ± 0.080	72.00 ± 10.0	$(3.754 \pm 0.030)10^5$
Smith and Weintraub (1953)	77.607 ± 0.130	71.60 ± 8.50	$(3.747 \pm 0.031)10^5$
Bevis et al. (1994)	77.600 ± 0.050	70.40 ± 2.20	$(3.739 \pm 0.012)10^5$
Hill et al. (1982)		98 ± 1	3.583 ± 0.003
Hill (1988)		102 ± 1	3.578 ± 0.003
Rüeger (2002)	77.6890	71.2952	$(3.75463)10^5$
Essen- Frome	77.624	64.704	$(3.71900)10^5$

Tabla 4.5: Valores propuestos para las constantes de refractividad.

De la anterior tabla, las constantes más utilizadas son las de Smith-Weintraub, las cuales se han utilizado frecuentemente en estudios de propagación de ondas de radio (Mendes, 1999). Šverko Navarrete (2012), menciona que *The International Radio Consultative Committee (CCIR)* de la Unión Internacional de Telecomunicaciones, en la 16^a Asamblea Plenaria, en Dubronik en 1986, en la recomendación 453-1, teniendo en cuenta la necesidad de usar una sola fórmula, por unanimidad se estableció una fórmula para el índice de refracción para ondas de radio menores a 15GHz, utilizando las constantes propuestas por Smith y Weintraub (1953), por lo que la ecuación (4.33), se puede expresar de la siguiente manera:

$$N = 77.607 \frac{Pd}{T} + 71.6 \frac{e}{T} + 3.747 \times 10^5 \frac{e}{T^2} \quad (4.34)$$

Si bien, está es la ecuación más común, existen otras como la propuesta por Davis *et al.* (1985), la cual parte de la ecuación de estado, teniendo:

$$PV = nRT \quad (4.35)$$

Donde:

- P : Presión
- V : Volumen
- n : Número de moles
- R : Constante universal de los gases
- T : Temperatura

Si se considera el aire como un gas ideal, se modifica la ecuación (4.35) de la siguiente manera:

$$P \frac{V}{m} = \frac{n}{m} RT \quad (4.36)$$

Donde:

$$m \quad : \quad \text{Masa}$$

Y considerando la definición de masa molar $M = \frac{m}{n}$, se tiene:

$$P \frac{V}{m} = \frac{R}{M} T \quad (4.37)$$

Además considerando sólo la región hidrostática, se puede obtener:

$$P \frac{V}{m} = R_d T \quad (4.38)$$

Debido a que la constante universal de los gases ideales referida al aire seco, se obtiene de la siguiente manera:

$$R_d = \frac{R}{M_d} \quad (4.39)$$

Donde $M_d = 28.9644 \pm 0.0014 \frac{kg}{kmol}$ es la masa molar del aire seco propuesta por Davis *et al.* (1985).

Y sustituyendo en la ecuación (4.38) $\rho = \frac{m}{V}$, se tiene:

$$\frac{P}{T} = \rho_d R_d \quad (4.40)$$

Con la cual se pueden sustituir los primeros dos términos de la ecuación (4.33), teniendo:

$$k_1 \frac{Pd}{T} + k_2 \frac{e}{T} = k_1 R_d \rho_d + k_2 R_w \rho_w \quad (4.41)$$

Utilizando la masa total

$$\rho = \rho_d + \rho_w \quad (4.42)$$

Se puede transformar la ecuación (4.41) en:

$$k_1 R_d \rho + k'_2 \frac{e}{T} \quad (4.43)$$

Donde la constante k'_2 , se define como:

$$k'_2 = k_2 - \frac{R_d}{R_w} k_1 = k_2 - \frac{M_w}{M_d} k_1 \quad (4.44)$$

Donde $M_w = 18.0152 \frac{kg}{kmol}$, es la masa molar del vapor de agua, propuesta por Davis *et al.* (1985).

Resultando que la refractividad total sería:

$$N = k_1 R_d \rho + k'_2 \frac{e}{T} + k_3 \frac{e}{T^2} \quad (4.45)$$

Donde el primer término, corresponde a la parte seca, mientras que los otros dos corresponden a la parte húmeda.

Por otra parte, para calcular el retardo troposférico, se presentan dos formas, la primera es, considerando los rayos orientados en dirección del zenit, donde se expresa como una integral de la trayectoria cenital hasta un límite superior, h , el cual representa la altura de la atmósfera neutra, quedando de la siguiente manera:

$$ZTD = \Delta^{trop} = 10^{-6} \int_0^h N(s) dz = 10^{-6} \int_0^h N_d dz + 10^{-6} \int_0^h N_w dz = \Delta_d^{trop} + \Delta_w^{trop} \quad (4.46)$$

Y la segunda forma es, si se considera el ángulo cenital, es decir la inclinación que tiene la señal con respecto al zenit, teniendo:

$$ZTD = \Delta^{trop} = 10^{-6} \int_0^h N(s) dz = \Delta_z^d m_d(E) + \Delta_z^w m_w(E) \quad (4.47)$$

$$ZTD = 10^{-6}m_d(E) \int_0^h N_d dz + 10^{-6}m_w(E) \int_0^h N_w dz \quad (4.48)$$

Donde las componentes Δ_d^{trop} son el retardo cenital hidrostático (ZHD, *zenith hydrostatic delay*) y Δ_w^{trop} el retardo cenital húmedo (ZWD, *zenith wet delay*), y las componentes $m_d(E)$ y $m_w(E)$, son las funciones de mapeo hidrostático y mapeo húmedo.

4.2.2.1. Modelos para cuantificar el Retardo Húmedo Cenital (ZWD)

Existen infinidad de modelos, para calcular el retardo troposférico de manera conjunta, es decir sin aislar el retardo hidrostático del retardo húmedo, y por otra parte, existen modelos específicos para el retardo húmedo, y modelos específicos para el retardo hidrostático. Para el presente trabajo unicamente se consideran los modelos que calculan el retardo húmedo cenital, teniendo:

Modelo de Saastamoinen

En el modelo de retardo húmedo en el zenit, Saastamoinen (1973) asumió que existe una reducción lineal de la temperatura con la altura, y que la presión de vapor de agua disminuye con la altura. La variación de la presión de vapor de agua se expresa de la siguiente manera:

$$e = e_s \left[\frac{T}{T_s} \right]^{\frac{vg}{R_d \alpha}} \quad (4.49)$$

Donde:

- e_s : Es la presión de vapor de agua en la superficie de la Tierra.
- v : Es el coeficiente numérico determinado a partir de observaciones locales.
- R_d : Es la constante específica de gas seco.
- T_s : Es la temperatura en la superficie de la Tierra en grados Kelvin.
- T : Es la temperatura en grados Kelvin.
- α : Es el gradiente de temperatura.
- g : Es la aceleración debida a la gravedad.

Saastamoinen (1973) dio la expresión para el modelo del retardo húmedo en el zenit utilizando la constante de la refractividad de Essen y Froome (1951), para latitudes medias y condiciones promedio,

generando el siguiente modelo:

$$\Delta_w^{trop} = 0.002277 \left(\frac{1255}{T_s} + 0.05 \right) e_s \quad (4.50)$$

Modelo de Hopfield

Hopfield (1969) dio la expresión para el modelo del retardo húmedo en el zenit utilizando un perfil atmosférico de cuarto grado:

$$\Delta_w^{trop} = \frac{10^{-6}}{5} \left(k_2 \frac{e}{T} + k_3 \frac{e}{T^2} \right) H_w^e \quad (4.51)$$

$$H_w^e = 11000m \quad (4.52)$$

Donde $N_{w,0}$ es la refractividad húmeda en la superficie:

$$N_{w,0} = k_2 \frac{e}{T} + k_3 \frac{e}{T^2} \quad (4.53)$$

Modelo de Ifadis

Ifadis (1986) desarrollo el modelo empírico para el retardo húmedo en el zenit, basado en el hecho de que existe una correlación lineal entre el retardo húmedo en el zenit y los parámetros meteorológicos superficiales. El modelo de retardo húmedo en el zenit está dado por la siguiente expresión:

$$\Delta_w^{trop} = 0.00554 - 0.880x10^{-4}(P - 1000.0) + 0.272x10^{-4}e + 2.771 \left[\frac{e}{T} \right] \quad (4.54)$$

Modelo de Berman

El modelo de Berman (1976) está basado en la existencia de una fuerte correlación entre la relación de los índices de los retardos húmedo e hidrostático y las refractividades correspondientes:

$$\frac{d_w^z}{d_d^z} = K \left[\frac{N_w}{N_d} \right] \quad (4.55)$$

Donde K es una constante y es determinada con valores empíricos. El modelo de retardo en el zenit puede expresarse mediante la siguiente expresión:

$$\Delta_w^{trop} = 10.946 \left[\frac{e}{T} \right] \quad (4.56)$$

Los modelos anteriormente mencionados comparten un rasgo en particular; las entradas, o el tipo de datos en los que se basan para su adecuado funcionamiento, siendo; presión, temperatura, y humedad relativa. Cuando no se cuenta con estos datos se pueden generar mediante modelos atmosféricos, entre los que destaca:

La Atmósfera Estándar Internacional, el cual es, uno de los más utilizados, en el que se plantea la variación de la presión, temperatura, densidad y viscosidad de la atmósfera de la Tierra sobre una gama de alturas. De acuerdo a Valero *et al.* (2013), la atmósfera se considera como un gas en equilibrio hidrostático en presencia de un campo gravitatorio uniforme; tomando en cuenta las tres propiedades más significativas de la atmósfera (Presión, Temperatura y Humedad Relativa) y su relación con la altitud ortométrica (h) mediante un sistema de tres ecuaciones:

$$P = P_{ref} * (1 - 0.0000226(h - h_{ref}))^{5.225} \quad (4.57)$$

$$T = T_{ref} - 0.0625(h - h_{ref}) \quad (4.58)$$

$$H = H_{ref} * e^{-0.00006396(h - h_{ref})} \quad (4.59)$$

Donde, los parámetros de referencia habituales a nivel del mar son:

- $P_{ref} = 1013.25$: Es la presión de referencia en mb.
- $T_{ref} = 18^\circ C$: Es la temperatura de referencia en grados centígrados.
- $h_{ref} = 0.0m$: Es la altura ortométrica de referencia de la estación.
- $H_{ref} = 50\%$: Es el porcentaje de referencia de la humedad relativa.
- h : Es la altura ortométrica de la estación.

De acuerdo a Valero *et al.* (2013), otros modelos empleados son:

- El modelo empírico GPT (Global de Presión y Temperatura), que se basa en armónicos esféricos de hasta nivel y orden nueve, proporcionando la presión y la temperatura en cualquier sitio cercano a la superficie terrestre; los parámetros de entrada necesarios para este modelo son las coordenadas de la estación y el día del año de interés.
- La Atmósfera Estándar US, que se compone de una serie de modelos que definen los valores de presión, temperatura y densidad para la atmósfera en un amplio rango de altitudes.

4.2.2.2. Funciones de mapeo

La función de mapeo, $m(\varepsilon)$, se define como la relación de la longitud del trayecto eléctrico, o dicho de otra forma, el retardo a través de la atmósfera, en un ángulo geométrico de elevación ε , en la longitud del trayecto eléctrico en la dirección cenital. Una función de mapeo se utiliza para mostrar el retardo en el zenit, y para estimar el retardo troposférico inclinado. La función de mapeo más simple está dada por $\frac{1}{\sin(\varepsilon)}$, es decir la cosecante del ángulo de elevación, en esta aproximación se asume que la altura es constante en superficies esféricas, pudiendo aproximarla con superficies planas. Esta aproximación en la medida es solamente para ángulos de elevación altos con un pequeño grado de curvatura. Existen otras funciones de mapeo más complejas, como la de Hopfield, Black, Chao y Niell, las cuales no se desarrollarán en el presente trabajo, debido a su nula importancia para el cálculo de vapor de agua.

4.2.3. Disponibilidad selectiva

Desde la puesta en servicio del sistema GPS, el Departamento de Defensa de los Estados Unidos introdujo intencionalmente un error en el sistema, llamado Disponibilidad Selectiva (Selective Availability), el cual es una degradación intencional de la señal del satélite. La intención de esta es negar los beneficios de la precisión del sistema GPS en situaciones bélicas, para prevenir posibles ataques, teniendo errores de:

100 m en la componente horizontal	95 % del tiempo
156 m en la componente vertical	95 % del tiempo
300 m en la componente horizontal	99.99 % del tiempo
500 m en la componente vertical	99.99 % del tiempo
340 nanosegundos de precisión en el tiempo	95 % del tiempo.

Esta degradación de la señal se efectuaba sobre los estados de los relojes y los parámetros orbitales, manipulando la frecuencia del reloj del satélite, teniendo como resultado la variación de la longitud de

onda de la portadora, así como un error en las efemérides transmitidas, generando una disminución en la precisión del posicionamiento final. El 1 de Mayo de 2000, se anunció el fin de la degradación intencional en la señal GPS, elevando de manera considerable la precisión en las mediciones realizadas por usuarios civiles, pudiendo determinar coordenadas 10 veces más precisas (precisión de aproximadamente 10 metros en la componente horizontal).

4.2.4. Efecto multirayectoria

El efecto multirayecto, o efecto multipath, es el resultado de la llegada de las señales GPS a la antena provenientes de más de una dirección, debido a la reflexión o difracción. Este efecto es causado por múltiples reflexiones de la señal emitida por el satélite en superficies cercanas a la antena, causando que las señales recorran trayectos más largos y tengan distorsiones en la amplitud y forma de la onda, (Fig. 4.5).

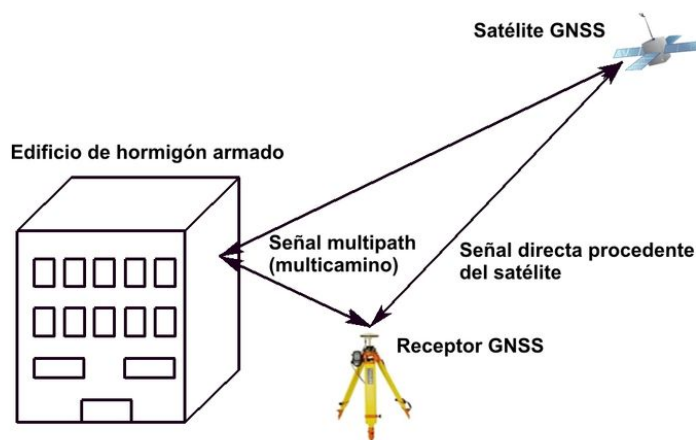


Figura 4.5: Efecto Multipath o Multirayectoria, tomada de <https://www.pinterest.com.mx/pin/413346072024312455/>

La principal problemática radica en que las técnicas de GPS diferencial no eliminan los efectos de multipath, debido a que son dependientes y relativos al sitio de observación, sin embargo la elección de un buen sitio para una estación puede reducir considerablemente este efecto en las observaciones GPS.

De acuerdo a Sánchez Sobrino (2009), los errores de multipath se pueden clasificar en tres clases diferentes:

- Difusión proveniente de un área grande, por ejemplo si la señal pasó a través de una malla

metálica.

- Reflexión especular en objetos bien definidos o superficies reflectantes en la cercanía de la antena.
- Fluctuaciones de muy baja frecuencia asociados generalmente con reflexiones en la superficie del agua.

Existen diferentes soluciones para mitigar o eliminar estos errores, las cuales van desde la utilización de modelos hasta la elección de un sitio con características específicas, siendo las principales:

- La elección de un sitio, en el cual no se pueda presentar reflexión en edificios, vehículos o árboles, así como en plataformas metálicas.
- Plantear una máscara de elevación adecuada, ya que con señales procedentes de satélites a baja altura el efecto será mayor o existe una posibilidad mayor de que se presente.
- El diseño de la antena a utilizar para las observaciones, debido a que existen antenas que reducen considerablemente el efecto, como lo son, las antenas tipo “choke ring” (en la siguiente sección se hablará más a detalle de este punto).
- Utilizar materiales radioabsorventes alrededor de la antena.

El efecto depende de la frecuencia y por ello las medidas de fase están menos afectadas que las de código; en las observaciones de código los errores pueden variar en un rango de 10 m a 20 m, e inclusive se pueden incrementar hasta los 100 m en las cercanías a edificios (Sánchez Sobrino, 2009).

De acuerdo a Sánchez Sobrino (2009), no existe un modelo general para el efecto de multipath debido a la arbitrariedad de las diferentes situaciones geométricas que se pueden presentar. Sin embargo, la afectación producida se puede estimar utilizando una combinación de medida de código y fase L1 y L2. El efecto de multipath en la fase puede estimarse teniendo en cuenta la señal directa e indirecta que llega al centro de la antena, teniendo:

Para la señal directa

$$S_D = \alpha \cos \varphi \quad (4.60)$$

Y para la señal indirecta

$$S_R = \beta \alpha \cos(\varphi + \Delta\varphi) \quad (4.61)$$

Donde:

- a : Es la amplitud.
- φ : Es la fase de la señal directa.
- β : Es la atenuación debida al multitrayecto.
- $\Delta\varphi$: Es el cambio de fase debido al mutitrayecto.

En el caso general, puede haber un número (n) de señales reflejadas, con diferentes factores de atenuación β y cambios de fase $\Delta\varphi$. De acuerdo a Raquet (1998), la señal total de la antena receptora (S), se expresa como la superposición de todas las señales, teniendo:

$$S = a \cos \varphi + \sum_{j=1}^n \beta_j a \cos(\varphi + \Delta\varphi_j) \quad (4.62)$$

Raquet (1998), también menciona que resulta muy útil examinar el caso particular de una señal reflejada. Iniciando con la superposición directa y reflejada de una señal, teniendo:

$$S = a \cos \varphi + \beta a \cos(\varphi + \Delta\varphi) \quad (4.63)$$

Tomando como base la siguiente identidad trigonométrica:

$$\cos(a + b) = \cos a \cos b - \sin a \sin b \quad (4.64)$$

Se puede expresar la ecuación (4.63), de la siguiente manera:

$$S = a \cos \varphi + \beta a \cos \varphi \cos \Delta\varphi - \beta a \sin \varphi \sin \Delta\varphi \quad (4.65)$$

$$S = a \cos \varphi [1 + \beta \cos \Delta\varphi] - (\beta \sin \Delta\varphi) a \sin \varphi \quad (4.66)$$

Debido a que las señal directa y reflejada tienen la misma frecuencia, la superposición puede escribirse de la siguiente forma:

$$S = \beta_M a \cos(\varphi + \Delta\varphi_M) \quad (4.67)$$

Donde:

β_M : Es el factor de atenuación de la señal debido al multitrayecto.

$\Delta\varphi_M$: Es el cambio de la fase de la señal debido al multitrayecto.

Comparando los coeficientes para $a \sin \varphi$ y $a \cos \varphi$ en las ecuaciones (4.66) y (4.67) de manera simultanea, se tiene:

$$\beta_M \sin \Delta\varphi_M = \beta \sin \Delta\varphi \quad (4.68)$$

$$\beta_M \cos \Delta\varphi_M = 1 + \beta \cos \Delta\varphi \quad (4.69)$$

Elevando al cuadrado y superponiendo las ecuaciones (4.68) y (4.69), tenemos:

$$\beta_M^2 \sin^2 \Delta\varphi_M + \beta_M^2 \cos^2 \Delta\varphi_M = \beta^2 \sin^2 \Delta\varphi + (1 + \beta \cos \Delta\varphi)^2 \quad (4.70)$$

$$\beta_M = \sqrt{1 + 2\beta \cos \Delta\varphi + \beta^2} \quad (4.71)$$

$$\tan \Delta\varphi_M = \frac{\beta \sin \Delta\varphi}{1 + \beta \cos \Delta\varphi} \quad (4.72)$$

Donde el factor β puede variar entre 0 y 1. Para los casos extremos, es decir si $\beta = 0$, entonces no habrá señal reflejada ni efecto multitrayecto, teniendo $\Delta\varphi_M = 0$, lo cual representa que la señal resultante es igual a la señal directa, y por otra parte si $\beta = 1$, entonces se presenta la reflexión más fuerte, ya que de acuerdo a Shrestha (2004), se pueden tener errores de 90° , es decir 5 cm para las mediciones de L1, aunque en aplicaciones reales el error multitrayecto es de aproximadamente 1 cm.

4.3. Errores relativos al receptor

Son causados por las características del mismo receptor, tales como el tipo de antena y tipo de reloj con los que cuenta, así como por dispositivos electrónicos cercanos al receptor que emiten señales de radio, provocando ruido en la señal proveniente del satélite

4.3.1. Ruido en la medición del receptor

El ruido del receptor es un ruido aleatorio, el cual se genera a medida que se procesa la señal del receptor a partir de los datos de medición del pseudorango y de la fase de la portadora. Es necesario explicar que los errores no presentan una correlación con el tiempo, además de que tampoco existe una correlación entre las mediciones del código y de la fase portadora tomadas en un mismo intervalo de tiempo en un mismo receptor. De acuerdo a Shrestha (2004), el ruido en las mediciones del código puede aislarse de todos los demás errores utilizando una “línea de base cero”, la cual consiste en conectar dos receptores en la misma antena, además de mencionar que el ruido para las mediciones de código puede ser calculado a partir de las dobles frecuencias del pseudorango utilizando la siguiente expresión:

$$\sigma_{\varepsilon p} = 0.5\sigma_{\Delta\nabla P_{rx}} \quad (4.73)$$

Donde:

- $\sigma_{\varepsilon p}$: Es la medición del ruido a representar para la doble diferencia del pseudorango.
- $\sigma_{\Delta\nabla P_{rx}}$: Es la variación del ruido.

El ruido del receptor para las mediciones del código C/A se encuentra en un rango de 30 cm a 300 cm y para el código P los valores pueden variar de 3 cm a 30 cm; por otra parte para la fase portadora L1, el ruido de la fase podría variar de 0.5 mm a 3 mm.

Shrestha (2004) quien menciona a Lachapelle y Zhang (2001) mencionan que el nivel de ruido de las mediciones del código y la fase disminuye a medida que el ángulo de elevación aumenta hasta los 45° de elevación, y el nivel del ruido se vuelve constante por encima de los 45° de elevación.

4.3.2. Variación del centro de fase de la antena

La antena GPS sirve como modulo de conexión entre el satélite y el receptor GPS, la cual se utiliza para filtrar, amplificar y convertir la señal entrante de los satélites en una señal eléctrica que pueda ser procesada por el receptor. El punto de la antena al cual llega la señal GPS se llama centro de fase de antena.

En el procesamiento de información GPS deben de considerarse tres tipos de desplazamientos presentes en la antena receptora GPS:

- Altura instrumental, la cual indica la distancia vertical existente entre la placa o monumento que representa al vértice y el punto de referencia con el que cuenta la antena para medir esta altura.
- Offset entre el punto de referencia de la antena y el punto de referencia que sirve para medir la altura instrumental (Esta constante es proporcionada por el fabricante del equipo).
- Offset entre el punto de referencia y el centro electrónico de fase, lo cual se conoce como variaciones del centro de fase.

La variación y desfase que existe en el centro de la antena, se debe a la falta de coincidencia entre el centro de fase de la antena o centro radioeléctrico, es decir, el punto al que realmente llega la señal (tanto fase, como código), y el centro mecánico o físico; generando un pequeño error residual de milímetros.

El centro radioeléctrico de la antena no se mantiene constante, debido a que presenta variaciones del azimut y de la altura del satélite, y por consecuente, de la longitud de onda. Dependiendo del modelo de la antena pueden presentarse variaciones de centímetros, pudiendo tener una cantidad infinita de centros de fase. Es necesario aclarar que para receptores de doble frecuencia existen dos o más centros de fase, uno para L1, otro para L2 y otro para L5.

Estas variaciones se pueden corregir mediante calibraciones absolutas o relativas. Para el caso de una calibración absoluta se utilizan robots, los cuales orientan a la antena en función de la altura del satélite; por otra parte para mediciones relativas, todas las antenas a utilizar se alinean en una misma dirección, la cual por lo general es el norte magnético, con la finalidad de que el movimiento del centro de fase de la antena sea común y se pueda cancelar con una primera aproximación.

La antena más utilizada para estaciones de medición continua es de tipo “Choke ring” o también llamada de anillos estranguladores, siendo la única antena que mitiga los errores causado por el efecto multitrayectoria, ayudando a obtener una mayor precisión en los trabajos geodésicos (Fig. 4.6).

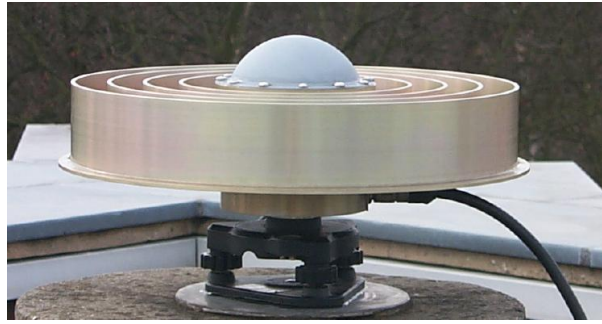


Figura 4.6: Antena de tipo choke ring, tomada de: http://www.geopp.de/media/docs/AOA_DM_T/

4.3.3. Dilución de la precisión

La Dilución de la Precisión (DOP) es un valor adimensional, el cual describe la solidez de la figura observable geoméricamente, la cual esta constituida por los vectores de posición que parten del receptor y culminan en los satélites que se encuentran visibles. La dilución de la Precisión puede incrementar o disminuir el efecto de los errores en las mediciones de los satélites, debido a la distribución espacial que presentan los satélites; puesto que si es una buena distribución la posición se determina en un área menor, causando que el margen de error sea mínimo, y por el contrario, cuando los satélites tienen una mala distribución, encontrándose muy cercanos entre si, el área de ubicación aumenta, causando que la incertidumbre de posición también aumente (Fig. 4.7).

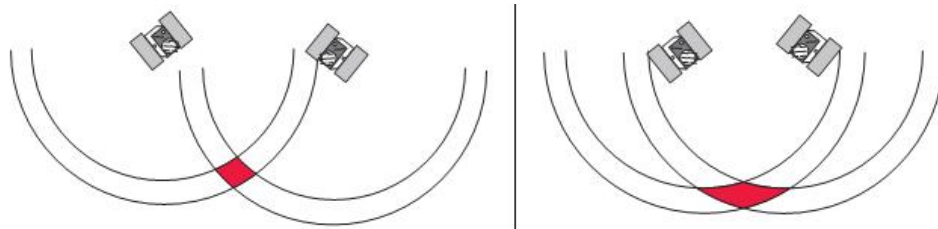


Figura 4.7: Comparación entre una buena distribución (Izquierda) y una mala distribución (Derecha), así como la posible incertidumbre en una observación GPS de cada una, tomada de: <http://detopografia.blogspot.mx/2012/11/principales-fuentes-de-error-en-gps-ii.html>

El valor ideal de la DOP es uno, aunque durante una observación este valor suele aumentar debido a que la geometría puede empeorar, incluso puede presentarse el caso en el cual se tengan suficientes satélites visibles, pero debido a la configuración de estos, la DOP puede superar el valor establecido, causando que la observación deba suspenderse.

Los rangos que puede tomar la DOP, indican la calidad de la observación, teniendo:

1	Ideal
2 – 3	Excelente
4 – 6	Buena
7 – 8	Moderada
9 – 20	Regular
21 – 50	Mala

Se pueden calcular diferentes tipos de DOP en GPS, dependiendo de las variables:

- PDOP (Position Dilution of Precision), se trata de la imprecisión tridimensional y es inversamente proporcional al área del polígono delimitado por las intersecciones de las líneas de visión a los satélites con una esfera centrada en el observador. Las peores posiciones son aquellas en las cuales los satélites se encuentran a poca distancia entre si, ya sea en la dirección del zenit, o en la dirección del horizonte y se puede expresar como:

$$\sqrt{\frac{(\sigma_{u_x})^2 + (\sigma_{u_y})^2 + (\sigma_{u_z})^2}{UERE^2}} \quad (4.74)$$

Donde, el error cometido en la medición de la pseudodistancia se le llama UERE (User Equivalent Range Error), y se calcula como la raíz cuadrada de la suma de los cuadrados de las fuentes de error individuales, que afectan a la medida de la pseudodistancia, (Cabrera y Morales, 2016).

- HDOP (Horizontal Dilution of Precision), es la imprecisión en el plano de superficie, o plano de horizonte y se puede expresar como:

$$\sqrt{\frac{(\sigma_{u_x})^2 + (\sigma_{u_y})^2}{UERE^2}} \quad (4.75)$$

- VDOP (Vertical Dilution of Precision), es la imprecisión en la posición vertical y se puede expresar como:

$$\sqrt{\frac{(\sigma_{u_z})^2}{UERE^2}} \quad (4.76)$$

- TDOP (Time Dilution of Precision), es la imprecisión en el tiempo y se puede expresar como:

$$\sqrt{\frac{(\sigma_{u_t})^2}{UERE^2}} \quad (4.77)$$

- GDOP (Geometric Dilution of Precision), está constituida por cuatro componentes: tiempo, posición horizontal, posición vertical y posición tridimensional. Cuando el valor del GDOP es pequeño indica que el volumen definido por los satélites dentro de la ventana es grande y por consecuencia la configuración satelital, tiene una buena geometría. El GDOP, se entiende como:

$$GDOP = \frac{1}{vol.piramide} \times 100 \quad (4.78)$$

Y se puede expresar como:

$$GDOP = \sqrt{PDOP^2 + TDOP^2} \quad (4.79)$$

O también como:

$$\sqrt{\frac{(\sigma_{u_x})^2 + (\sigma_{u_y})^2 + (\sigma_{u_z})^2 + (\sigma_{u_t})^2}{UERE^2}} \quad (4.80)$$

Postproceso en las observaciones GPS

Las estaciones GPS permanentes, necesitan de un análisis preliminar con el fin de verificar diariamente que funcionen de manera correcta y que la transmisión de datos sea continua, así como para observar cambios o anomalías en los datos, debido a perturbaciones del sitio y mal funcionamiento en los equipos. Este análisis se realiza por medio de un archivo, el cual contiene la información del tiempo en que se inicia y se termina la observación, las horas de duración de la sesión, el total de satélites observados, etc.

Para el caso de las estaciones GPS temporales, el análisis consiste en revisar que el equipo no haya sufrido ningún cambio en su posición al término de la sesión ya que es responsabilidad del operador el manejo del equipo y el almacenamiento de los datos en un archivo, además es necesario hacer una inspección visual de los datos, es decir, que los datos tengan un comportamiento constante ya que un salto repentino podría indicar una perturbación local y/o mal funcionamiento del equipo para ambos tipos de estaciones.

El equipamiento GPS debe ir conectado a una computadora que contenga un software capaz de capturar la información cruda (RAW). Esta información es almacenada y posteriormente se debe procesar y comparar apoyándose en un programa que tenga los ficheros RINEX, los cuales incluyen correcciones diferenciales.

5.1. Recolección de datos y el formato RINEX

Los datos obtenidos en campo con GPS proporcionan información sobre la posición, aunque con error que es minimizado por medio de un postproceso realizado con un software especializado. Existe una gran variedad de paquetes comerciales para procesar datos GPS y también paquetes desarrollados de

manera independiente. Algunas de las compañías que se especializan en desarrollar estos paquetes se basan principalmente en un procesamiento diferencial, teniendo a: Trimble, Leica, Garmin, Magellan, por mencionar algunos.

Para un fácil intercambio de datos GPS, el Instituto Astronómico de la Universidad de Berna propuso el formato RINEX (Receiver Independent Exchange Format), el cual se recomendó como formato estándar de intercambio de archivos GPS (Gurtner y Estey, 2007).

El formato RINEX implica que los datos binarios de cada receptor, se puedan transformar durante el proceso de descarga a un formato independiente, pero a la vez universal, como lo es ASCII, brindando la oportunidad de poder utilizarlo en diferentes softwares y de intercambiar datos provenientes de otros receptores y constelaciones. El formato ASCII, esta compuesto por tres ficheros, donde cada uno desempeña un papel específico, debido a la información que contienen. Estos ficheros pueden nombrarse de acuerdo a una convención de nomenclatura “SSSSDDDF.YYT”, donde los primeros cuatro dígitos corresponden al ID de la estación *SSSS*, los tres dígitos siguientes, corresponden al día del año de la observación en términos del día Juliano *DDD*, el siguiente dígito *F*, corresponde a la secuencia de archivos, es decir si es diaria u horaria, *YY* definen el año, y el dígito *T* se refiere al tipo de archivo, el cual puede ser de navegación, de observación, o meteorológico.

Cada tipo de archivo está conformado, de manera general por una sección de encabezado y una sección de datos; la sección de encabezado como lo dice su nombre, se encuentra al inicio del archivo, y contiene información general, como se ilustra en la tabla (5.1).

NIVEL DE ENCABEZADO	DESCRIPCIÓN
rinex version/type	versión RINEX (2.11 3.0) /tipo de archivo: m (dato meteorológico) n (navegación) o (observación)
pgm/ run by / date	nombre del programa / nombre de la agencia / fecha de creación.
comment	comentarios
marker name	nombre de la estación
marker number	número de la estación
#/ types of observation	número de observaciones / tipo de observaciones
sensor mod / type /acc	descripción del sensor meteorológico modelo /tipo / exactitud y tipo de observación.
sensor pos xyz /h	posición aproximada del sensor, coordenadas geocéntricas x,y,z (ITRF o WGS84)/altura elipsoidal, tipo de observación.
end of header	último registro en la sección del encabezado.

Tabla 5.1: Estructura general del encabezado de un archivo RINEX.

El cuerpo contiene información de distintos tipos, dependiendo el archivo que se esté analizando:

- Archivo de observación.

Los ficheros de observación (Anexo I) contienen información sobre la época de observación, el número de satélites observados, el PRN para cada satélite, y los observables descritos en el capítulo 3.

- Archivo de mensaje de navegación.

Los archivos de navegación contienen información sobre el tiempo, parámetros orbitales y sus perturbaciones e información sobre la salud del satélite (Anexo II).

- Archivo de datos meteorológicos.

El encabezado contiene información del programa, en el cual fue compilado, el tipo de observables meteorológicos y el tipo de sensores. En la sección de datos, contiene información atmosférica (Anexo III).

Meteorología

La atmósfera es una mezcla de gases, la cual data desde los orígenes de la Tierra, formandose a partir de las nubes de gases y polvo provenientes de las erupciones volcanicas, de la interacción con los océanos, y del aporte de cuerpos celestes provenientes del espacio exterior.

Altitud(km)	Distribución Térmica	Composición Físico-Química	Propagación	Técnico	Campo Magnético
10000	Exósfera	Plasmasfera	Ionosféra	Alta Atmósfera	Magnetósfera
	Termósfera	Magnetósfera			
1000		Ionosféra			
100	Mesósfera				
10	Estratósfera	Ozonosfera	Baja Atmósfera	Dinamósfera	
		Homósfera			
	Tropósfera		Tropósfera		

Tabla 6.1: Distribución de las capas atmosféricas de acuerdo a sus características.

Para motivos de estudio la atmósfera se divide en un número variable de capas esféricas concéntricas, las cuales tienen propiedades físicas y químicas diferentes presentando un patrón general que consiste en tres capas relativamente calientes, las cuales se sitúan cerca de la superficie de la Tierra, entre los 40 km y 60 km y por encima de los 120 km; separadas por dos capas relativamente frías situadas entre los 10 km y 30 km y entre los 80 km y 100 km (Šverko Navarrete, 2012). Una clasificación en función de la composición físico-química, basándose en los procesos que en ella se producen se muestra en la tabla 6.1.

En meteorología, el aire se trata como si fuese una mezcla de dos gases ideales, aire seco y húmedo (vapor de agua); pudiendo expresar el contenido de éste último, como índices de humedad:

- Presión de vapor de agua: es la presión parcial debida al vapor de agua, en relación a la presión atmosférica total.
- Razón de mezcla: se refiere a una relación entre la masa de vapor de agua M_v , con respecto a la masa del aire seco M_d , lo cual equivale a la proporción de la densidad de vapor de agua ρ_v y la densidad del aire seco ρ_d ;

$$r = \frac{M_v}{M_d} = \frac{\rho_v}{\rho_d} \quad (6.1)$$

La cual mide la cantidad de vapor de agua que está presente en una parcela de aire, considerando la presión atmosférica p_{atm} como la suma de la presión del aire seco p_d y la tensión del vapor de agua e . La ecuación (6.1) se puede expresar en función de la presión atmosférica, y en función de la tensión de vapor, teniendo:

$$r = \frac{M_v}{M_d} = \frac{\rho_v}{\rho_d} = \frac{\frac{e}{R_v T}}{\frac{p_d}{R_d T}} = \frac{R_d e}{R_v p_d} = \frac{R_d}{R_v} \left(\frac{e}{p_{atm} - e} \right) = \varepsilon \frac{e}{p_d} \quad (6.2)$$

Donde:

$$\varepsilon = \frac{R_d}{R_v} = \frac{m_v}{m_d} = 0.622 \frac{g_v}{g_d} \quad (6.3)$$

Y m_v y m_d son los pesos moleculares del vapor de agua y del aire seco respectivamente, teniendo como unidades de la razón de mezcla $\frac{g_v}{g_d}$ (gramos de vapor de agua por gramo de aire seco).

- Humedad relativa, la cual se refiere a la cuantificación de humedad que contiene una masa de aire, en relación con la máxima humedad que podría admitir sin producir una condensación, indicando el porcentaje de saturación.

$$HR = \frac{r}{r_s} * 100 = \frac{e_v}{e_s} * 100 \quad (6.4)$$

6.1. Vapor de agua precipitable (PWV)

El agua precipitable es una medida del contenido de vapor de agua del aire, que puede ser expresado como la profundidad a la cual el agua podría estar en un área unitaria si todo el vapor de agua en una columna desde la superficie a un nivel superior se condensa.

El cálculo de la altura de agua precipitable se puede definir a partir de la masa total de vapor de agua, teniendo:

$$dM_v = \rho_v dh \quad (6.5)$$

De donde ρ_v es la densidad del vapor de agua, de esta forma, el cálculo de la masa total del vapor de agua M_v será el valor integrado desde superficie hasta una altura h de la columna (tope de la atmósfera).

$$M_v = \int_0^h \rho_v dh \quad (6.6)$$

teniendo

$$dh = -\frac{dp}{\rho g} \quad (6.7)$$

Además la masa total M_v , se puede expresar en términos de la razón de mezcla r , teniendo:

$$M_v = -\frac{1}{g} \int_0^{P(h)} \frac{\rho_v}{\rho} dp = -\frac{1}{g} \int_0^{P(h)} r dp \quad (6.8)$$

Pudiendo expresar al contenido de vapor de agua en una columna vertical de base unitaria desde una altura z hasta una altura h , de la siguiente manera:

$$IWV = \int_z^h \rho_v(z) dz \quad (6.9)$$

Llegando finalmente al cálculo de la cantidad de vapor de agua precipitable integrado (*IPWV*, *Integrated Precipitable Water Vapour*), en la dirección cenital del observador, que se puede expresar como:

$$IPWV = \frac{IWV}{\rho} = \frac{\int_z^h \rho_v(z) dz}{\rho} = \frac{1}{\rho R_v} \int_h^\infty \frac{e_v}{T} dz \quad (6.10)$$

Donde ρ es la densidad del agua líquida.

6.2. Meteorología con GNSS

Las capas atmosféricas producen efectos sobre las señales GNSS, presentando un retraso en la transmisión de la señal. Este retraso es detectable en el observable de la fase de la portadora GPS, además de ser el punto de partida para el cálculo de vapor de agua precipitable.

De acuerdo a Šverko Navarrete (2012) el uso de la tecnología GPS en el campo de la meteorología, consiste en la estimación del vapor de agua precipitable integrado (de una columna total) sobre un sitio en particular de la superficie terrestre, mediante el análisis de la variación del índice de refracción en la parte baja de una atmósfera neutra.

Debido a que la tropósfera constituye una fuente de error en los observables GPS, suele minimizarse el efecto troposférico apoyándose en modelos de corrección de refracción troposférica. Por otra parte, en el campo de la meteorología, este error juega un papel fundamental, puesto que proporciona información sobre el contenido de vapor de agua.

El retraso en la señal GPS debido a la región troposférica, es causado por las características del medio en que se propaga, teniendo mayor influencia el índice de refracción y por ende, la refractividad atmosférica, puesto que se encuentra en función de variables meteorológicas, como presión, temperatura y humedad relativa.

De acuerdo a Romero Campos *et al.* (2009) el vapor de agua precipitable PWV , se puede obtener del retardo húmedo cenital, utilizando la siguiente expresión:

$$PWV = \Pi ZWD \quad (6.11)$$

Donde Π , es una constante de proporcionalidad adimensional (Bevis *et al.*, 1992), la cual se puede escribir de la siguiente manera:

$$\Pi = \frac{10^6}{\rho R_v \left[\frac{k_3}{T_m} + k'_2 \right]} \quad (6.12)$$

Donde:

- ρ : Es la densidad del agua líquida.
 R_v : Es la constante específica del gas para el vapor de agua en milibares.
 $k'_2 = k_2 - mk_1$: Factor de ajuste.
 k_1, k_2, k_3 : Constantes de refractividad.
 $m = \frac{M_w}{M_d}$: Es el cociente entre las masas molares del vapor de agua y del aire seco.
 T_m : Es la temperatura media del vapor de agua de la atmósfera (representada por N niveles) (Davis *et al.*, 1985). Se aproxima como:

$$T_m = \frac{\int \frac{e}{T} dz}{\int \frac{e}{T^2} dz} \quad (6.13)$$

Donde e es la presión parcial de vapor de agua, T es la temperatura y las integrales de línea se calculan a lo largo de una trayectoria vertical que atraviesa la atmósfera, teniendo que T_m varía en función del tiempo, pudiendo estimarse usando medidas de la temperatura superficial, mediante modelos numéricos de clima (Bevis *et al.*, 1992), o como una integral discreta, teniendo:

$$T_m = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{e_i}{T_i} \Delta z_i}{\sum_{i=1}^n \frac{e_i}{T_i^2} \Delta z_i} \quad (6.14)$$

$$T_m = \frac{\sum_{i=1}^n \left[\frac{\frac{e^{(i+1)}}{T^{(i+1)}} + \frac{e_i}{T_i}}{2} (z_{(i+1)} - z_i) \right]}{\sum_{i=1}^n \left[\frac{\frac{e^{(i+1)}}{T^{(i+1)^2}} + \frac{e_i}{T_i^2}}{2} (z_{(i+1)} - z_i) \right]} \quad (6.15)$$

Donde los subíndices i e $i + 1$ representan la base y el tope respectivamente de cada nivel del perfil atmosférico de un sondeo.

Como suele ocurrir en trabajos de este tipo, muchas veces no se cuenta con estaciones de radiosondeo en el sitio en el cual se encuentra la estación GPS, o la resolución temporal de los datos de radiosondeo es muy baja. Obtener la temperatura media en tiempo real resulta casi imposible siguiendo el procedimiento descrito anteriormente; por lo cual, la temperatura media se suele determinar mediante un análisis estadístico de los perfiles verticales de varias estaciones de radiosondeo en un periodo de tiempo no menor a un año, permitiendo elegir un valor constante para T_m , independiente de la región y época del año. Aunque si bien esta relación no resulta precisa, da la pauta para generar un modelo en función de la temperatura en superficie, dato que se obtiene del archivo RINEX meteorológico.

Siguiendo este procedimiento, algunos autores han desarrollado modelos para determinar valores de temperatura media (T_m) a partir de datos de temperatura en superficie (ver tabla 6.2), los cuales fueron desarrollados a partir de datos de una determinada región.

El modelo de *Bevis* se desarrolló con datos de estaciones de radiosondeo, situadas desde Florida hasta Alaska, el modelo de *Mendes* se desarrolló con datos de la región Europea, el modelo de *Solbrig* se desarrolló con datos de Alemania, el modelo de *Schueler* se desarrolló con datos de Alemania, el modelo de *Bai* se desarrolló con datos de Australia, el modelo de *Raju* se desarrolló con datos de la India y el modelo de *Sapucci* se desarrolló con datos de Brasil.

Modelo	Temperatura media T_m (°K)
Bevis <i>et al.</i> (1992)	$T_m = 70.2 + 0.72T_s$
Mendes <i>et al.</i> (2000)	$T_m = 50.4 + 0.789T_s$
Solbrig (2000)	$T_m = 54.7 + 0.77T_s$
Schueler <i>et al.</i> (2001)	$T_m = 86.9 + 0.647T_s$
Bai (2005)	$T_m = 70.03 + 0.726T_s$
Raju <i>et al.</i> (2005)	$T_m = 62.57 + 0.75T_s$
Sapucci (2001)	$T_m = 0.558T_s + 0.0105P_s + 110.578$

Tabla 6.2: Modelos de temperatura media

Para el presente estudio se generó un modelo en función de la temperatura en superficie (Fig. 6.1), y temperatura media (Fig. 6.2) empleando datos de 2016 de las estaciones de Radiosondeo 76805 ubicada en Acapulco, 76595 en Cancún, 76644 en Yucatan, 76612 en Guadalajara, 76654 en Colima, 76458 en Sinaloa, 76225 en Chihuahua y 76405 en Baja California Sur.

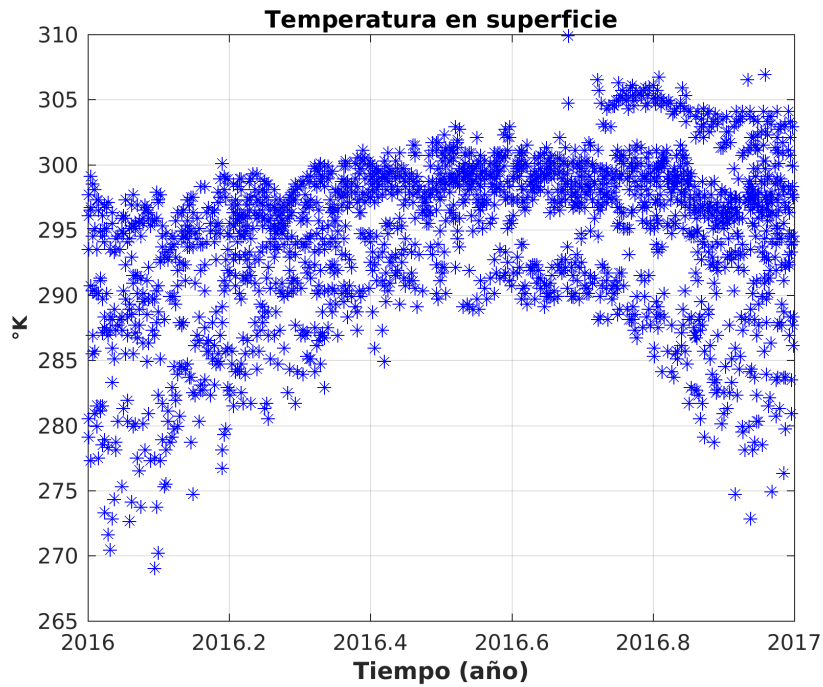


Figura 6.1: Distribución de temperatura en superficie de las estaciones 76805, 76595, 76644, 76612, 76654, 76458, 76225 y 76405.

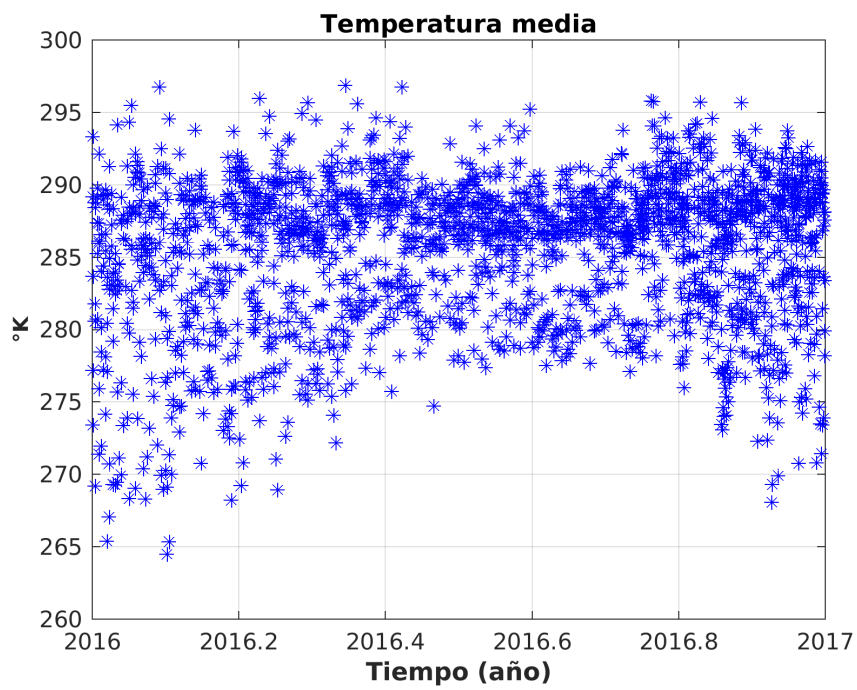


Figura 6.2: Distribución de temperatura media de la columna de vapor de agua de las estaciones 76805, 76595, 76644, 76612, 76654, 76458, 76225 y 76405.

Con los datos graficados en las figuras 6.1 y 6.2 se efectúa un ajuste lineal por mínimos cuadrados, para encontrar la recta que mejor se ajuste al conjunto de datos, los cuales muestran la correlación existente entre la temperatura media y temperatura en superficie.

Considerando un conjunto de observaciones para la variable “y”

$$\begin{aligned}y_1 &= b + mx_1 \\y_2 &= b + mx_2 \\&\vdots \\y_n &= b + mx_n\end{aligned}\tag{6.16}$$

Dicho sistema de ecuaciones se puede expresar en forma matricial, como:

$$\underbrace{\begin{pmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_n \end{pmatrix}}_Y = \underbrace{\begin{pmatrix} 1 & x_1 \\ 1 & x_2 \\ \vdots & \vdots \\ 1 & x_n \end{pmatrix}}_A \underbrace{\begin{pmatrix} b \\ m \end{pmatrix}}_X\tag{6.17}$$

$$Y = AX\tag{6.18}$$

Empleando álgebra matricial, para despejar la matriz X, se tiene:

$$A^T * Y = A^T * A * X\tag{6.19}$$

$$(A^T * A)^{-1} * (A^T * Y) = (A^T * A)^{-1} * (A^T * A) * X\tag{6.20}$$

$$X = (A^T * A)^{-1} * (A^T * Y)\tag{6.21}$$

Con lo cual se obtuvo la recta que mejor se ajusta al conjunto de datos (Fig. 6.3). Los datos de radiosondeos con los cuales se efectuó el ajuste por mínimos cuadrados fueron truncados a una altura de 20 km, desechando aquellos registros que no alcanzaron dicha altura, y realizando el análisis con

los datos captados desde la superficie hasta los 20 km, con la finalidad de tener un registro uniforme el cual no presentara ruido debido a la variación de alturas.

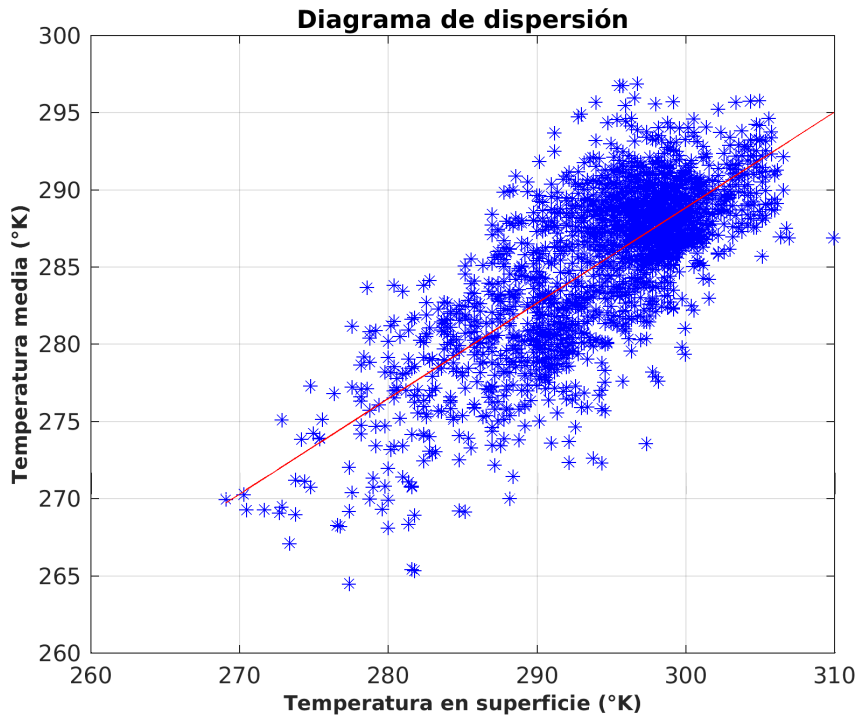


Figura 6.3: Recta de ajuste con mínimos cuadrados para obtener la correlación existente entre la temperatura media de la columna de vapor de agua y la temperatura en superficie.

Teniendo una correlación de 74.73% entre ambas variables, con lo cual, mediante la pendiente y ordenada al origen de la recta de ajuste se obtiene el siguiente modelo:

$$T_m = 103.4321 + 0.6181T_s \quad (6.22)$$

6.2.1. Elementos de las estaciones GPS-Meteorológicas

De acuerdo a Renom (2011), para la ubicación de una estación meteorológica, se deben aplicar las siguientes consideraciones:

- El instrumental a ubicar en la estación meteorológica debe de instalarse en un área de suelo, no menor a 25x25 m, el suelo debe de estar cubierto de pasto corto o una superficie propia del lugar.

- No deben de existir pendientes abruptas cerca de la estación y tampoco ubicarse en una depresión del terreno.
- El lugar debe de estar alejado de árboles, edificios, paredes y cualquier otro tipo de obstáculos, teniendo sumo cuidado con el pluviómetro, ya que la distancia entre éste y cualquier obstáculo debe de ser de por lo menos 2 veces la altura del obstáculo.

En la estación meteorológica se ubicarán los siguientes instrumentos:

- Anemómetro (para medir la velocidad del viento).
- Pluviómetro (para medir la cantidad de lluvia).
- Pluviógrafo (para medir la intensidad de la lluvia).
- Heliofanógrafo / Piranómetro (para medir la radiación solar).
- Casilla meteorológica, la cual contiene:
 - Par Psicrométrico (termómetro seco y termómetro húmedo).
 - Termómetro de máxima y mínima (para registrar la temperatura máxima y mínima).
 - Evaporímetro (para medir la evaporación potencial).
 - Termohigrógrafo (para la medición de temperatura y humedad relativa).
- Oficina meteorológica, la cual contiene:
 - Barómetro (para la medición de presión atmosférica)
 - Barógrafo (para la medición y trazo de la presión atmosférica)

Analizando el caso particular de las estaciones GPS-Met, además de los elementos mencionados, se incorporan:

- Paquetes de sensores meteorológicos de superficie.
- Monumentos de calidad geodésica.
- Sistema de respaldo de energía.
- Infraestructura de telecomunicaciones.
- Antena receptora de señal GPS.
- Web cam para determinar la evolución de nubes y precipitación.
- Internet para la transferencia en tiempo real de los datos obtenidos.

Los datos que se emplearon para el presente estudio se pueden clasificar en tres grupos principales:

- **Datos de radiosondeo**, los cuales se tomaron de la red de radiosondeos publicada en el portal de la Universidad de Wyoming (Fig. 7.1), los cuales se emplearon para el cálculo de vapor de agua, así como para la generación del modelo T_m necesario en este trabajo para el cálculo de vapor de agua empleando datos GNSS.



Figura 7.1: Distribución de estaciones de Radiosondeo, tomada de <http://weather.uwo.edu/upperair/sounding.html>.

- **Datos RINEX**, los cuales se tomaron de estaciones GPS-Met pertenecientes a la red GPS TLALOC-Net (Fig. 7.2) para el cálculo de vapor de agua precipitable mediante modelos teóricos.



Figura 7.2: Estaciones en la República mexicana de la red TLALOC-Net, tomada de <http://tlalocnet.udg.mx/tlalocnetsac/gsacapi/site/search>.

- **Datos de PWV**, los cuales se tomaron de los archivos generados por la red SuomiNet (Fig. 7.3), empleados, para la comparación y validación de los resultados obtenidos.

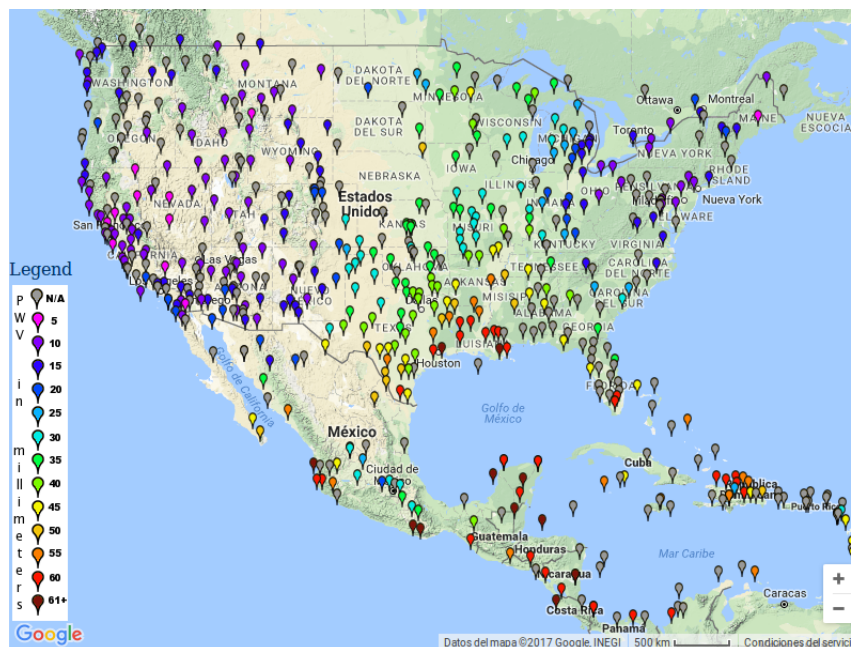


Figura 7.3: Estaciones que componen la red SuomiNet, tomada de <http://www.suominet.ucar.edu/>, en donde los globos de colores indican el contenido de vapor de agua precipitable en mm.

7.1. Cálculo de vapor de agua mediante GNSS

El cálculo de vapor de agua con datos provenientes de estaciones GPS se puede realizar de dos maneras, la primera es considerando los observables GPS, los cuales se encuentran en el archivo RINEX de observación y la segunda es empleando datos meteorológicos, los cuales se encuentran en el archivo RINEX meteorológico.

El presente estudio se centra en el cálculo de vapor de agua precipitable empleando datos del archivo RINEX meteorológico (humedad relativa, temperatura y presión), así como los modelos desarrollados para la región húmeda de la tropósfera (ver sección 4.2.2).

Existen estaciones GNSS que no cuentan con archivos RINEX meteorológicos, debido al enfoque de la estación de trabajo, algunas son destinadas únicamente al posicionamiento y no a cuestiones meteorológicas, pudiendo solucionar ésta problemática si se utilizan datos de estaciones GPS-Met, principal motivo por el cual se emplean datos de la red TLALOC-Net, asegurando en primera instancia el contar con archivos RINEX meteorológicos, aunque se pueden presentar excepciones, debido a reparaciones del equipo que compone a la estación GPS, o por ser estaciones nuevas y que aún no se encuentran en pleno funcionamiento.

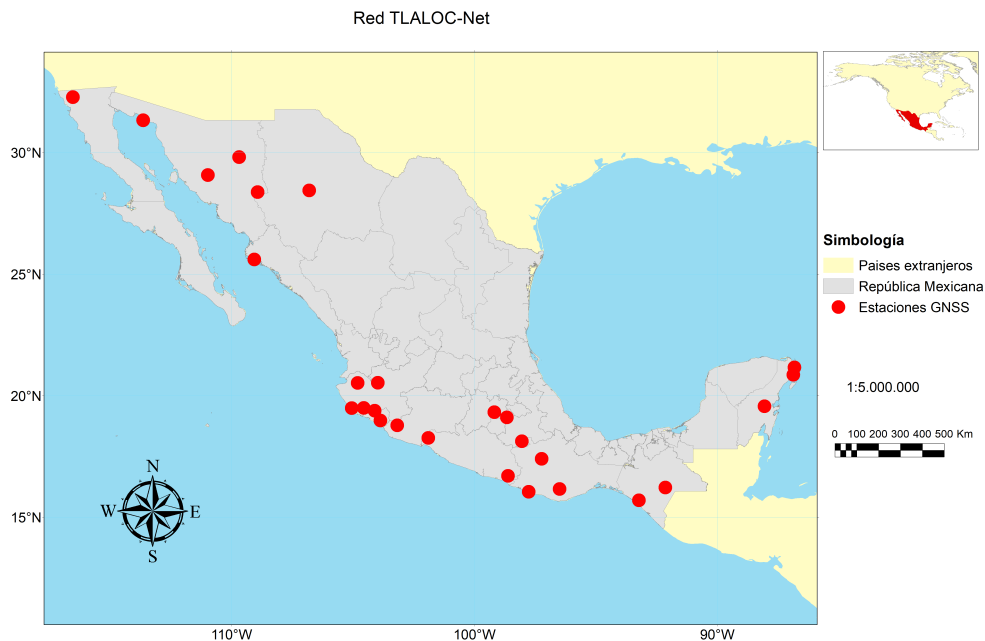


Figura 7.4: Estaciones de la red TLALOC-Net que cuentan con los tres archivos RINEX.

7. MÉTODOS Y DATOS

Realizando un análisis preliminar para desechar las estaciones que no cumplieran con los requisitos necesarios para el presente estudio, las estaciones disponibles de la red TLALOC-Net son las que se muestran en la figura (7.4).

Una de las características de la República mexicana, es la diversidad de climas que se pueden encontrar, teniendo climas tropicales en la zona sur, y de manera contrastante climas desérticos en la zona norte, así como climas templados, en la zona centro. Debido a que este estudio se propuso como una opción para efectuar el cálculo de vapor de agua en tiempo real, fue necesario considerar estaciones que contemplaran las diferentes regiones climáticas de México, conformando una red de estaciones, como se muestra en la figura (7.5).

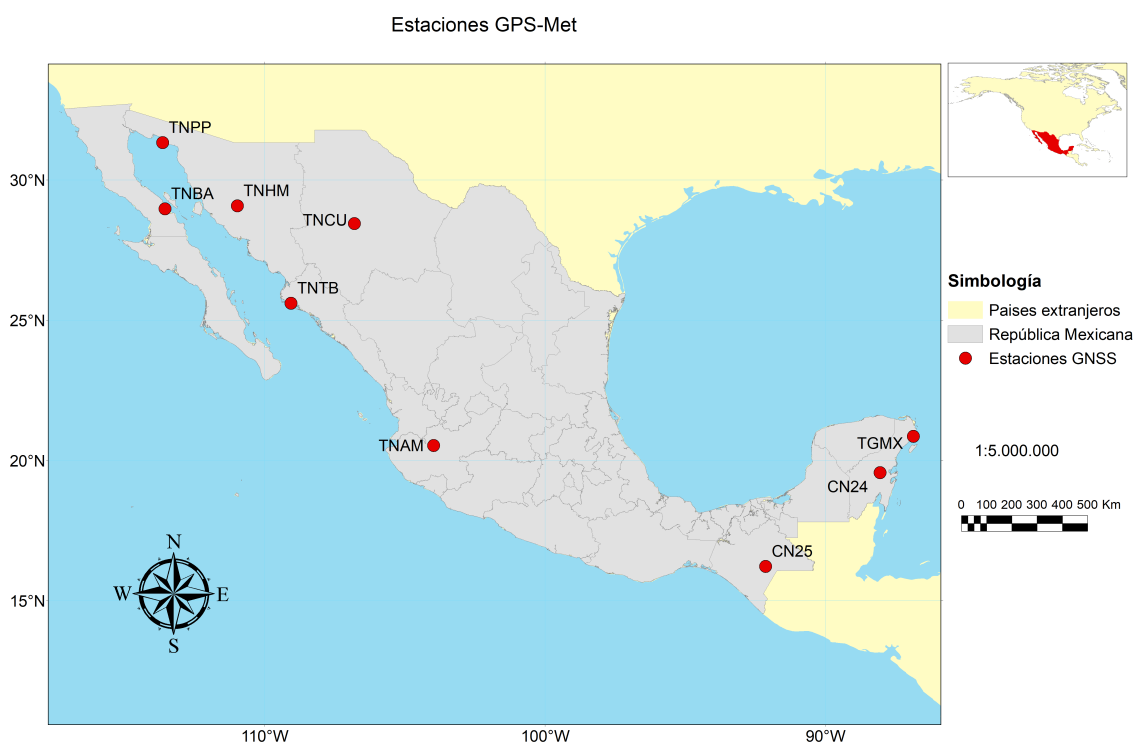


Figura 7.5: Estaciones GPS-Met de la red de estaciones TLALOC-Net empleadas en el presente estudio.

El estudio se realizó con datos referentes al año 2016, con la finalidad de tener suficientes datos para realizar un análisis cuidadoso de los resultados obtenidos. Como se mencionó en la sección 7.1 los datos que se requieren para iniciar el cálculo de vapor de agua, son presión, temperatura y humedad relativa de cada una de las estaciones a procesar, para este caso se muestran los datos de la estación TNCU ubicada en Chihuahua (7.6, 7.7 y 7.8).

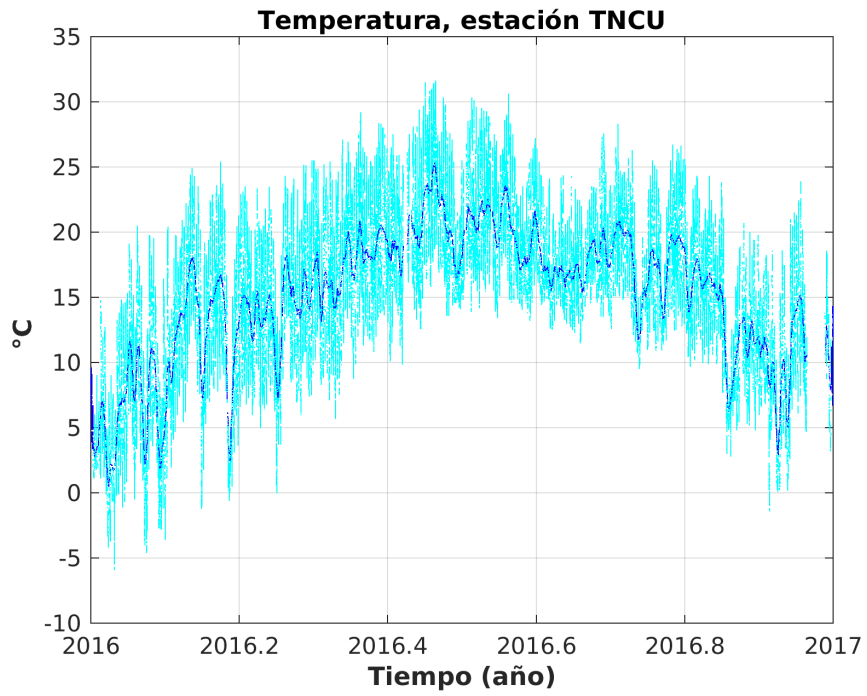


Figura 7.6: Datos de temperatura del archivo RINEX meteorológico de la estación TNCU, para el año 2016.

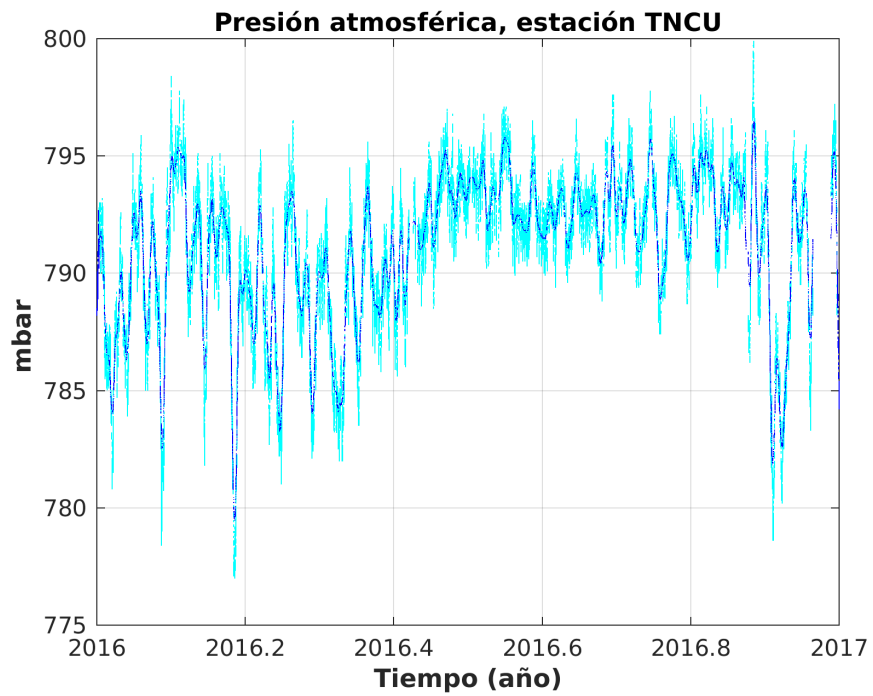


Figura 7.7: Datos de presión del archivo RINEX meteorológico de la estación TNCU, para el año 2016.

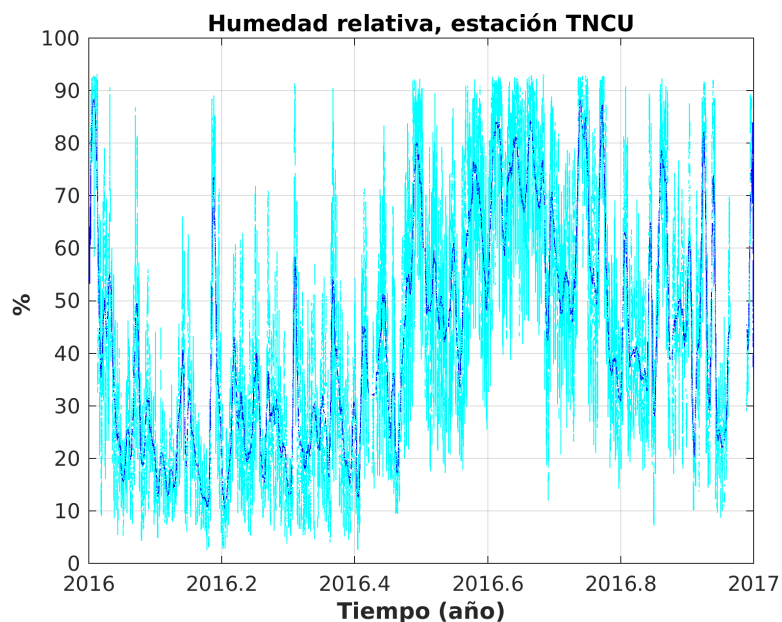


Figura 7.8: Datos de humedad relativa del archivo RINEX meteorológico de la estación TNCU, para el año 2016.

Datos con los cuales se obtiene el retardo húmedo cenital (ZWD), el cual se muestra en las figuras (7.9, 7.10, 7.11, y 7.12). Los cálculos se realizaron a partir de los modelos desarrollados en la sección (4.2.2.1).

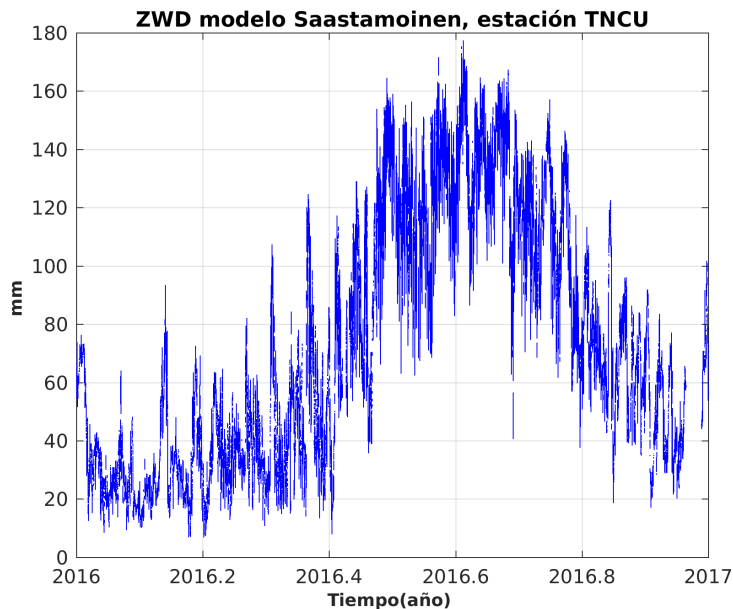


Figura 7.9: Resultados del retardo húmedo cenital (ZWD), empleando el modelo de Saastamoinen, para la estación TNCU, para el año 2016.

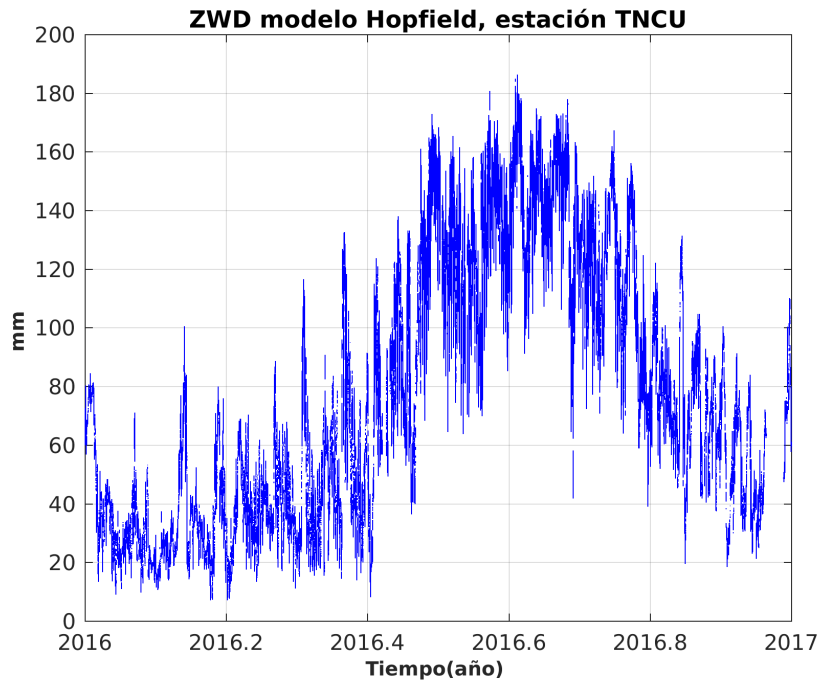


Figura 7.10: Resultados del retardo húmedo cenital (ZWD), empleando el modelo de Hopfield, para la estación TNCU, para el año 2016.

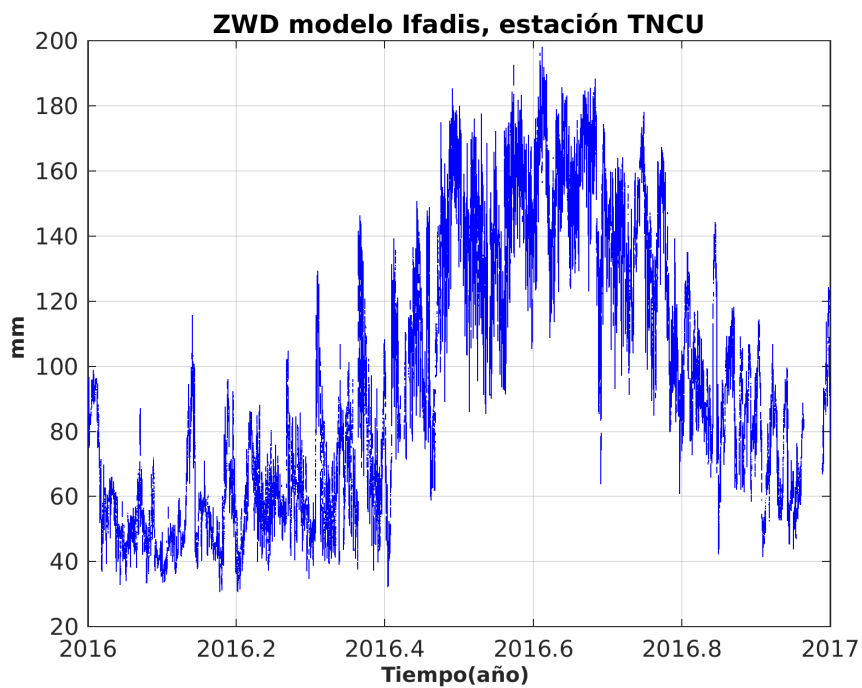


Figura 7.11: Resultados del retardo húmedo cenital (ZWD), empleando el modelo de Ifadis, para la estación TNCU, para el año 2016.

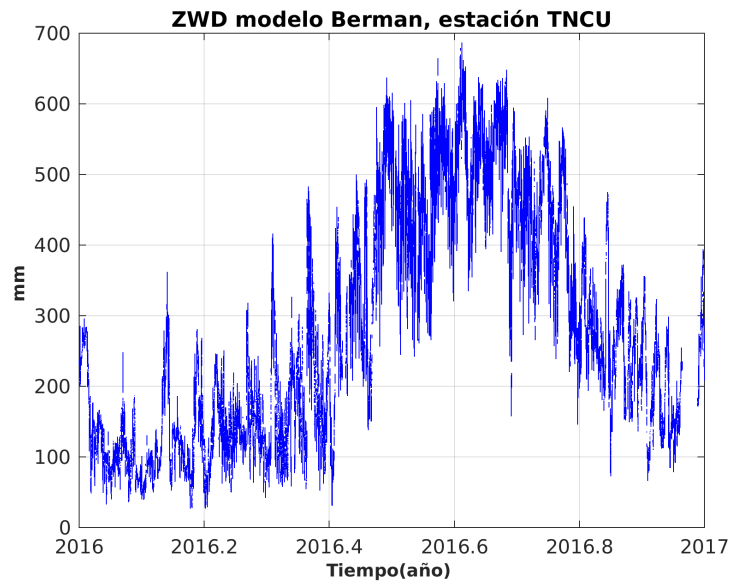


Figura 7.12: Resultados del retardo húmedo cenital (ZWD), empleando el modelo de Berman, para la estación TNCU, para el año 2016.

En la figura 7.13 se muestra una comparación entre los modelos de Berman, Hopfield, Ifadis y Saastamoinen, encontrando en primera instancia que el modelo de Berman presenta una gran variación con respecto a los demás modelos.

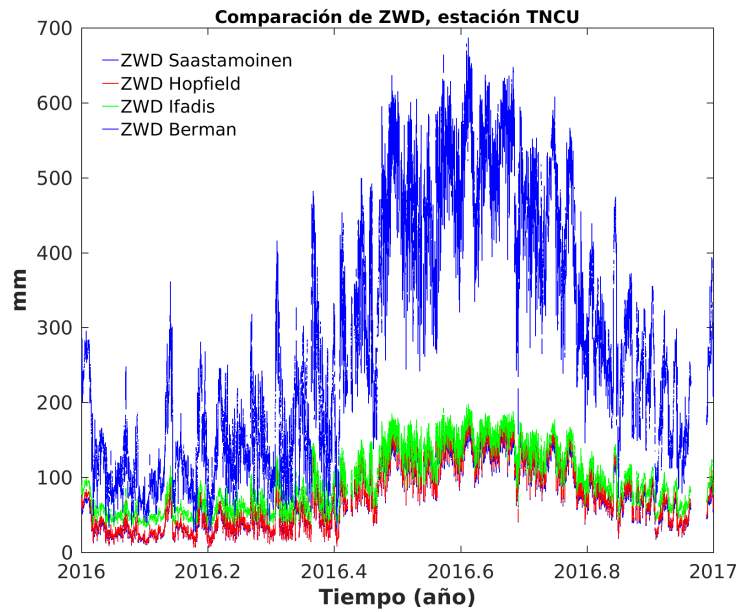


Figura 7.13: Comparación de los resultados obtenidos de ZWD, empleando los modelos de Berman (Azul), Hopfield (Rojo), Ifadis (Verde) y Saastamoinen (Negro).

Empleando la ecuación (6.11), el modelo de temperatura media (6.22) desarrollado en la sección (6.2) y los resultados de retardo húmedo cenital obtenidos previamente, se obtiene el contenido de vapor de agua presente en la atmósfera, para una columna vertical sobre el zenit de la estación.

7.2. Cálculo de vapor de agua mediante radiosondeo

El presente estudio consideró datos del año 2016, de las siguientes estaciones de radiosondeo:

- 76805 Acapulco
- 76595 Cancún
- 76644 Yucatan
- 76612 Guadalajara
- 76654 Colima
- 76458 Sinaloa
- 76225 Chihuahua
- 76405 Baja California Sur

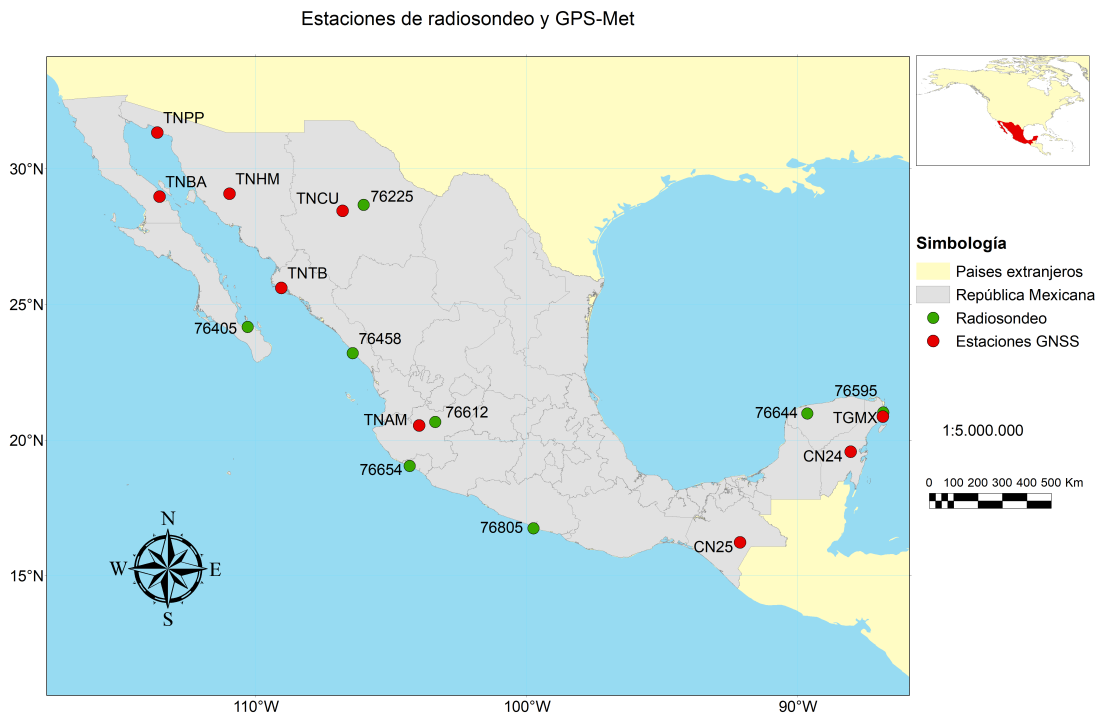


Figura 7.14: Estaciones de radiosondeo y GPS-Met empleadas en el presente estudio.

Las estaciones de radiosondeo se eligieron con la finalidad de realizar una validación de los resultados obtenidos con GNSS, por tal motivo se contemplaron aquellas estaciones de radiosondeo cercanas a las estaciones de GNSS, resultando insuficientes los datos provenientes de estas para realizar el modelo de temperatura media que se describe más adelante, siendo necesario agregar más estaciones al estudio. La configuración de las estaciones de radiosondeo elegidas, así como las estaciones de GNSS, se puede observar en la figura (7.14).

Las variables a utilizar del archivo de radiosondeo son: altura, presión, temperatura y humedad relativa, las cuales se registran en el archivo de radiosondeo a medida que la radiosonda se eleva, por lo tanto, lo que se obtiene de este archivo son perfiles atmosféricos diarios, como los que se observan en las figuras (7.15), (7.17), (7.16).

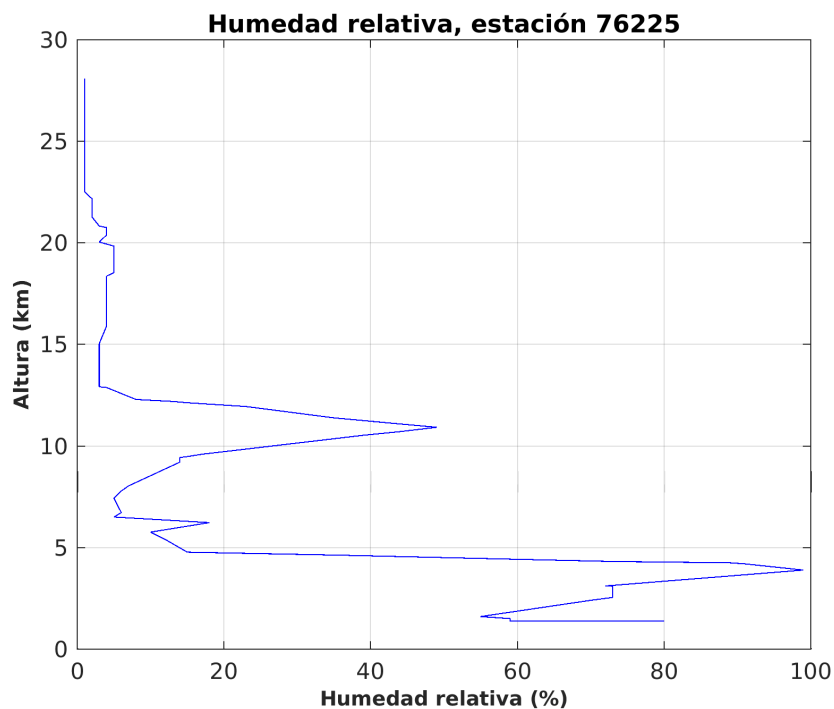


Figura 7.15: Humedad relativa en función de la altura, obtenida de la estación 76225 para el 31 de Diciembre de 2016 a las 12:00 hrs.

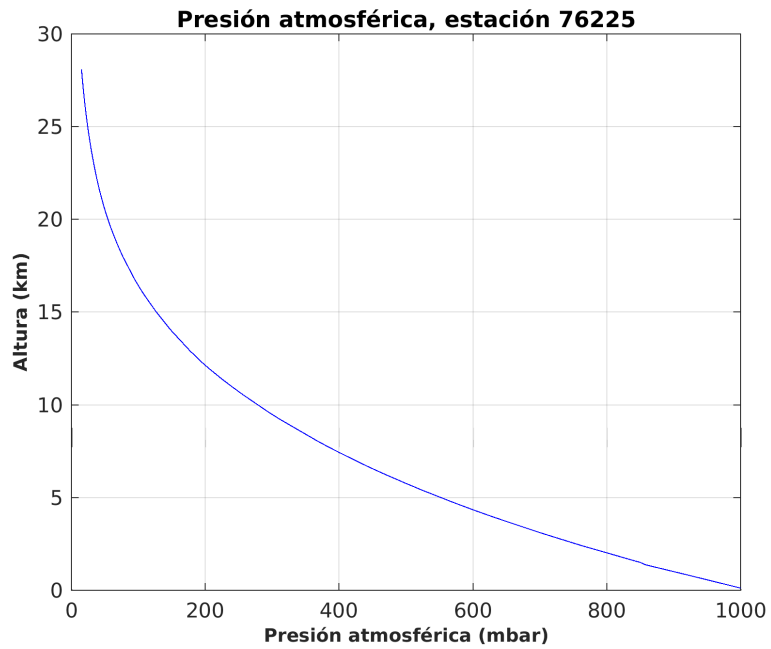


Figura 7.16: Presión atmosférica en función de la altura, obtenida de la estación 76225 para el 31 de Diciembre de 2016 a las 12:00 hrs.

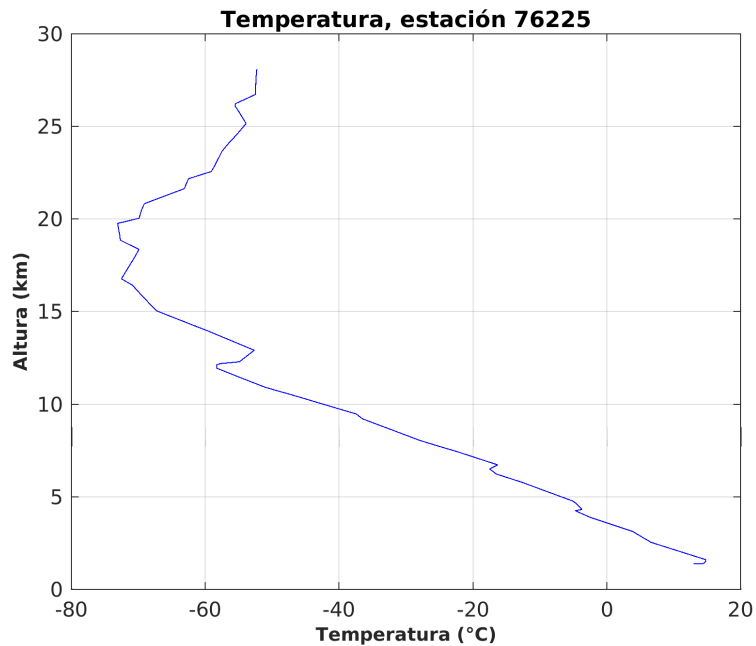


Figura 7.17: Temperatura en °C en función de la altura, obtenida de la estación 76225 para el 31 de Diciembre de 2016 a las 12:00 hrs.

Datos con los cuales se puede obtener el vapor de agua precipitable, teniendo como partida la ecuación (6.10), la cual se puede expresar de la siguiente manera:

$$IPWV = \frac{1}{R_v \rho} \sum \left(\frac{e}{T} \Delta z \right) \quad (7.1)$$

donde

$$R_v = \frac{R}{M_v} \quad (7.2)$$

de donde:

$$\begin{aligned} R_v &= \frac{m^3 * mbar}{K * kg} \\ e &= mbar \\ \Delta z &= m \\ \rho &= \frac{kg}{m^3} \end{aligned}$$

Los resultados obtenidos en el presente trabajo se pueden dividir en: Resultados obtenidos del cálculo de vapor de agua precipitable mediante modelos teóricos, empleando datos de la red TLALOC-Net (Figs. 8.1 a la 8.9), resultados obtenidos del cálculo de vapor de agua precipitable utilizando datos de radiosondeo (Fig. 8.10), la comparativa entre los resultados obtenidos con modelos teóricos y los resultados de vapor de agua precipitable calculados con Bernese, tomados de la red UCAR SuomiNet. Además se consideran los resultados obtenidos mediante datos de radiosondeo de aquellas estaciones que se encuentren cercanas a las estaciones GNSS (Fig. 8.11 a la 8.16).

8.1. Referentes al GNSS

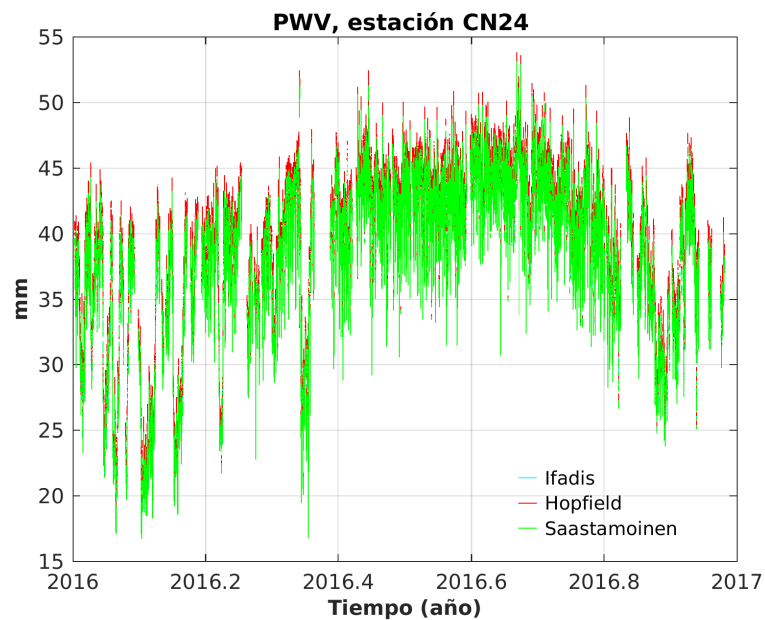


Figura 8.1: Vapor de agua precipitable utilizando datos RINEX de la estación CN24, y el modelo de temperatura media calculado con datos de radiosondeo, Ifadis(rojo), Hopfield(Verde), Saastamoinen(magenta).

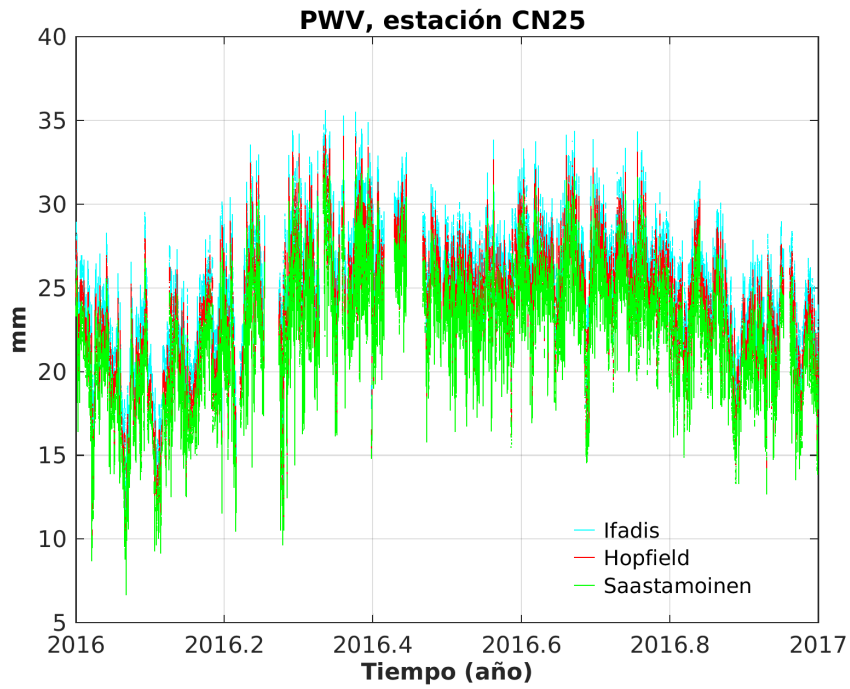


Figura 8.2: Vapor de agua precipitable utilizando datos RINEX de la estación CN25, y el modelo de temperatura media calculado con datos de radiosondeo, Ifadis(rojo), Hopfield(Verde), Saastamoinen(magenta).

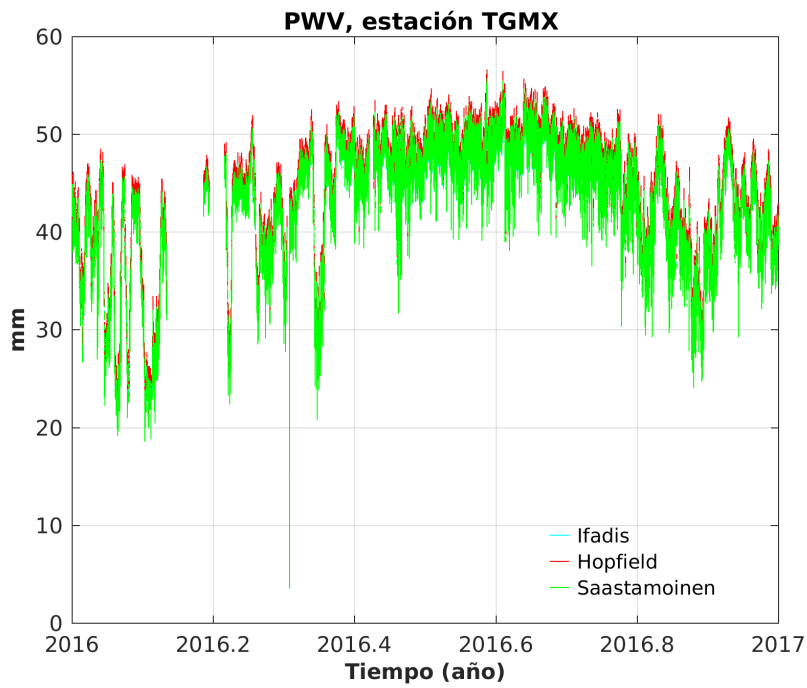


Figura 8.3: Vapor de agua precipitable utilizando datos RINEX de la estación TGMX, y el modelo de temperatura media calculado con datos de radiosondeo, Ifadis(rojo), Hopfield(Verde), Saastamoinen(magenta).

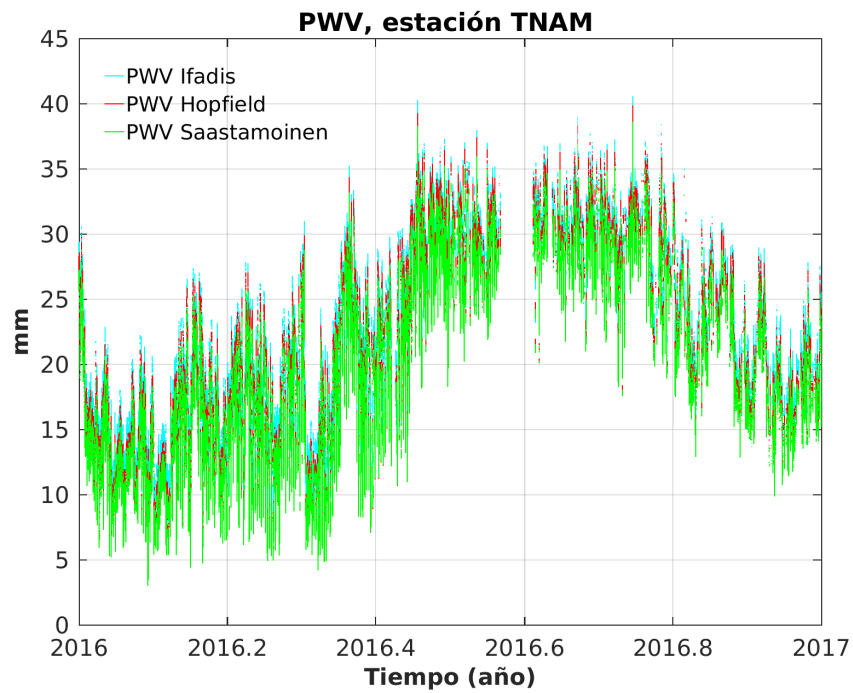


Figura 8.4: Vapor de agua precipitable utilizando datos RINEX de la estación TNAM, y el modelo de temperatura media calculado con datos de radiosondeo, Ifadis(rojo), Hopfield(Verde), Saastamoinen(magenta).

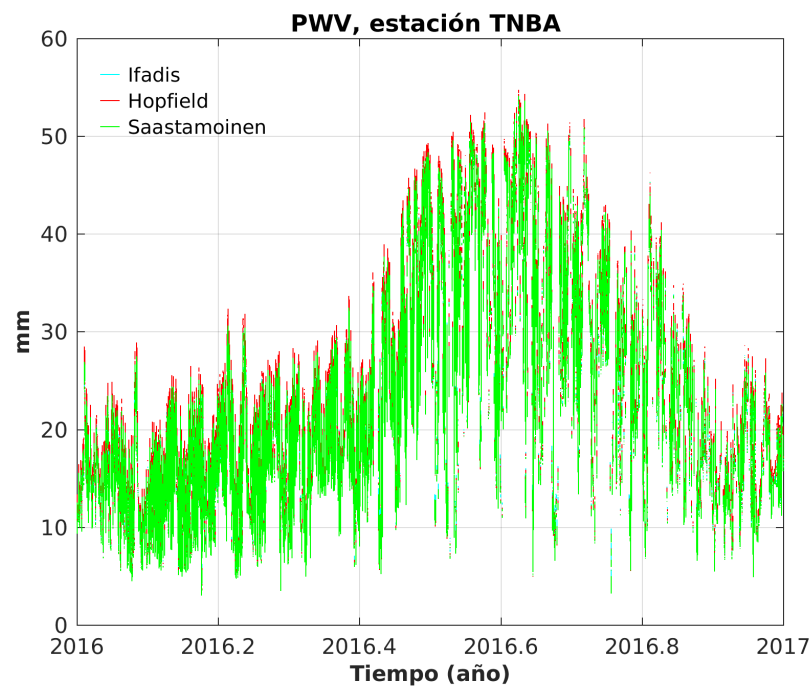


Figura 8.5: Vapor de agua precipitable utilizando datos RINEX de la estación TNBA, y el modelo de temperatura media calculado con datos de radiosondeo, Ifadis(rojo), Hopfield(Verde), Saastamoinen(magenta).

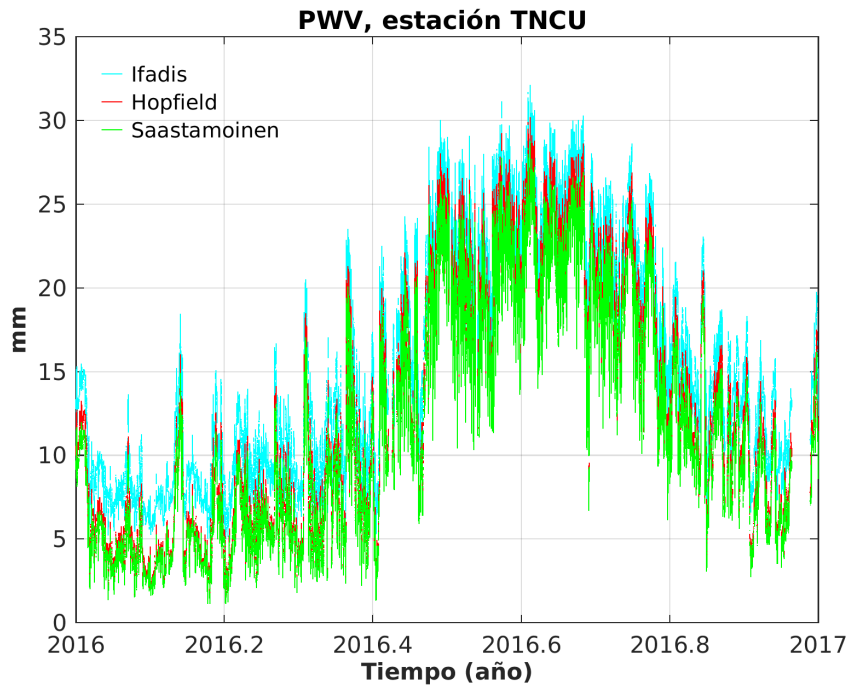


Figura 8.6: Vapor de agua precipitable utilizando datos RINEX de la estación TNCU, y el modelo de temperatura media calculado con datos de radiosondeo, Ifadis(rojo), Hopfield(Verde), Saastamoinen(magenta).

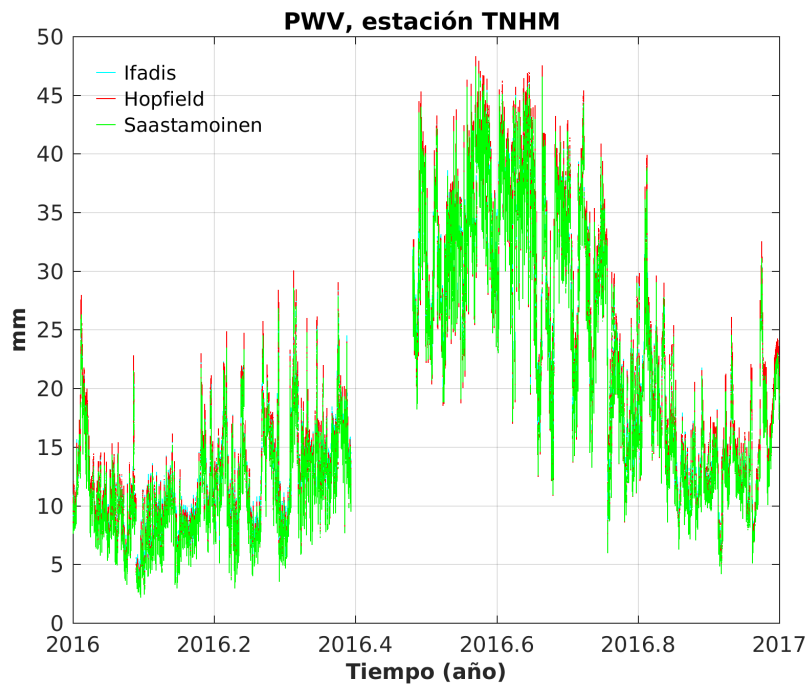


Figura 8.7: Vapor de agua precipitable utilizando datos RINEX de la estación TNHM, y el modelo de temperatura media calculado con datos de radiosondeo, Ifadis(rojo), Hopfield(Verde), Saastamoinen(magenta).

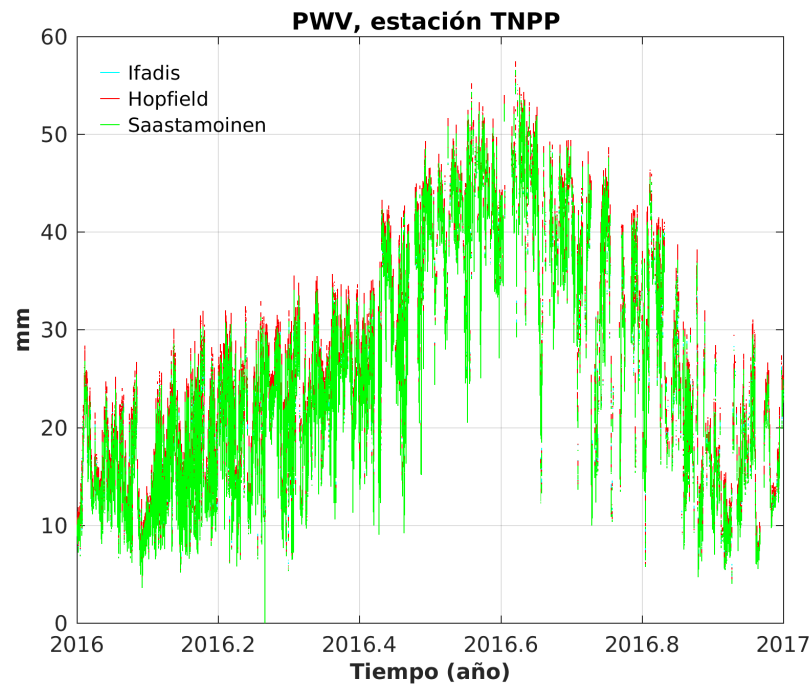


Figura 8.8: Vapor de agua precipitable utilizando datos RINEX de la estación TNPP, y el modelo de temperatura media calculado con datos de radiosondeo, Ifadis(rojo), Hopfield(Verde), Saastamoinen(magenta).

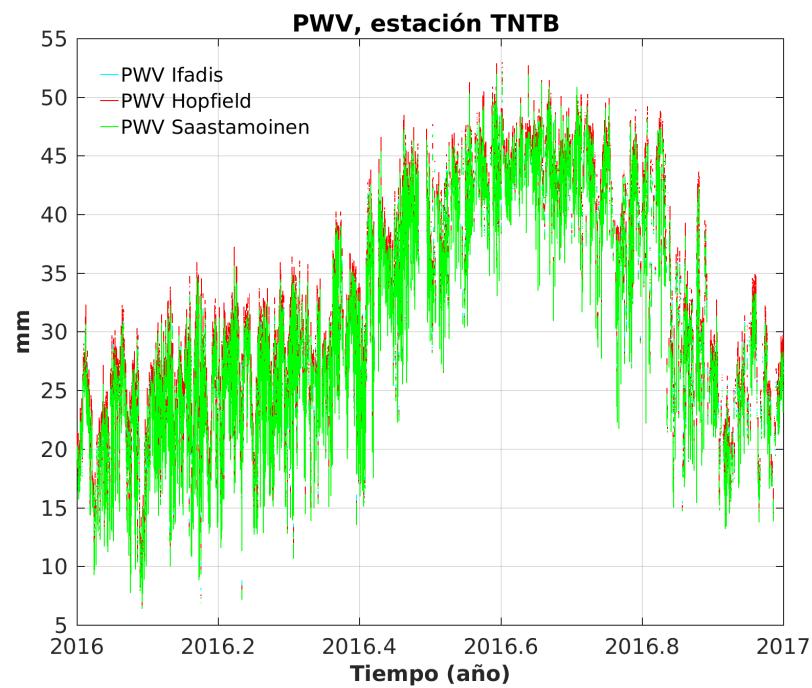


Figura 8.9: Vapor de agua precipitable utilizando datos RINEX de la estación TNTB, y el modelo de temperatura media calculado con datos de radiosondeo, Ifadis(rojo), Hopfield(Verde), Saastamoinen(magenta).

Considerando las figuras (8.1 a la 8.9), podemos observar que el modelo de Ifadis sobrestima los valores en relación al modelo de Hopfield y al modelo de Saastamoinen, notando, por otra parte, que estos últimos presentan una mayor correlación entre sí.

8.2. Referentes a radiosondeo

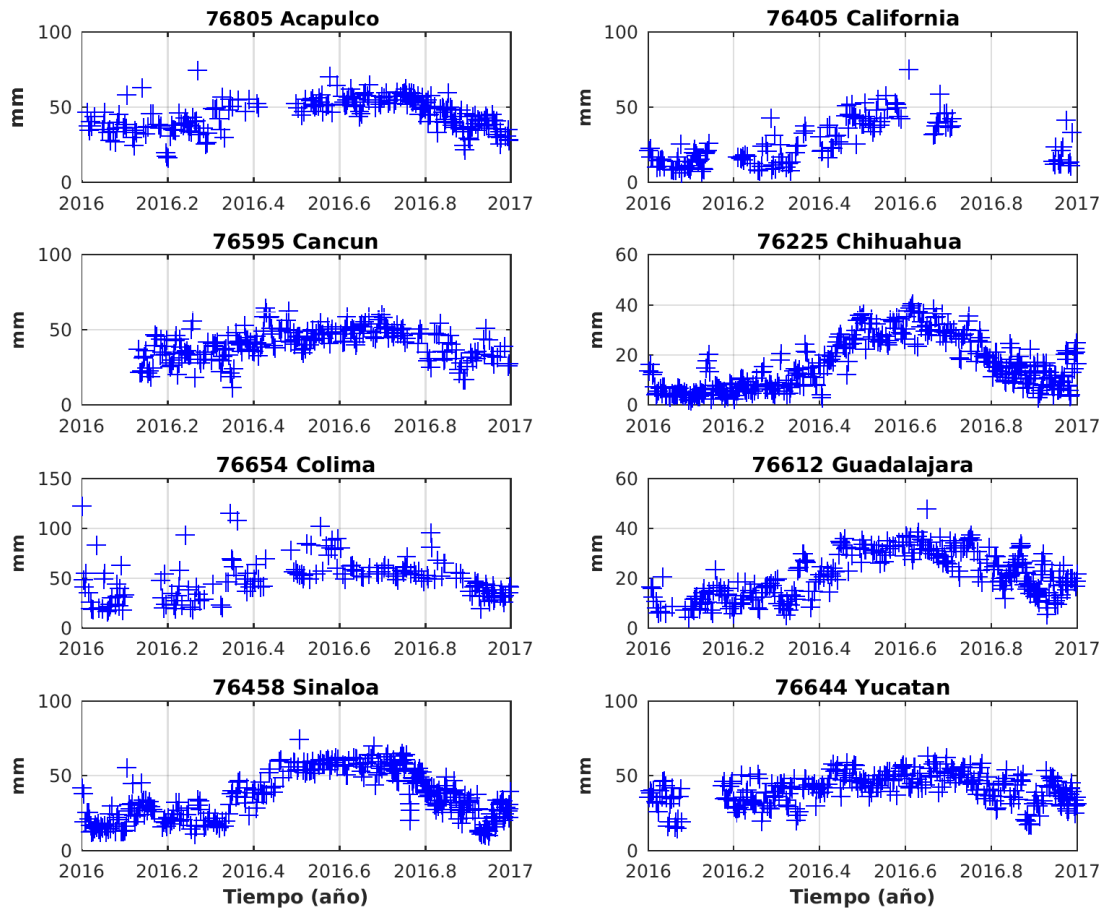


Figura 8.10: Vapor de agua precipitable utilizando datos de radiosondeo de las diferentes estaciones empleadas en el presente trabajo.

En la figura 8.10 se observa que los datos de las estaciones parten de un mínimo a inicio de año, aumentan hasta llegar a los meses de Julio a Agosto, y disminuyen a finales de año. Teniendo la mayor concentración de vapor de agua en los meses en los que la temperatura es mayor.

8.3. Comparativa de resultados

De la figura 8.11 a la 8.16 se muestran los resultados obtenidos con GNSS empleando Bernese y modelos teóricos, aclarando que para estas estaciones no se incluyeron resultados con datos de radiosondeo, debido a que estas localidades no cuentan con estaciones cercanas, lo cual se puede ver en la figura 7.14. Por otra parte, en las figuras (8.17 - 8.19) se muestran los resultados obtenidos con GNSS, empleando Bernese y modelos teóricos, así como los resultados obtenidos con datos de radiosondeo.

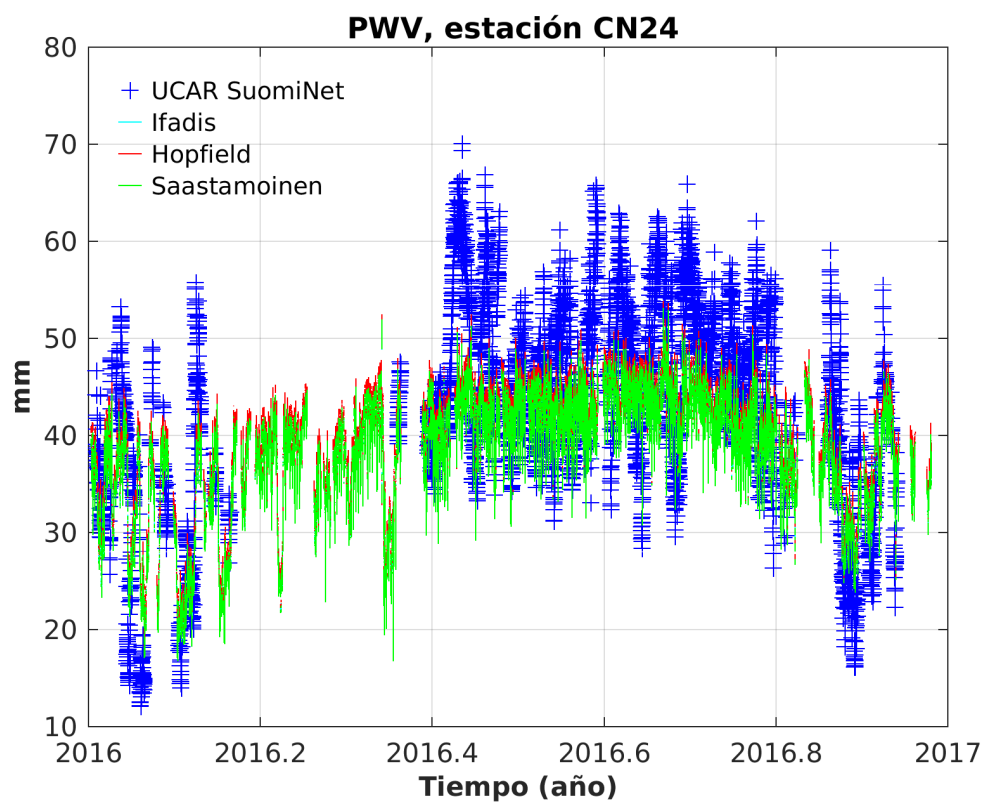


Figura 8.11: Comparación en el cálculo de vapor de agua precipitable calculado de GNSS mediante modelos teóricos y GNSS mediante software Bernese de la estación CN24

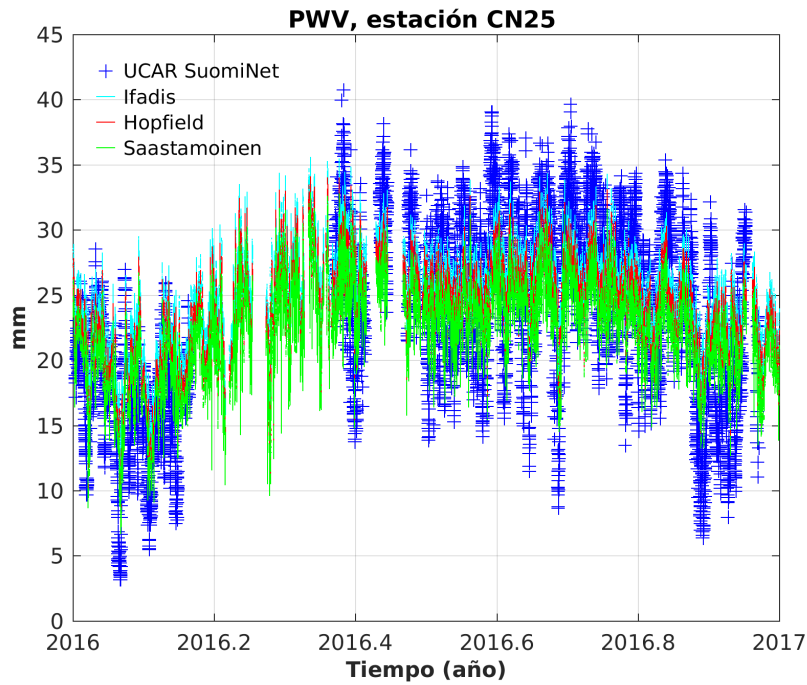


Figura 8.12: Comparación en el cálculo de vapor de agua precipitable GNSS mediante modelos teóricos y PWV calculado de GNSS mediante software Bernese de la estación CN25

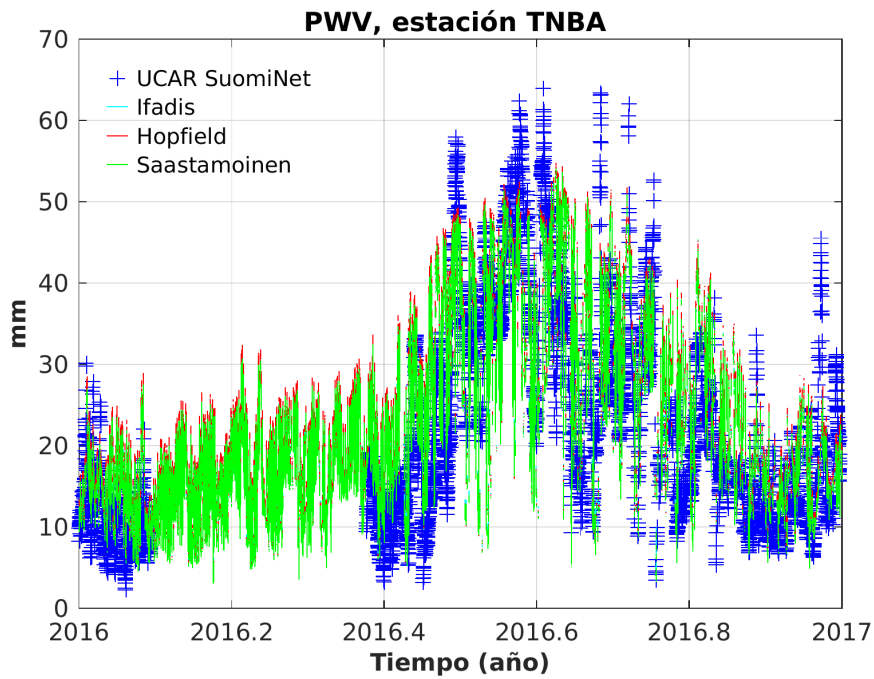


Figura 8.13: Comparación en el cálculo de vapor de agua precipitable GNSS mediante modelos teóricos y GNSS mediante software Bernese, de la estación TNBA

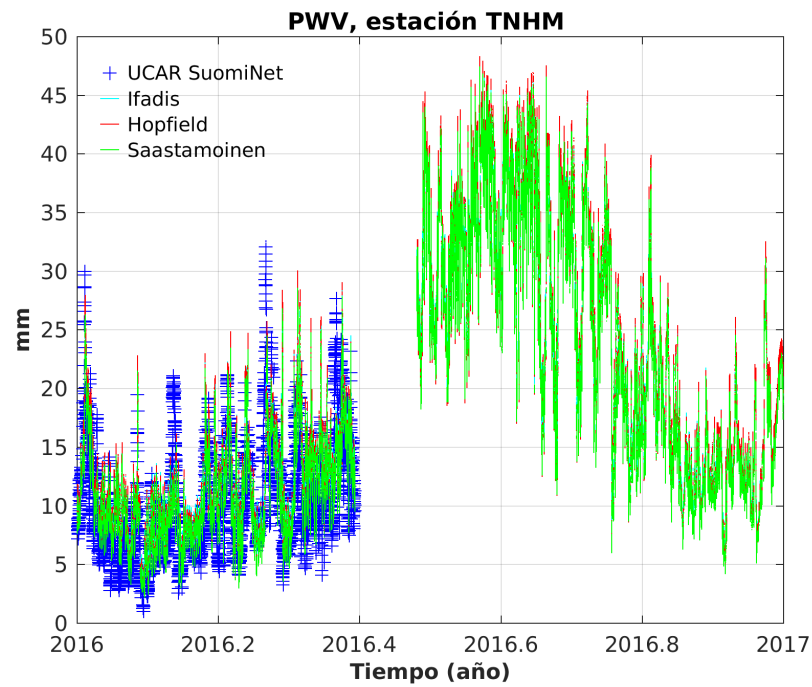


Figura 8.14: Comparación en el cálculo de vapor de agua precipitable calculado de GNSS mediante modelos teóricos y GNSS mediante software Bernese de la estación TNHM

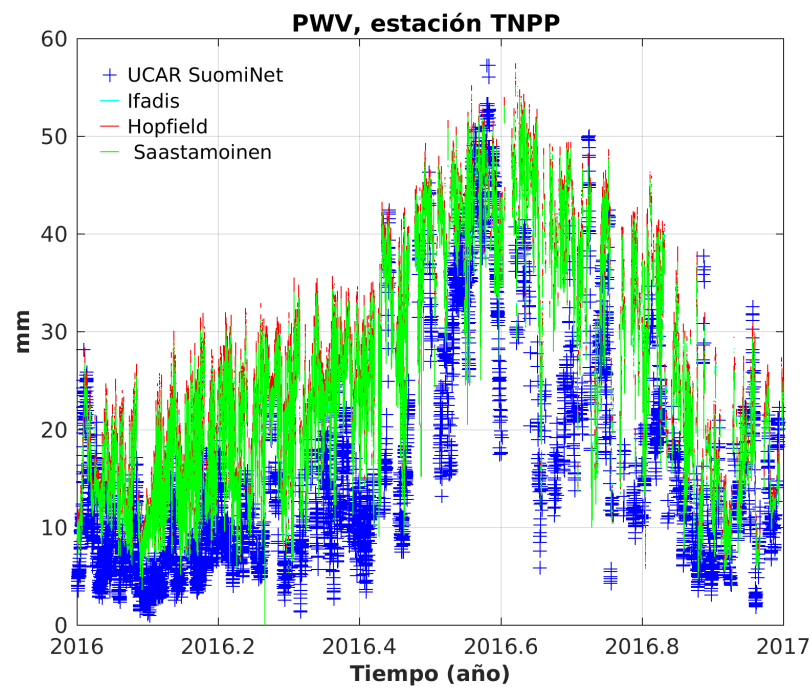


Figura 8.15: Comparación en el cálculo de vapor de agua precipitable calculado de GNSS mediante modelos teóricos y GNSS mediante software Bernese de la estación TNPP

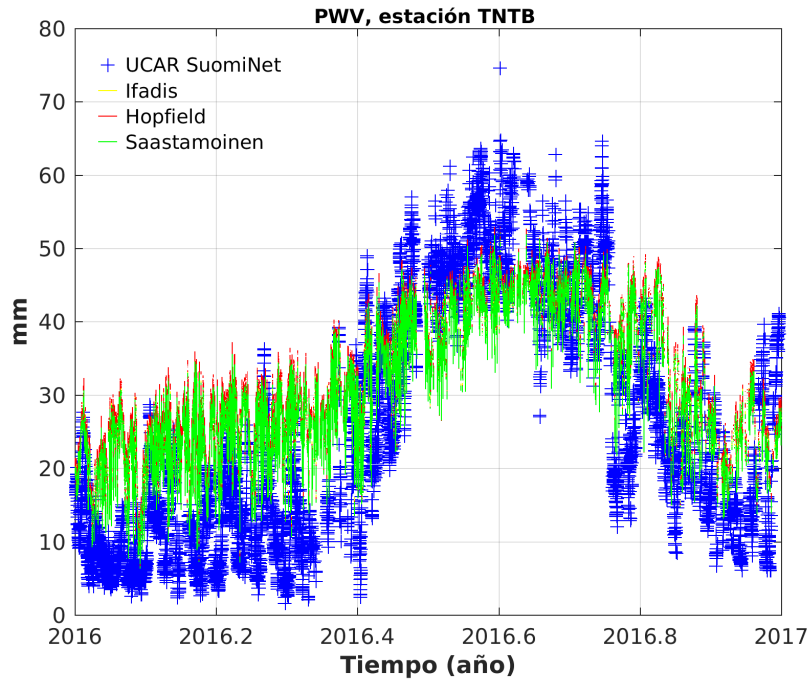


Figura 8.16: Comparación en el cálculo de Vapor de agua precipitable calculado de GNSS mediante modelos teóricos y GNSS mediante software Bernese de la estación TNTB

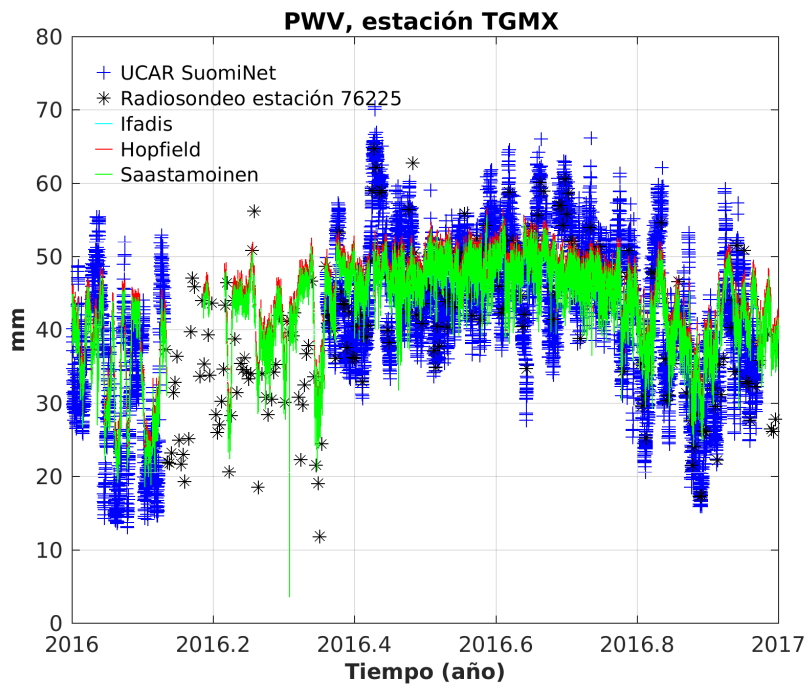


Figura 8.17: Comparación en el cálculo de vapor de agua precipitable calculado de radiosondeos, PWV calculado de GNSS mediante modelos teóricos y GNSS mediante software Bernese, de la estación TGMX

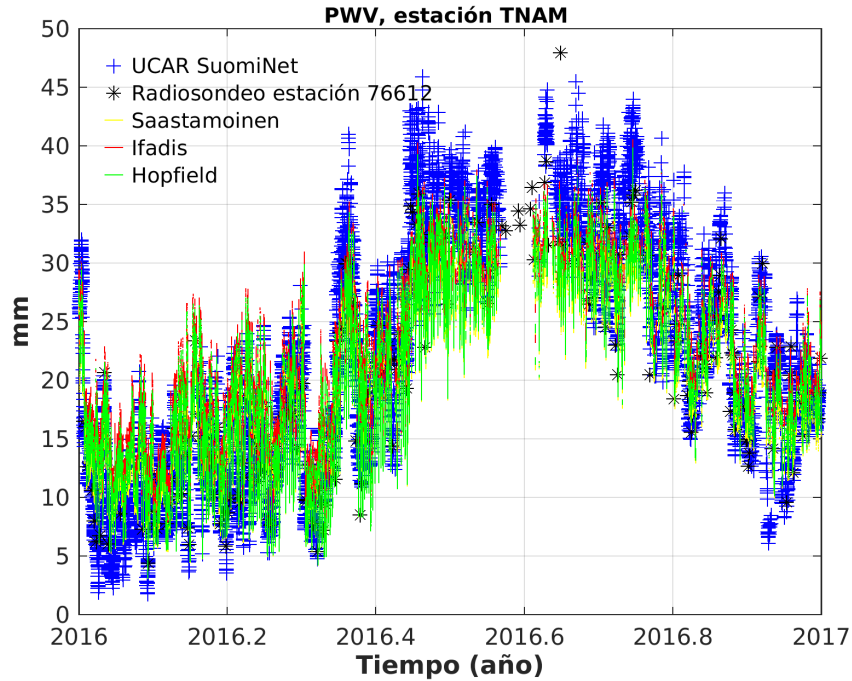


Figura 8.18: Comparación en el cálculo de vapor de agua precipitable calculado de radiosondeos, PWV calculado de GNSS mediante modelos teóricos y GNSS mediante software Bernese de la estación TNAM

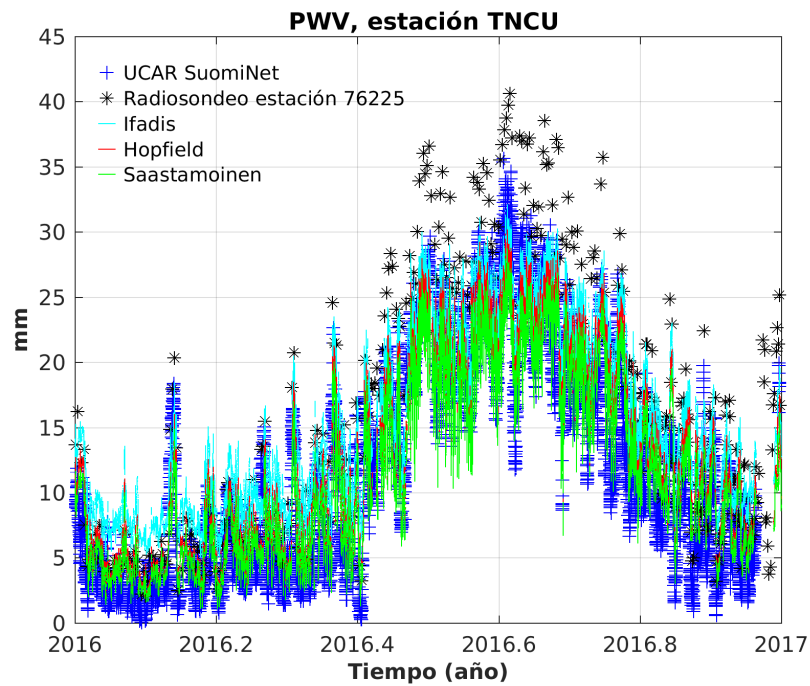


Figura 8.19: Comparación en el cálculo de vapor de agua precipitable calculado de radiosondeos, PWV calculado de GNSS mediante modelos teóricos y GNSS mediante software Bernese de la estación TNCU

8. RESULTADOS

Por lo mostrado en las gráficas (8.11 a la 8.19) se observa que los resultados obtenidos empleando datos GNSS-Met, presentan una buena correlación en algunas estaciones con los datos obtenidos de la red UCAR SuomiNet. También existen estaciones en las que la correlación existente es menor, lo cual se puede comprobar con el análisis estadístico que a continuación se enlista:

Estaciones	Correlación					
	GNSS Bernese vs GNSS modelos teóricos			radiosondeo vs GNSS modelos teóricos		
	Saastamoinen	Hopfield	Ifadis	Saastamoinen	Hopfield	Ifadis
CN24	0.73	0.72	0.73	—	—	—
CN25	0.79	0.79	0.79	—	—	—
TGMX	0.74	0.75	0.78	0.71	0.72	0.71
TNAM	0.90	0.89	0.90	0.88	0.88	0.88
TNBA	0.75	0.75	0.75	—	—	—
TNCU	0.93	0.92	0.93	0.94	0.94	0.94
TNHM	0.71	0.69	0.71	—	—	—
TNPP	0.80	0.79	0.80	—	—	—
TNTB	0.82	0.81	0.82	—	—	—

Tabla 8.1: Correlaciones de los diferentes métodos empleados.

Estaciones	Error absoluto promedio					
	GNSS Bernese vs GNSS modelos teóricos			radiosondeo vs GNSS modelos teóricos		
	Saastamoinen	Hopfield	Ifadis	Saastamoinen	Hopfield	Ifadis
CN24	6.923	6.568	6.924	—	—	—
CN25	3.969	3.725	3.844	—	—	—
TGMX	5.862	6.024	5.861	0.162	0.168	0.162
TNAM	4.164	4.035	4.015	0.083	0.088	0.100
TNBA	7.052	7.443	7.158	—	—	—
TNCU	2.523	2.609	4.167	0.196	0.172	0.153
TNHM	2.573	2.860	2.922	—	—	—
TNPP	9.280	9.981	9.608	—	—	—
TNTB	9.626	10.061	9.825	—	—	—

Tabla 8.2: Error absoluto promedio de los diferentes métodos empleados.

Estaciones	Raíz del error cuadrático medio					
	GNSS Bernese vs GNSS modelos teóricos			radiosondeo vs GNSS modelos teóricos		
	Saastamoinen	Hopfield	Ifadis	Saastamoinen	Hopfield	Ifadis
CN24	8.601	8.125	8.594	—	—	—
CN25	4.771	4.510	4.752	—	—	—
TGMX	7.106	7.252	7.103	1.206	1.251	1.207
TNAM	5.198	5.005	4.958	0.668	0.706	0.784
TNBA	9.166	9.514	9.218	—	—	—
TNCU	3.184	3.280	4.853	1.286	1.134	0.948
TNHM	3.545	3.840	3.817	—	—	—
TNPP	11.218	11.915	11.495	—	—	—
TNTB	11.401	11.955	11.620	—	—	—

Tabla 8.3: Raíz del error cuadrático medio de los diferentes métodos empleados.

Sin embargo se observa en la figura 8.19 que los resultados obtenidos con datos GNSS-Met, no modelan de manera adecuada los resultados obtenidos a partir de datos de radiosondeo en los meses en los cuales se presenta una mayor cantidad estimada de vapor de agua (Mayo a Septiembre), lo cual no se respalda con el análisis de correlación, debido a que se realizó un filtrado de datos de GNSS, para hacer compatibles la misma cantidad de datos de GNSS y de radiosondeo.

Discusión y conclusiones

En este trabajo se desarrollaron scripts para la estimaciones de vapor de agua precipitable a partir de datos de estaciones GPS-Met.

Se analizaron y compararon los resultados obtenidos de la estimación de vapor de agua precipitable presente en la atmósfera con datos de radiosondeo, datos GNSS obtenidos del procesamiento con Bernese y evaluando modelos teóricos. Se observa que existe una correlación de 0.82 a 0.93 para las estaciones ubicadas en Chihuahua, Sinaloa y Jalisco, siendo las estaciones que mayor correlación presentaron (el análisis de correlaciones de todas las estaciones se puede consultar en la tabla 8.1). La correlación disminuye a medida que las zonas de estudio presentan mayor contenido de vapor de agua, por lo que es recomendable dividir a la República Mexicana por regiones, en función de su climatología, lo cual brindaría la posibilidad de realizar un estudio más detallado, generando modelos de temperatura media en función de las condiciones climatológicas.

Al realizar la estimación del contenido de vapor de agua en la atmósfera empleando datos GNSS y compararla con datos de radiosondeo se observa que los datos de GNSS subestiman el contenido de vapor de agua para la estación TNCU en los meses en los que el contenido es mayor (Mayo a Septiembre), situación que no comparten las estaciones TNAM y TGMX, como se mostró en las gráficas 8.17 -8.19 del capítulo de resultados.

Dentro de las futuras investigaciones que se pueden derivar de los resultados del presente trabajo se encuentran los análisis de series de tiempo de varios años, con la finalidad de que la presencia de eventos extremos no afecten de manera considerable el estudio y en consecuencia se puedan desarrollar mejores modelos de temperatura media, así como modelos que permitan el estudio de la región húmeda de la tropósfera.

RINEX de Observación

```

1.0 COMPACT RINEX FORMAT CRINEX VERS / TYPE
RNX2CRX ver.4.0.3 02-Jan-16 00:16 CRINEX PROG / DATE
2.11 OBSERVATION DATA G (GPS) RINEX VERSION / TYPE 1
teqc 2015Nov6 UNAVCO Archive Ops 20160102 00:16:18UTCPGM / RUN BY / DATE 2
Solaris x86 5.10|AMD64|cc SC5.8 -xarch=amd64|=+|=+ COMMENT
BIT 2 OF LLI FLAGS DATA COLLECTED UNDER A/S CONDITION COMMENT
TNCU 3 MARKER NAME
MARKER NUMBER 4
UNAVCO Community UNAVCO OBSERVER / AGENCY 5
5250K40686 TRIMBLE NETR9 6 4.85 REC # / TYPE / VERS 8
5338354829 TRM59800.00 7 SCIT ANT # / TYPE 9
-1622049.7379 -5374521.9343 3021508.3260 APPROX POSITION XYZ 10
0.0083 0.0000 0.0000 ANTENNA: DELTA H/E/N 11
1 1 WAVELENGTH FACT L1/2 12
7 L1 L2 C1 P2 P1 S1 S2 16 # / TYPES OF OBSERV 13
15.0000 INTERVAL 14
17 LEAP SECONDS 15
input file: tncu201601010000a.tgd COMMENT
RINEX file created by UNAVCO GPS Archive. COMMENT
For more information contact archive@unavco.org COMMENT
Monument ID: 24595 COMMENT
UNAVCO 4-char name: TNCU COMMENT
4-char name from Log or data file: TNCU COMMENT
Monument location: 28.450588 -106.794 2110 COMMENT
Visit ID: 111676 COMMENT
TLALOCNET_Cuauhtemoc_2014 COMMENT
End of DB comments COMMENT
SNR is mapped to RINEX snr flag value [0-9] COMMENT
L1 & L2: min(max(int(snr_dBHz/6), 0), 9) COMMENT
2016 1 1 0 0 0.0000000 GPS TIME OF FIRST OBS
END OF HEADER
&16 1 1 0 0 0.0000000 0 11616G14G26G09G23G03G31G32G22G11G01

3&109494344409 3&85320213548 3&20836021281 3&20836025824 3&51600 3&41200 846
3&134069711552 3&25512619516 3&34000 5
3&111270282403 3&86704215383 3&21174015852 3&21174023207 3&50100 3&42600 847
3&132300963854 3&25176040172 3&31300 15
3&118783818955 3&92558898133 3&22603805461 3&22603808715 3&48600 3&35500 845
3&107619701107 3&83859704138 3&20479370641 3&20479377703 3&51900 3&45900 847
3&123164132263 3&95972117005 3&23437335742 3&23437340754 3&45100 3&31200 745
3&109798176739 3&85557027892 3&20893879180 3&20893884895 3&52900 3&42700 847
3&132222960873 3&103030893274 3&25161212070 3&25161217434 3&39000 3&17400 642
3&136079015054 3&25895002945 3&32000 15
3&126001901968 3&98183343460 3&23977370820 3&23977382809 3&39900 3&22200 643
15

```

Los elementos de un archivo RINEX de observación son:

- 1.– Versión de archivo / Tipo de archivo / Sistema Satelital.
- 2.– Nombre del programa / Nombre de la agencia / Fecha.
- 3.– Nombre de la estación.
- 4.– Número de la marca.
- 5.– Nombre del observador / Agencia.
- 6.– Tipo de receptor.
- 7.– Tipo de antena.
- 8.– Número de serie / Modelo / Versión del software.
- 9.– Número de serie.
 - “1” Ciclos completos.
 - “2” Medios ciclos.
- 13.– Número de tipos de observación.
- 14.– Intervalo de cada observación.
- 15.– Número de segundos bisiestos para empatar el tiempo GPS con el UTC.

RINEX de Navegación

```

2.10          N: GPS NAV DATA          RINEX VERSION / TYPE 1
teqc 2015Nov6 UNAVCO Archive Ops 20160103 00:20:57UTCPGM / RUN BY / DATE
17          LEAP SECONDS 2
Solaris x86 5.10|AMD64|cc SC5.8 -xarch=amd64|=+|=+ COMMENT
1.1176D-08 -7.4506D-09 -5.9605D-08 1.1921D-07 ION ALPHA 3
1.1674D+05 -2.2938D+05 -1.3107D+05 1.0486D+06 ION BETA
3.725290298462D-09 1.243449787580D-14 147456 1878 DELTA-UTC: A0,A1,T,W 4
7 8 C2 END OF HEADER C4 5
16 16 1 2 0 0 0.0 -5.204509943724D-05 3.296918293927D-12 0.000000000000+00 L1
6 1.500000000000D+01 -3.781250000000D+00 3.785157667010D-09 -1.114204695898D-01 L2
-2.421438694000D-07 8.340504718944D-03 7.575377821922D-06 5.153686033249D+03 L3
5.184000000000D+05 8.195638656616D-08 -1.562119306162D+00 6.891787052155D-08 L4
9.906026435134D-01 2.480312500000D+02 3.137438773775D-01 -7.869613515277D-09 L5
-9.464679956196D-11 1.000000000000D+00 1.877000000000D+03 0.000000000000D+00 L6
2.000000000000D+00 0.000000000000D+00 -1.024454832077D-08 1.500000000000D+01 L7
5.112360000000D+05 4.000000000000D+00 L8
26 16 1 1 23 59 44.0 -1.924377866089D-04 -1.705302565824D-11 0.000000000000D+00
2.000000000000D+00 -8.375000000000D+00 4.465185992919D-09 9.595034540731D-01
-4.041939973831D-07 6.318268133327D-04 7.368624210358D-06 5.153691390991D+03
5.183840000000D+05 -9.313225746155D-09 -1.636484861020D+00 -2.048909664154D-08
9.604772235488D-01 2.335000000000D+02 -2.752074757475D-01 -8.102123200238D-09
-1.157191058795D-10 1.000000000000D+00 1.877000000000D+03 0.000000000000D+00
2.000000000000D+00 0.000000000000D+00 7.450580596924D-09 2.000000000000D+00
5.141880000000D+05 4.000000000000D+00
14 16 1 2 0 0 0.0 1.178774982691D-05 -2.387423592154D-12 0.000000000000D+00
5.900000000000D+01 5.084375000000D+01 4.629478550650D-09 -1.153987032672D+00
2.842396497726D-06 8.300214423798D-03 7.098540663719D-06 5.153705219269D+03
5.184000000000D+05 3.725290298462D-09 2.634380794843D+00 2.086162567139D-07
9.649736748897D-01 2.458125000000D+02 -1.947065927065D+00 -8.112480774530D-09
7.107438910502D-11 1.000000000000D+00 1.877000000000D+03 0.000000000000D+00
2.000000000000D+00 0.000000000000D+00 -9.313225746155D-09 5.900000000000D+01
5.112180000000D+05 4.000000000000D+00
9 16 1 2 0 0 0.0 4.114536568522D-05 7.958078640513D-12 0.000000000000D+00
4.600000000000D+01 5.359375000000D+01 4.849844872649D-09 -1.128541935296D+00
2.758577466011D-06 5.465368740261D-04 6.910413503647D-06 5.153662935257D+03
5.184000000000D+05 4.656612873077D-08 2.552001920415D+00 3.911554813385D-08
9.559005823533D-01 2.480625000000D+02 1.896406111189D+00 -8.192126949256D-09
1.296482575132D-10 1.000000000000D+00 1.877000000000D+03 0.000000000000D+00
2.000000000000D+00 0.000000000000D+00 9.313225746155D-10 4.600000000000D+01
5.172780000000D+05 4.000000000000D+00
31 16 1 2 0 0 0.0 2.888091839850D-04 -1.591615728103D-12 0.000000000000D+00
6.300000000000D+01 7.875000000000D+00 4.439470636057D-09 2.330179921233D+00
6.370246410370D-07 8.348696981557D-03 5.898997187614D-06 5.153667987823D+03
5.184000000000D+05 8.754432201386D-08 -2.645322670136D+00 1.545995473862D-07
9.731144541230D-01 2.730000000000D+02 -4.652392673572D-01 -8.023548498715D-09
-2.660825119761D-10 1.000000000000D+00 1.877000000000D+03 0.000000000000D+00
2.000000000000D+00 0.000000000000D+00 -1.350417733192D-08 6.300000000000D+01
5.112180000000D+05 4.000000000000D+00
3 16 1 2 0 0 0.0 -5.906447768211D-06 -5.115907697473D-12 0.000000000000D+00
5.800000000000D+01 3.500000000000D+00 4.487329772440D-09 -4.147029363962D-01
1.229345798492D-07 3.262803656980D-04 9.445473551750D-06 5.153796289444D+03
5.184000000000D+05 2.421438694000D-08 1.510885141334D+00 7.450580596924D-09

```

Los elementos de un archivo RINEX de navegación son:

- 1.– Versión / Tipo de Archivo.
- 2.– Número de segundos bisiestos para empear el tiempo GPS con el UTC.
- 3.– Parámetros ionosféricos con una sola banda (L1,L2).
- 4.– Parámetros para calcular el UTC.
- 5.– Fin del encabezado.
- 6.– Número del satélite.
- 7.– Fecha con formato AA MM DD.
- 8.– Hora con formato hh mm ss.
- L1C2*.– Error en el reloj del satélite.
- L1C3*.– La deriva.
- L1C4*.– La tasa de deriva.
- L2C1*.– Issue of Data Ephemerides (Salida de los datos de efemérides).
- L2C2*.– Crs (Corrección senoidal en la distancia geocéntrica en radianes).
- L2C3*.– Δn (Diferencia en la velocidad angular media en radianes por segundo).
- L2C4*.– M_0 (Anomalía media en el tiempo de referencia en radianes).
- L3C1*.– Cuc (Corrección cosenoidal en el argumento de la latitud en radianes).
- L3C2*.– Excentricidad de la órbita.
- L3C3*.– Cus (Corrección senoidal en el argumento de la latitud en radianes).
- L3C4*.– a (Raíz del semieje mayor de la órbita en metros).
- L4C1*.– Toe (Tiempo de las efemérides en segundos de la semana GPS).
- L4C2*.– Cic (Corrección cosenoidal en la inclinación de la órbita en radianes).
- L4C3*.– Ω_0 (Ascensión recta del nodo ascendente en radianes).
- L4C4*.– Cis (Corrección senoidal en la inclinación de la órbita en radianes).
- L5C1*.– i_0 (Inclinación de la órbita con respecto al plano ecuatorial).
- L5C2*.– Crc (Corrección cosenoidal en la distancia geocéntrica en radianes).
- L5C3*.– ω_0 (Argumento del perigeo en radianes).
- L5C4*.– $\dot{\Omega}$ (Tasa de cambio en la ascensión recta en radianes por segundo).
- L6C1*.– *idot* (Tasa de inclinación en radianes por segundo).
- L6C2*.– Códigos en L2.
- L6C3*.– Semana GPS (Número de la semana GPS referente a la época de las efemérides).
- L6C4*.– Bandera.
- L7C1*.– Precisión del satélite en metros.

L7C2.– Salud del satélite (0 bien, 1 mal).

L7C3.– TGD.

L7C4.– Issue of Data Clock (Salida de los datos del reloj).

L8C1.– Tiempo de transmisión del mensaje en segundos de la semana GPS.

Archivo RINEX Meteorológico

2.11 METEOROLOGICAL DATA RINEX VERSION / TYPE												
teqc 2016Nov18 UNAVCO Archive Ops 20170102 00:37:05UTC PGM / RUN BY / DATE												
Solaris x86 5.10 AMD64 cc SC5.8 -xarch=amd64 =+ =+ COMMENT												
GUAX MARKER NAME												
40512M001 MARKER NUMBER												
7	PR	TD	HR	WS	WD	RI	HI	# / TYPES OF OBSERV				
								0.0	PR	SENSOR MOD/TYPE/ACC		
								0.0	TD	SENSOR MOD/TYPE/ACC		
								0.0	HR	SENSOR MOD/TYPE/ACC		
								0.0	WS	SENSOR MOD/TYPE/ACC		
								0.0	WD	SENSOR MOD/TYPE/ACC		
								0.0	RI	SENSOR MOD/TYPE/ACC		
								0.0	HI	SENSOR MOD/TYPE/ACC		
								0.0000	PR	SENSOR POS XYZ/H		
2	3	4	5	6	7	8	9	END OF HEADER 10				
17	1	1	0	0	0	1004.7	17.5	68.4	4.9	284.0	0.0	0.0
17	1	1	0	1	0	1004.7	17.4	69.3	4.4	284.0	0.0	0.0
17	1	1	0	2	0	1004.7	17.3	69.9	5.5	294.0	0.0	0.0
17	1	1	0	3	0	1004.7	17.3	69.7	5.4	285.0	0.0	0.0
17	1	1	0	4	0	1004.7	17.2	69.6	5.4	287.0	0.0	0.0
17	1	1	0	5	0	1004.7	17.2	70.2	4.9	287.0	0.0	0.0
17	1	1	0	6	0	1004.7	17.1	71.3	5.6	292.0	0.0	0.0
17	1	1	0	7	0	1004.7	17.1	69.6	5.4	285.0	0.0	0.0
17	1	1	0	8	0	1004.8	17.0	69.0	6.2	292.0	0.0	0.0
17	1	1	0	9	0	1004.8	17.0	69.2	5.9	292.0	0.0	0.0
17	1	1	0	10	0	1004.8	16.9	69.7	5.5	295.0	0.0	0.0
17	1	1	0	11	0	1004.8	16.8	70.6	5.9	287.0	0.0	0.0
17	1	1	0	12	0	1004.8	16.8	70.8	5.1	284.0	0.0	0.0
17	1	1	0	13	0	1004.8	16.8	71.2	5.1	286.0	0.0	0.0
17	1	1	0	14	0	1004.8	16.8	71.4	4.9	278.0	0.0	0.0
17	1	1	0	15	0	1004.7	16.9	71.4	4.4	282.0	0.0	0.0
17	1	1	0	16	0	1004.8	16.9	71.4	5.3	282.0	0.0	0.0
17	1	1	0	17	0	1004.7	16.9	71.8	6.1	286.0	0.0	0.0
17	1	1	0	18	0	1004.7	16.9	71.1	5.4	281.0	0.0	0.0
17	1	1	0	19	0	1004.8	16.8	71.5	6.2	280.0	0.0	0.0
17	1	1	0	20	0	1004.7	16.8	71.2	5.2	286.0	0.0	0.0
17	1	1	0	21	0	1004.8	16.8	71.8	5.2	283.0	0.0	0.0
17	1	1	0	22	0	1004.8	16.9	71.4	6.1	290.0	0.0	0.0
17	1	1	0	23	0	1004.8	16.9	70.6	6.6	288.0	0.0	0.0
17	1	1	0	24	0	1004.8	16.9	69.7	6.1	283.0	0.0	0.0
17	1	1	0	25	0	1004.8	16.9	69.1	6.1	291.0	0.0	0.0
17	1	1	0	26	0	1004.8	16.8	69.1	6.6	290.0	0.0	0.0
17	1	1	0	27	0	1004.8	16.8	68.8	6.5	284.0	0.0	0.0
17	1	1	0	28	0	1004.8	16.8	68.8	6.6	289.0	0.0	0.0
17	1	1	0	29	0	1004.7	16.9	69.2	7.5	281.0	0.0	0.0
17	1	1	0	30	0	1004.7	16.9	68.4	6.1	288.0	0.0	0.0
17	1	1	0	31	0	1004.8	16.8	68.1	6.0	287.0	0.0	0.0
17	1	1	0	32	0	1004.8	16.8	68.3	7.0	286.0	0.0	0.0
17	1	1	0	33	0	1004.8	16.9	68.4	6.3	285.0	0.0	0.0
17	1	1	0	34	0	1004.8	16.9	68.2	6.6	279.0	0.0	0.0
17	1	1	0	35	0	1004.8	16.9	68.1	5.9	278.0	0.0	0.0
17	1	1	0	36	0	1004.8	16.9	68.2	5.6	276.0	0.0	0.0
17	1	1	0	37	0	1004.8	16.9	68.1	6.2	269.0	0.0	0.0
17	1	1	0	38	0	1004.8	16.9	67.5	5.9	282.0	0.0	0.0
17	1	1	0	39	0	1004.8	16.9	68.2	5.8	276.0	0.0	0.0
17	1	1	0	40	0	1004.8	16.9	68.6	5.6	272.0	0.0	0.0

Los elementos de un archivo RINEX meteorológico son:

- 1.– Número de observables meteorológicas.
- 2.– Fecha con formato AA MM DD.
- 3.– Hora con formato hh mm ss.
- 4.– Presión (PR).
- 5.– Temperatura seca (TD).
- 6.– Humedad Relativa (HR).
- 7.– Rapidez del viento (WS).
- 8.– Viento Azimutal (WD).
- 9.– Acumulación de lluvia (RI).
- 10.– Indicador de granizo (HI).

Códigos

Los códigos generados en el presente trabajo se pueden visualizar en las siguientes páginas:

- Código para la obtención de vapor de agua precipitable presente en la atmósfera empleando datos de las estaciones GPS-Met de la red TLALOC-Net.

https://drive.google.com/open?id=0B9kGVd_mv gjEc1JjeUduMkF5Vms

- Código para la obtención de vapor de agua precipitable empleando perfiles atmosféricos de radiosondeo.

https://drive.google.com/open?id=0B9kGVd_mv gjENVhwbmZ5am9FUHc

- Código para la extracción de datos de vapor de agua precipitable de los archivos generados por la red UCAR suominet.

https://drive.google.com/open?id=0B9kGVd_mv gjEWnZXTzRqT1NjMVE

Bibliografía

- Bai, Z. (2005). *Near-real-time GPS sensing of atmospheric water vapour*. Tesis doctoral, Queensland University of Technology. 72
- Ballesteros Paredes, J. (2007). Lección 2, la medida del tiempo [recurso en línea]. Disponible en <http://www.astrosmo.unam.mx/~j.ballesteros/Diplomado/Clase2/tiempo.pdf>. 18
- Berman, A. L. (1976). The prediction of zenith range refraction from surface measurements of meteorological parameters. *NASA*. 50
- Berrocoso Domínguez, M. (2014 [Consulta, 23 de Noviembre de 2016]). El Sistema GNSS-GPS, Observables GPS [recurso en línea]. Recuperado de http://vulcanologia.geofisica.unam.mx/files/curso_gps/SESSION_2-B.pdf. 24, 27
- Bevis, M., Businger, S., Herring, T. A., Rocken, C., Anthes, R. A., y Ware, R. H. (1992). GPS meteorology: Remote sensing of atmospheric water vapor using the Global Positioning System. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres, Wiley Online Library*, 97(D14):15787–15801. 45, 70, 71, 72
- Cabral, E. (2012 [Consulta, 29 de Agosto de 2016]). TLALOC-Net una red de multisensores GPS y atmosféricos para el monitoreo e investigación meteorológica y geofísica en México [recurso en línea]. *Instituto de Geofísica, UNAM*. Recuperado de http://www.cudi.edu.mx/primavera_2012/presentaciones/ciencias_tierra_enrique_cabral.pdf. 3
- Cabral E, S. L. (2015 [Consulta, 27 de Septiembre de 2016]). TLALOC-Net: Infraestructura GPS-Met para estudios del ciclo sísmico y geodinámica en México [recurso electrónico]. *Registro de resúmenes, avances y retos en sismología, ingeniería y gestión de riesgos a 30 años del sismo de 1985*. Recuperado de <https://www.sismo85.org.mx/abstracts/abstract.php?abstractID=61&source=session>. 5
- Cabrera, M. y Morales, H. (2012 [Consulta, 6 de Diciembre de 2016]). Sistema de Posicionamiento Global (GPS), Características Generales [recurso electrónico]. *Universidad Nacional de Córdoba*. Recuperado de <ftp://agrimensura.efn.uncor.edu/pub/trabajosfinales>. 60

- Cioce, V., Hoyer, M., Wildermann, E., Royero, G., y Díaz, A. (2011). Determinación del vapor de agua troposférico a través de observaciones GPS: primeros ensayos en Venezuela. *Interciencia: Revista de ciencia y tecnología de América*, 36(10):721–730. 3
- Davis, J., Herring, T., Shapiro, I., Rogers, A., y Elgered, G. (1985). Geodesy by radio interferometry: Effects of atmospheric modeling errors on estimates of baseline length. *Radio Science, Wiley Online Library*, 20(6):1593–1607. 46, 47, 48, 71
- Essen, L. y Froome, K. (1951). The refractive indices and dielectric constants of air and its principal constituents at 24,000 mc/s. *Proceedings of the Physical Society. Section B, IOP Publishing*, 64(10):862. 44, 49
- Fernández, L., Meza, A., y Natali, M. (2010). Estimation of precipitable water vapour from GPS measurements in Argentina: Validation and qualitative analysis of results. *Advances in Space Research*, 46(7):879–894. 28
- Fernández, L., Meza, A., y Natali, M. (2009). Determinación del contenido de vapor de agua precipitable (PWV) a partir de mediciones GPS: primeros resultados en Argentina. *Geoacta, Scielo Argentina*, 34(2):35–57. 4
- Furones, Á. M. (2010). Sistema y marco de referencia terrestre. Sistemas de coordenadas. *Departamento de Ingeniería Cartográfica, Geodesia y Fotogrametría, Universidad Politécnica de Valencia*. 12
- Gurtner, W. y Estey, L. (2007). RINEX the receiver independent exchange format version 3.00. *Astronomical Institute, University of Bern and UNAVCO, Bolulder, Colorado, PANGAEA*. 64
- Gutman, S. I. y Benjamin, S. G. (2001). The role of ground-based GPS meteorological observations in numerical weather prediction [recurso electrónico]. *GPS solutions, Springer*, 4(4):16–24. Disponible en <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.452.3369&rep=rep1&type=pdf>. 3
- Hopfield, H. (1969). Two-quartic tropospheric refractivity profile for correcting satellite data. *Journal of Geophysical Research, Wiley Online Library*, 74(18):4487–4499. 50
- Huerta E, Mangiaterra A, N. G. (2005). *GPS, posicionamiento satelital [recurso electrónico]*. UNR editora. Disponible en http://www.fceia.unr.edu.ar/gps/GGSR/libro_gps.pdf. 2
- Ifadis, I. (1986). The atmospheric delay of radio waves: Modeling the elevation dependence on a global scale. *School of Electrical and Computer Engineering*. 50

- Krakiwsky, E. J., of New Brunswick. Dept. of Surveying Engineering, U., y Wells, D. (1971). *Coordinate systems in geodesy*. Fredericton: Department of Surveying Engineering, University of New Brunswick. 13, 14, 15, 16, 17, 18
- Lachapelle, G. y Zhang, J. (2001). Precise estimation of residual tropospheric delays using a regional GPS network for real-time kinematic applications. *Journal of Geodesy, Springer*, 75(5-6):255–266. 36, 57
- Mendes, V. (1999). Modeling the neutral-atmospheric propagation delay in radiometric space techniques. *UNB, Brunswick*. 45, 46
- Mendes, V., Prates, G., Santos, L., y Langley, R. (2000). An evaluation of the accuracy of models for the determination of the weighted mean temperature of the atmosphere. 72
- Mohino Harris, E. (2005 [Consulta, 6 de Diciembre de 2016]). *Análisis y mitigación del error ionosférico en los Sistemas Globales de Navegación por Satélite con receptores de una frecuencia [recurso electrónico]*. Tesis doctoral, Universidad Complutense de Madrid. Disponible en http://www.dae.inpe.br/LISNworkshop2011/abstracts/07_November/gende/presentacion/_etc/Tesis_Elsa_Mohino.pdf. 36
- Raju, S., Saha, K., Thampi, B. V., y Parameswaran, K. (2005). Measurement of integrated water vapor over Bangalore using ground based GPS data. *Proceeding of the XXVIIIth URSI General Assembly in New Delhi*, 16. 72
- Ramos López, R., Romero Campos, P. M., Cuevas Agulló, E., Valdés Pérez de Vargas, M., y Schneider, M. (2009). Programa de vapor de agua en columna del Centro de Investigación Atmosférica de Izaña: Análisis e intercomparación de diferentes técnicas de medida. *Agencia Estatal de Meteorología*. 9
- Raquet, J. F. (1998). Development of a method for kinematic GPS carrier-phase ambiguity resolution using multiple reference receivers. *DTIC Document*. 55
- Renom, M. (2011). Principios básicos de las mediciones atmosféricas, Estaciones Meteorológicas. *Instituto de Física, Universidad de la República Oriental del Uruguay*. 75
- Romero Campos, P. M., Cuevas Agulló, E., Ramos López, R., Valdés Pérez de Vargas, M., y Schneider, M. (2009). Programa de vapor de agua en columna del Centro de Investigación Atmosférica de Izaña: Análisis e intercomparación de diferentes técnicas de medida. *Agencia Estatal de Meteorología*. 70
- Saastamoinen, J. (1973). Contributions to the theory of atmospheric refraction. *Bulletin Géodésique (1946-1975), Springer*, 107(1):13–34. 45, 49

- Sanchez Moreno, F. M. (2016 [Consulta, 14 de Noviembre de 2016]). El concepto de tiempo en Astronomía [recurso electrónico]. Recuperado de <http://laurel.datsi.fi.upm.es/~fsanchez/aula/>. 19
- Sapucci, L. F. (2001). Estimativa do vapor d'água atmosférico e avaliação da modelagem do atraso zenital troposférico utilizando gps. *Universidade Estadual Paulista (UNESP)*. 72
- Schueler, T., Pósfay, A., Hein, G. W., y Biberger, R. (2001). A global analysis of the mean atmospheric temperature for GPS water vapor estimation. En *Proceedings of ION-GPS*, pp. 11–14. 72
- Shrestha, S. M. (2004). *Investigations into the estimation of tropospheric delay and wet refractivity using GPS measurements*. Citeseer. 34, 35, 36, 37, 42, 43, 45, 56, 57
- Smith, E. K. y Weintraub, S. (1953). The constants in the equation for atmospheric refractive index at radio frequencies. *Proceedings of the IRE, IEEE*, 41(8):1035–1037. 46
- Sánchez Sobrino, J. A. (2009). Tema 8. fuentes de error en GPS y modelización. *Escuela Técnica Superior de Topografía Geodesia y Cartografía*. Curso avanzado de posicionamiento por satélite, tema 8 de 225. 31, 32, 33, 35, 53, 54
- Solbrig, P. (2000). Untersuchungen uber die nutzung numerischer wettermodelle zur wasserdampfbestimmung mit hilfe des Global Positioning Systems. *Institute of Geology and Navigation, University FAF Munich. Germany*. 72
- Šverko Navarrete, M. (2012). *Método de estimación del vapor de agua precipitable, por detección remoto, mediante el Sistema de Posicionamiento Global (GPS) con aplicación en el mejoramiento del pronóstico del estado del tiempo en la ciudad de Bogotá, DC*. Tesis doctoral, Universidad Nacional de Colombia. 3, 9, 21, 26, 28, 38, 39, 45, 46, 67, 70
- Valero, J. L. B., Julián, A. B. A., y Villén, N. G. (2013). *GPS: Fundamentos y aplicaciones en Geodesia y Topografía*. Universitat Politècnica de Valencia. XIX, 23, 30, 32, 51