



ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

**DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA TIERRA Y LA
CONSTRUCCIÓN**

CARRERA DE INGENIERÍA GEOGRÁFICA Y DEL MEDIO AMBIENTE

**TRABAJO DE TITULACIÓN, PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO
DE INGENIERO GEÓGRAFO Y DEL MEDIO AMBIENTE**

**TEMA: TÉCNICA DE POSICIONAMIENTO PUNTUAL PRECISO (PPP)
APLICADA A LA ESTIMACIÓN DE VAPOR DE AGUA PRECIPITABLE
(PWV) DE LA ESTACIÓN EPEC**

AUTOR: ALBÁN AGUIRRE, MARÍA FERNANDA

DIRECTOR: TIERRA CRIOLLO, ALFONSO RODRIGO

SANGOLQUÍ- ECUADOR

2018



ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA TIERRA Y LA CONSTRUCCIÓN

INGENIERÍA GEOGRÁFICA Y DEL MEDIO AMBIENTE

CERTIFICADO DIRECTOR

CERTIFICACIÓN

Certifico que el trabajo de titulación “**TÉCNICA DE POSICIONAMIENTO PUNTUAL PRECISO (PPP) APLICADA A LA ESTIMACIÓN DE VAPOR DE AGUA PRECIPITABLE (PWV) DE LA ESTACIÓN EPEC**” fue realizado por la Señita *Albán Aguirre, María Fernanda* el mismo que ha sido revisado en su totalidad, analizado por la herramienta de verificación de similitud de contenido; por lo tanto cumple con los requisitos teóricos, científicos, técnicos, metodológicos y legales establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, razón por la cual me permito acreditar y autorizar para que lo sustente públicamente.

Sangolquí, 06 de junio del 2018

Firma:

Dr. Alfonso Tierra
C.C.: 0601803273



**DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA TIERRA Y LA CONSTRUCCIÓN
INGENIERÍA GEOGRÁFICA Y DEL MEDIO AMBIENTE**

AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD

Yo, *Albán Aguirre, María Fernanda*, declaro que el contenido, ideas y criterios del trabajo de titulación: *Técnica de Posicionamiento Puntual Preciso (PPP) aplicada a la estimación de Vapor de Agua Precipitable (PWV) de la estación EPEC* es de mi autoría y de mi responsabilidad, cumpliendo con los requisitos teóricos, científicos, técnicos, metodológicos y legales establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, respetando los derechos intelectuales de terceros y referenciando las citas bibliográficas.

Consecuentemente el contenido de la investigación mencionada es veraz.

Sangolquí, 10 de julio del 2018

Firma:

Albán Aguirre María Fernanda

C.C.: 1721497749



ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA TIERRA Y LA CONSTRUCCIÓN
INGENIERÍA GEOGRÁFICA Y DEL MEDIO AMBIENTE

AUTORIZACIÓN

*Yo, Albán Aguirre, María Fernanda autorizo a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE publicar el trabajo de titulación: **Técnica de Posicionamiento Puntual Preciso (PPP) aplicada a la estimación de Vapor de Agua Precipitable (PWV) de la estación EPEC en el Repositorio Institucional, cuyo contenido, ideas y criterios son de mi responsabilidad.***

Sangolquí, 10 de julio del 2018

Firma:

Una firma manuscrita en tinta azul que parece decir 'Albán Aguirre María Fernanda'.

Albán Aguirre María Fernanda

C.C.: 1721497749

DEDICATORIA

Este trabajo está dedicado a mi familia:

A mis padres y abuelita, por su apoyo y amor incondicional;

A mi hermana por ser un ejemplo de constancia y dedicación;

A mis tíos Juan y Jorge por su inmenso cariño y sobre todo por ser un ejemplo en mi vida.

Mis esfuerzos y mis ganas de siempre ser mejor van dedicados a todos ellos, gracias a quienes hoy soy la persona que soy.

AGRADACIMIENTO

En primer lugar agradezco a mi mami, por todo su amor y sobre todo por ser la persona es, aquella que me ha guiado con su cariño y me ha formado como persona y como profesional. A mi abuelita Flor María, por su cariño y consejos que me han impulsado a cumplir mis metas y a superarme cada día. Les amo mucho, este logro es nuestro.

Además, quiero agradecer a todas las personas que de una u otra manera hicieron maravillosa mi etapa de vida en la ESPE, llevo conmigo las ocurrencias, risas y buenos momentos, en especial a mis amigas Joely y Klari, su amistad es una de las cosas más valiosas.

También quiero agradecer al ensamble de cuerdas y a su director el Arq. Jumbo por llenar de música y color mi vida universitaria.

Agradezco de especial manera a mi director de tesis, el Dr. Alfonso Tierra, por ser una guía durante mi estancia en la Universidad y por enseñarme que en la vida se puede obtener todo lo que uno se proponga siempre y cuando se ponga esfuerzo y dedicación.

Finalmente, agradezco al Instituto Geográfico Militar-IGM por ser parte en mi formación como profesional, y por haber brindado las facilidades para el desarrollo de este trabajo.

ÍNDICE DE CONTENIDO

CERTIFICADO DEL DIRECTOR.....	i
AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD.....	ii
AUTORIZACIÓN.....	iii
DEDICATORIA.....	iv
AGRADACIMIENTO.....	v
ÍNDICE DE CONTENIDO.....	vi
ÍNDICE DE TABLAS.....	xii
ÍNDICE DE FIGURAS.....	xiii
RESUMEN.....	xvi
ABSTRACT.....	xvii
 CAPÍTULO I	
ASPECTOS GENERALES	
1.1 ANTECEDENTES.....	1
1.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	3
1.3 JUSTIFICACIÓN.....	4
1.4 UBICACIÓN DEL ESTUDIO.....	5
1.5 OBJETIVO GENERAL.....	6
1.6 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	6

1.7	METAS	6
-----	-------------	---

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1	SISTEMA DE POSICIONAMIENTO GLOBAL GPS	7
2.1.1	Componentes del GPS	8
2.1.1.1	Segmento espacial	9
2.1.1.2	Segmento de control	11
2.1.1.3	Segmento de usuario	11
2.1.2	Los observables GPS	12
2.1.2.1	Medición de código	12
2.1.2.2	Medición de fase	14
2.1.3	La señal GPS	16
2.1.4	Refracción atmosférica de la señal GPS	18
2.1.5	Retardo ionosférico	18
2.1.6	Retardo troposférico	19
2.2	EL POSICIONAMIENTO PUNTUAL PRECISO (PPP)	20
2.2.1	Generalidades	20
2.2.2	Correcciones para el método PPP	22
2.2.2.1	Fase Wind-up	22
2.2.2.1	Corrección de mareas terrestres	23

2.2.2.2	Deformación rotacional debido al movimiento polar	23
2.2.2.3	Corrección de cargas oceánicas.....	24
2.2.2.4	Corrección de los parámetros de rotación de la tierra (ERP).....	24
2.2.2.5	Correcciones del desfase de los relojes del satélite.....	24
2.2.2.6	Corrección de la variación del centro de fase de las antenas de los receptores	25
2.2.2.7	Sesgos (biases) diferenciales del código.	26
2.2.3	Tipos de PPP	26
2.3	SOFTWARE RTKLIB	28
2.3.1	Funciones y aplicaciones.....	28
2.3.2	Modelos troposféricos	30
2.3.3	Modelos ionosféricos	34
2.4	FUNDAMENTOS DE METEOROLOGÍA	36
2.4.1	La Atmósfera.....	36
2.4.2	Capas de la atmósfera.....	37
2.4.3	Variables atmosféricas	39
2.4.4	Instrumentos de medición de las precipitaciones	40
2.4.5	Intensidad de lluvia	42
2.4.6	Vapor de agua atmosférico.....	43
2.4.7	Técnicas de observación de vapor de agua atmosférico.....	43

2.4.1	Vapor de agua como elemento fundamental en la formación de lluvias.....	46
2.5	METEOROLOGÍA GPS.....	47
2.5.1	Vapor de Agua Precipitable (PWV).....	47
2.5.2	Retardo Cenital Total (ZTD).....	50
2.5.3	Retardo Cenital Hidrostático (ZHD).....	50
2.5.4	Retardo Cenital Húmedo (ZWD).....	51
2.6	ANÁLISIS ESTADÍSTICO.....	52
2.6.1	Distribución normal de probabilidades.....	52
2.6.2	Prueba de normalidad de Kolmogorov – Smirnov.....	53
2.6.3	Análisis de correlación.....	55
2.6.4	Coefficiente de correlación de Pearson.....	56
2.6.5	Coefficiente de correlación de Spearman.....	56
2.6.6	Prueba de hipótesis.....	57
2.6.6.1	Nivel de Significancia.....	58
2.6.6.2	Estadístico de Prueba para diferencia entre dos medias.....	59

CAPÍTULO III

METODOLOGÍA

3.1	RECOPIACIÓN DE DATOS.....	62
3.1.1	Recopilación de datos Satelitales.....	62
3.1.2	Recopilación de Parámetros Físicos.....	62

3.1.3	Recopilación de archivos de corrección.....	63
3.2	ADECUACIÓN DE DATOS	64
3.3	PROCESAMIENTO DE DATOS – POSICIONAMIENTO PUNTUAL PRECISO (PPP)	64
3.4	CONVERSIÓN DE ZTD A ZWD.....	73
3.5	CÁLCULO DEL VAPOR DE AGUA PRECIPITABLE (PWV).....	73
3.6	ANÁLISIS ESTADÍSTICO	74
3.7	VALIDACIÓN.....	75

CAPÍTULO IV

ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

4.1	CONTENIDO DE PWV EN DÍAS LLUVIOSOS	76
4.1.1	Días con débil intensidad de precipitación.....	77
4.1.2	Días con moderada intensidad de precipitación.....	78
4.1.3	Días con fuerte intensidad de precipitación	83
4.2	CONTENIDO DE PWV EN DÍAS SIN PRECIPITACIONES	86
4.3	CONTENIDO PROMEDIO DIARIO DE VAPOR DE AGUA PRECIPITABLE EN LA ESTACIÓN EPEC CADA MES.....	86
4.4	ANÁLISIS ESTADÍSTICO	93
4.4.1	Análisis Gráfico- Diagramas de Caja.....	93
4.4.2	Prueba de normalidad.....	94

4.4.3	Coeficiente de correlación.....	97
4.5	LA VALIDACIÓN DE TÉCNICA DE POSICIONAMIENTO PUNTUAL PRECISO PARA LA RECUPERACIÓN DE PWV	98
4.5.1	Comparación entre soluciones.....	98
4.5.2	Análisis de las diferencias	101
CAPÍTULO V		
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES		
5.1	CONCLUSIONES	104
5.2	RECOMENDACIONES	105
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS		106

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 <i>Satélites actuales y futuros</i>	10
Tabla 2 <i>Características de las ondas portadoras base y modernizadas</i>	17
Tabla 3 <i>Aplicaciones y funciones</i>	29
Tabla 4 <i>Coefficientes de las funciones de mapeo seca y húmeda</i>	34
Tabla 5 <i>Clasificación de la lluvia según su intensidad en una hora</i>	42
Tabla 6 <i>Constantes de Refractividad adoptadas en diferentes estudios</i>	49
Tabla 7 <i>Valores Críticos en función del tamaño de la muestra y nivel de significancia</i>	54
Tabla 8 <i>Valores Críticos de la distribución normal Z para pruebas de una y dos colas</i>	60
Tabla 9 <i>Archivos de corrección</i>	63
Tabla 10 <i>Niveles del estado de salida de la solución</i>	68
Tabla 11 <i>Parámetros considerados</i>	74
Tabla 12 <i>Mayores episodios de lluvia</i>	85
Tabla 13 <i>Contenido de PWV para el total de los datos diarios, en días lluviosos y sin precipitaciones</i>	92
Tabla 14 <i>Estadísticos de la prueba K-D test</i>	95
Tabla 15 <i>Estadísticos de las soluciones de PWV-PPP y PWV-IGM</i>	99
Tabla 16 <i>Estadísticos de las diferencias entre PWV-PPP y PWV-IGM y de las diferencias de ZTD</i>	101

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Ubicación geográfica de la estación de monitoreo continuo EPEC y estación meteorológica.....	5
Figura 2. Funcionamiento básico de GPS	8
Figura 3. Arquitectura GNSS	9
Figura 4. Segmento de Control – GPS	11
Figura 5. Retraso de la señal	12
Figura 6. Espectro de las señales Actuales.....	16
Figura 7. Refracción atmosférica de la señal GPS	18
Figura 8. Fase Wind-up en la antena del satélite	23
Figura 9. Centro de Fase de la antena del receptor	26
Figura 10. RTKLAUCH.....	29
Figura 11. Estructura de la atmósfera.....	38
Figura 12. Pluviómetro.....	41
Figura 13. Pluviógrafo	42
Figura 14. Radiosonda	45
Figura 15. Radiómetro de vapor de agua	45
Figura 16. Curva Normal	52
Figura 17. Dirección y nivel de fuerza del coeficiente de correlación.....	55
Figura 18. Nivel de Significancia para pruebas de dos colas.....	58
Figura 19. Diagrama metodológico.....	61
Figura 20. Estación de Monitoreo Continuo ESPE- EPEC.....	62

Figura 21. RTKPOST.....	65
Figura 22. Ventana de configuración 1- RTKPOST	66
Figura 23. Ventana de Salida	67
Figura 24. Ventana de Posiciones	69
Figura 25. Ventana de Archivos.....	70
Figura 26. Archivo de salida en formato EPECXXXX.pos	71
Figura 27. Archivo de salida en formato EPECXXXX.stat.....	71
Figura 28. Comparación de PWV y Precipitación el 1 de Diciembre del 2017.....	77
Figura 29. Comparación de PWV y Precipitación el 25 de Diciembre del 2017.....	78
Figura 30. Comparación de PWV y Precipitación para el 27 de Enero del 2018- Día con intensidad de precipitación de hasta 5 mm.	79
Figura 31. Serie de PWV en comparación con el evento de precipitación ocurrido del 31 de Diciembre del 2017 al 01 de Enero del 2018.	80
Figura 32. Comparación de PWV y Precipitación para días con intensidad de precipitación de hasta 10 mm.....	80
Figura 33. Comparación de PWV y Precipitación para el 23 de Noviembre del 2017- Día con intensidad de precipitación de hasta 15 mm.	81
Figura 34. Comparación de PWV y Precipitación para el 19 de Febrero del 2018- Día con intensidad de precipitación de hasta 15 mm.	82
Figura 35. Comparación de PWV y Precipitación para el 19 de Febrero del 2018- Día con intensidad de precipitación de hasta 15 mm.	83
Figura 36. Comparación de PWV y Precipitación para días con fuerte intensidad de precipitación.....	84

Figura 37. Contenido de Vapor de Agua y Precipitación diaria en el mes de Noviembre.	87
Figura 38. Contenido de Vapor de Agua y Precipitación diaria en el mes de Diciembre.	88
Figura 39. Contenido de Vapor de Agua y Precipitación diaria en el mes de Enero.	89
Figura 40. Contenido de Vapor de Agua y Precipitación diaria en el mes de Febrero	90
Figura 41. Serie total del PWV y Precipitación diaria para el periodo de estudio.....	91
Figura 42. Diagrama de caja del estimado de PWV en intervalos de una hora	93
Figura 43. Diagrama de caja de los valores promedio de PWV al día.....	94
Figura 44. Distribución de la variable PWV de la serie a intervalos de una hora y en valor promedio diario.....	95
Figura 45. Distribución de la variable Precipitación a intervalos de una hora y acumulada diaria.	96
Figura 46. Series de PWV-PPP y PWV-IGM	99
Figura 47. Prueba de hipótesis	100
Figura 48. Diferencias entre el PWV- PPP y PWV-IGM	101
Figura 49. Comparación entre las diferencias de ZTD y PWV obtenidos con ambas técnicas ..	103

RESUMEN

El vapor de agua ha sido ampliamente estudiado como constituyente importante en el desarrollo de procesos atmosféricos, relacionado a la ocurrencia de precipitaciones severas. Es así, que durante años se han utilizado diferentes instrumentos para su determinación, uno de ellos la radiosonda. Desafortunadamente, en el Ecuador se cuenta con pocos equipos de radiosondeo y su alto costo limita el número de lanzamientos. El objetivo del presente trabajo es estimar el Retardo Cenital Total (ZTD) de la estación EPEC usando la técnica de Posicionamiento Puntual Preciso (PPP), a fin de determinar la cantidad de vapor de agua precipitable (PWV) y su relación con la precipitación. Para ello, se utilizó el software RTKLIB e información meteorológica del sitio. Para validación de resultados, se compararon los PWV obtenidos con PPP respecto al método relativo utilizado por el Instituto Geográfico Militar (IGM), el cual es un método más preciso. Como resultado de la correlación entre PWV y precipitación se obtuvo un coeficiente de 0.65, que indica una correlación fuerte entre las variables. De la comparación entre ambas técnicas, se obtuvieron diferencias bajo los 5 mm el 80.49% de los casos. Concluyendo que, la técnica PPP permite la estimación de PWV con diferencias promedio de 3 mm respecto al método relativo. Además, se identificó en los días con PWV mayores a 22.74 mm existen precipitaciones, y menores a 17.29 mm no existe precipitaciones; y el PWV comprendido entre estos extremos marca un tramo de incertidumbre en el que puede o no presentarse episodios de lluvia.

Palabras Clave:

- **POSICIONAMIENTO PUNTUAL PRECISO**
- **VAPOR DE AGUA PRECIPITABLE**
- **RETARDO CENITAL TOTAL**
- **PRECIPITACIÓN**

ABSTRACT

Water vapor has been widely studied as an important constituent in the development of atmospheric processes, related to the occurrence of severe rainfall. For years, different instruments have been used for its determination, one of them the radiosonde. Unfortunately, in Ecuador there are few radiosonde equipment and its high cost limits the number of launches. The objective of this paper is to estimate the Zenith Total Delay (ZTD) of the EPEC station using the Precise Point Positioning (PPP) technique, in order to determine the amount of precipitable water vapor (PWV) and its relation to precipitation. For this, RTKLIB software and meteorological information of the site were used. In addition, the PWV obtained with PPP were compared with the relative method used by the Military Geographical Institute (IGM), which is a more precise method. As a result of the correlation between PWV and precipitation, a coefficient of 0.65 was obtained, which indicates a strong correlation between the variables. From the comparison between both techniques, differences were obtained under 5 mm in 80.49% of the cases. Concluding that, the PPP technique allows the estimation of PWV with average differences of 3 mm with respect to the relative method. In addition, it was identified in the days with PWV greater than 22.74 mm there is precipitation, and less than 17.29 mm there is no precipitation; and the PWV between these extremes marks a stretch of uncertainty in which episodes of rain may or may not occur.

Keywords:

- **PRECISE POINT POSITIONING**
- **PRECIPITABLE WATER VAPOR**
- **ZENIT TOTAL DELAY**
- **PRECIPITATION**

CAPÍTULO I

ASPECTOS GENERALES

1.1 ANTECEDENTES

El vapor de agua atmosférico ha sido ampliamente estudiado como constituyente importante en el desarrollo de procesos atmosféricos. Dentro de la comunidad meteorológica, se lo usa principalmente en el desarrollo de modelos numéricos de tiempo, investigación del clima y química de la atmósfera. Comúnmente, es medido in situ, utilizando instrumentos a bordo de globos y aviones, o mediante técnicas de teledetección (Dlugokencky et al., 2016).

En las últimas décadas, el sistema Global Navigation Satellite System (GNSS) cuyo propósito original es el de posicionamiento y navegación está siendo utilizado en diferentes campos de aplicación. Tal es el caso del uso de GPS con enfoque meteorológico, propuesto por primera vez por Bevis et al. (1992) para la detección remota de vapor de agua atmosférico. En su estudio expuso que las observaciones GPS son datos globales a partir de los que se puede obtener información atmosférica derivada de la propagación de la señal.

A partir de ello, surgieron varios estudios enfocados a la meteorología GPS que han demostrado que los estimados de vapor de agua obtenidos con GPS tienen precisiones comparables con los datos medidos por sensores meteorológicos. (Cuixian, 2016). Uno de ellos es el realizado por Rocken et al. (2003) en el que afirman que el vapor de agua determinado con GPS puede medirse con precisiones de 1.5 milímetros comparadas con soluciones de radiómetros de vapor de agua y radiosondas.

Otros estudios han considerado la inclusión del PWV obtenido con GPS en modelos numéricos del tiempo. Yuga & Yamada (2013) demostró que los modelos estadísticos que consideran el PWV total y la inestabilidad vertical atmosférica mostraron ser relativamente más sensibles al pronóstico de lluvias fuertes que aquellos que no las consideraron. Falvey & Beavan (2002) en el que se determinó que la asimilación del contenido de PWV-GPS a intervalos de una hora en modelos a mesoescala de predicción de precipitación, produce mejoras estadísticas entre el coeficiente de correlación de la precipitación observada y la modelada, el cual aumenta de 0.57 a 0.65 y de 0.65 a 0.7 para grillas de 15 Km y 5 Km respectivamente.

En Latinoamérica, la disponibilidad de la infraestructura de estaciones de monitoreo continuo SIRGAS-CON hacen posible el desarrollo de estudios atmosféricos utilizando GPS (Mackern, et al., 2016). Cioce et al. (2011) realizaron los primeros ensayos en Venezuela para la determinación de vapor de agua troposférico por medio de GPS, los resultados fueron comparados con patrones de calidad externos obteniendo diferencias medias de $\pm 8 \frac{Kg}{m^2}$. Por otra parte, los primeros resultados en Argentina fueron dados por Fernández, Meza & Natali (2009), en el que se presentaron las ventajas del GPS respecto a otras técnicas.

En el Ecuador, el Instituto Geográfico Militar (IGM) ha realizado proyectos relacionados al estudio de la atmósfera mediante GPS en su departamento de Gestión de Investigación y Desarrollo. Para ello ha utilizado como insumo la Red GNSS de Monitoreo Continuo del Ecuador –REGME, conformada por 33 estaciones distribuidas en todo el territorio, muchas de las cuales cuentan con sensores meteorológicos integrados.

1.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Las precipitaciones extremas son efectos climáticos severos que han causado consecuencias adversas en el territorio ecuatoriano. En estos últimos años, se registraron grandes estragos en ciudades de la Costa y Sierra ecuatoriana donde se produjo inundaciones de calles, edificaciones y vías, ocasionando complicaciones en la movilidad tanto a conductores como a peatones. Según el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC) mundialmente se está observando un aumento de episodios de precipitación intensa, aún en lugares donde la precipitación total ha disminuido (Bates et al., 2008).

Estos eventos climáticos están relacionados con el vapor de agua presente en la atmósfera (Cai & Resch, 2012, citado en Yuan, 2015), por lo que el estudio de su comportamiento y relación con la precipitación es esencial. Es así, que durante años se han aplicado diferentes métodos e instrumentos para la determinación de este gas a nivel troposférico, sin embargo a la fecha no existe una caracterización completa del mismo (Cioce et al., 2011)

Uno de los instrumentos que permiten la medición de esta variable en la atmósfera es la radiosonda. La radiosonda es un dispositivo compuesto de varios sensores enviados a la atmósfera mediante el uso de un globo meteorológico, los datos obtenidos son transmitidos a una estación terrestre para ser decodificados y analizados (Organización Meteorológica Mundial, 2010). Desafortunadamente, en el Ecuador se cuenta únicamente con dos equipos de sondeo de este tipo y su alto costo limita el número de lanzamientos. Como resultado en el país existe una baja distribución espacial y temporal de esta información, por lo que es necesario explorar metodologías alternas que permitan el estudio del vapor de agua presente en la atmósfera, siendo estas opciones viables de bajo costo que obtengan resultados precisos e inmediatos.

1.3 JUSTIFICACIÓN

El uso de la infraestructura GPS se plantea como una alternativa para la estimación de vapor de agua atmosférico frente a la carencia instrumentos con suficiente resolución temporal y espacial. Que además, permite el aprovechamiento de la infraestructura GPS existente, cuyos receptores proporcionan observaciones oportunas y continuas en cualquier parte del territorio.

Actualmente, se puede estimar el valor del vapor de agua precipitable (PWV) de la atmósfera mediante el procesamiento de observaciones GPS de una sola estación de referencia, eliminando así las limitaciones de los sistemas basados en la doble diferencia de fase que requieren una distancia mínima entre estaciones y un valor de PWV absoluto (Shi et al., 2015). Esta técnica es conocida como el Posicionamiento Puntual Preciso (PPP), la cual se presenta como una alternativa útil, accesible y de bajo costo operativo.

Además, en el Ecuador no se han registrado estudios relacionados a la estimación de vapor de agua precipitable mediante la técnica de Posicionamiento Puntual Preciso y su relación con la precipitación, por lo que en esta investigación aporta los primeros resultados.

1.4 UBICACIÓN DEL ESTUDIO

La Figura 1, muestra la ubicación de la estación de monitoreo continuo y meteorológica, utilizadas para el desarrollo de este proyecto.

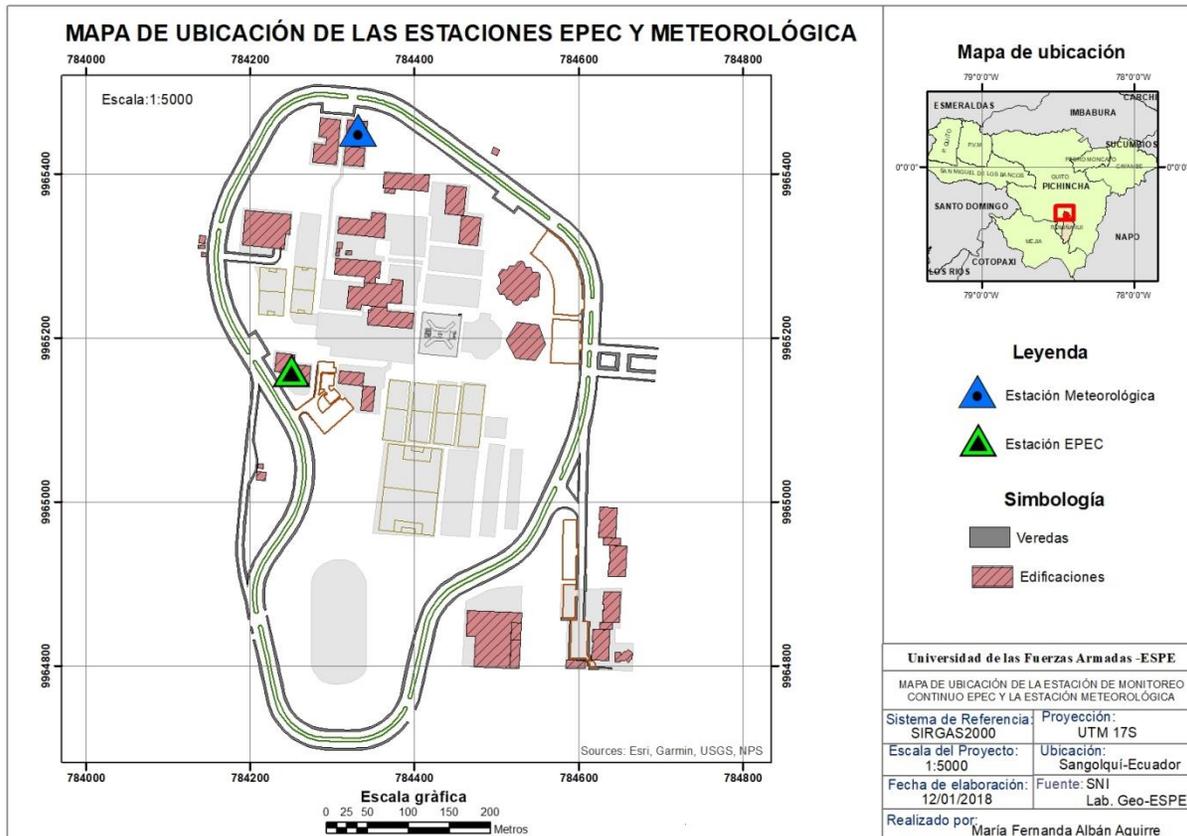


Figura 1. Ubicación geográfica de la estación de monitoreo continuo EPEC y estación meteorológica

Como se observa en la Figura 1, la estación de monitoreo continuo utilizada es la EPEC, la cual está ubicada en la provincia de Pichincha, ciudad de Sangolquí y cuyas coordenadas SIRGAS oficiales en la semana 1982 correspondiente a la primera semana del año 2018 son: X: 1277936.90946, Y: -6251278.07091 y Z: 34832.41370.

1.5 OBJETIVO GENERAL

Estimar el Retardo Cenital Total (ZTD) en post proceso a partir de la estación de monitoreo continuo EPEC usando la técnica de Posicionamiento Puntual Preciso (PPP), a fin de determinar la cantidad de Vapor de Agua Precipitable (PWV) y su relación con la precipitación.

1.6 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Procesar observaciones GPS de al menos 30 días comprendidos entre el período de noviembre 2017 a enero 2018, utilizando el software libre RTKLIB v2.4.2 para recuperar el ZTD.
- Calcular el Retardo Cenital Húmedo (ZWD) a partir del ZTD recuperado para estimar el PWV en intervalos de 1 hora y el valor promedio diario.
- Comparar PWV estimado con datos de precipitación de la estación meteorológica para reconocer patrones que permitan diferenciar días lluviosos de aquellos que no presentan precipitaciones.

1.7 METAS

- Obtener una base de datos de coordenadas y ZTD recuperados del procesamiento, en intervalos de una hora.
- Generar una base de datos con valores de PWV de la estación EPEC en intervalos de una hora y en promedio diario.
- Generar al menos 30 gráficas comparativas del comportamiento diario de PWV de la estación EPEC y la precipitación, en intervalos de una hora.
- Generar un gráfico del contenido promedio de PWV y precipitación acumulada diaria.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1 SISTEMA DE POSICIONAMIENTO GLOBAL GPS

El GNSS (Global Navigation Satellite System) es la constelación de satélites que orbitan la Tierra y que continuamente transmiten señales, proporcionando a los usuarios servicios de navegación, temporización (PNT) y posicionamiento a escala global (National Coordination Office, 2018). Durante años, el único sistema GNSS totalmente operativo fue el Sistema de Posicionamiento Global (GPS), mientras que otros se fueron implementando al pasar del tiempo (Sanz, Zornoza, & Hernández, 2013).

En 1973 fue implementado el sistema de posicionamiento NAVSTAR-GPS (Navigation System with Time and Ranging Global Positioning System), desarrollado por el Departamento de Defensa de los Estados Unidos (Huerta, Mangiaterra, & Noguera, 2005). Originalmente fue diseñado para satisfacer requerimientos de uso militar, pero en la actualidad se ha convertido en la herramienta base del posicionamiento geodésico, puesto a disposición de la población civil a partir del año 1983. Este sistema está formado por 31 satélites operativos, distribuidos en órbitas terrestres a una altitud aproximada de 20.200 km respecto a la superficie terrestre (National Coordination Office, 2018).

El objetivo de GPS es la determinación de coordenadas espaciales respecto a un sistema de referencia. Estas coordenadas se obtienen a partir de las distancias determinadas por el tiempo de viaje de las señales emitidas por los satélites (al menos 4) hacia los receptores en tierra (Huerta,

Mangiaterra, & Noguera, 2005). Las coordenadas de usuario resultantes pueden calcularse con una precisión de varios metros (ver figura 2). Sin embargo, a nivel de centímetro el posicionamiento se puede lograr usando técnicas más avanzadas (Sanz, Zornoza, & Hernández, 2013).

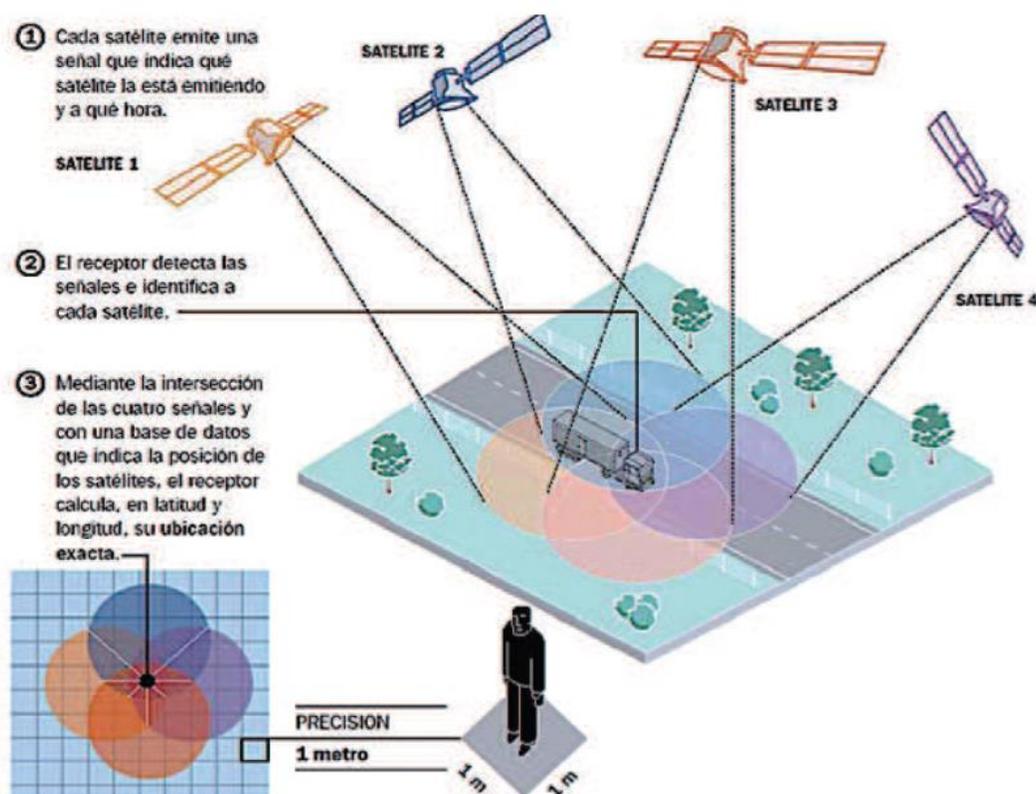


Figura 2. Funcionamiento básico de GPS
Fuente: (European Space Agency, citado en Mussi, 2005)

2.1.1 Componentes del GPS

El sistema GNSS básicamente consta de tres segmentos principales: el segmento espacial, que comprende los satélites; el segmento de control también conocido como el segmento de tierra, que es responsable del correcto funcionamiento del sistema; y el segmento del usuario, que

incluye los receptores GNSS que proporcionan posicionamiento, velocidad y sincronización precisa para los usuarios (ver figura 3) (Sanz, Zornoza, & Hernández, 2013).

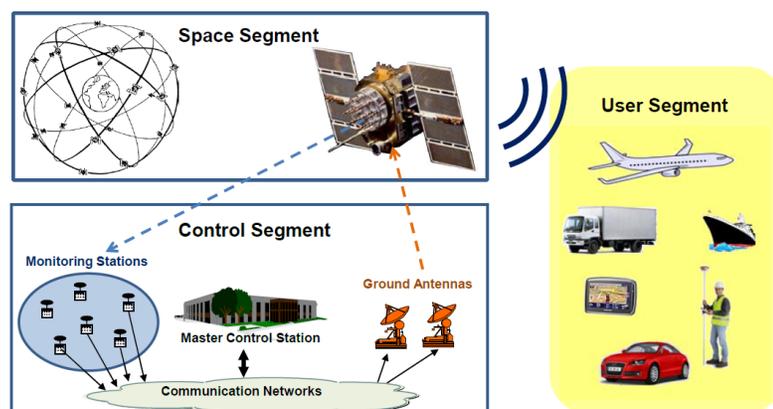


Figura 3. Arquitectura GNSS
Fuente: (Sanz, Zornoza, & Hernández, 2013)

2.1.1.1 Segmento espacial

El segmento espacial de la constelación GPS está formado por un conjunto de satélites que continuamente emiten radioseñales a los usuarios. El gobierno de los Estados Unidos (EEUU) se ha comprometido a mantener al menos 24 de ellos en modo operativo el 95% del tiempo. Cantidad suficiente para garantizar que los usuarios tengan disponibilidad simultánea de al menos cuatro satélites desde cualquier punto de la superficie de la Tierra (National Coordination Office, 2018). Las principales funciones del segmento espacial son generar y transmitir código y señales de fase de portadora, y para almacenar y difundir el mensaje de navegación cargado por el segmento de control. Estas transmisiones están controladas por relojes atómicos altamente estables a bordo de los satélites (Sanz, Zornoza, & Hernández, 2013).

El actual segmento espacial de GPS, está conformado por satélites de la antigua y nueva generación .En la Tabla 1 muestra las características de dichas generaciones dadas por la National Coordination Office (2018). Cabe señalar que las señales de navegación de los satélites expuestas en la Tabla 1 se describen en el la sección 2.1.3.

Tabla 1
Satélites actuales y futuros

Satélites heredados		Satélites modernizados		
Bloque IIA	Bloque IIR	Bloque IIR-M	Bloque IIF	GPS III / IIIF
1 operacional	11 operacional	7 operacional	12 operacional	En producción
-Código de Adquisición Coarse (C / A) en la frecuencia L1 para usuarios civiles	-C / A código en L1 -Código P (Y) en L1 y L2 -Monitoreo del reloj a bordo	-Todas las señales heredadas -2da señal civil en L2 (L2C)	-Todas las señales del bloque IIR-M -3.ª señal civil en frecuencia L5 (L5) -Relojes atómicos avanzados -Mejora en la precisión, potencia de la señal y calidad	-Todas las señales del bloque IIF 4ª señal civil en L1 (L1C) -Fiabilidad, precisión e integridad mejoradas de la señal -Sin disponibilidad selectiva
-Código P (Y) preciso en frecuencias L1 y L2 para usuarios militares	-Vida útil de diseño de 7.5 años -Lanzado en 1997-2004	-Nuevas señales de código M militares para mejorar la resistencia al atasco -Niveles de potencia flexibles para señales militares	-Mejora en la precisión, potencia de la señal y calidad -Vida útil de diseño de 12 años	-Vida útil de diseño de 15 años
-Vida útil de diseño de 7.5 años				
-Lanzado en 1990-1997		-Vida útil de diseño de 7.5 años	-Lanzado en 2010-2016	-IIIF: reflectores láser; búsqueda y rescate de carga útil
-Último desmantelado en 2016		-Lanzado en 2005-2009		-Primer lanzamiento en 2018

Fuente: (National Coordination Office, 2018)

2.1.1.2 Segmento de control

Es también conocido como segmento de tierra y es el responsable para el correcto funcionamiento de GPS, cuyas funciones son: controlar y mantener el estado y la configuración de la constelación de satélites; predecir efemérides y evolución del reloj satelital; mantener la escala de tiempo GPS correspondiente (a través de relojes atómicos) y actualizar los mensajes de navegación para todos los satélites (Sanz, Zornoza, & Hernández, 2013). Este segmento está compuesto por una red de estaciones de monitoreo que incluyen: una estación de control maestro, una estación de control maestro alternativo, 11 antenas en tierra y 16 puntos de monitoreo (National Coordination Office, 2018) (ver figura 4).

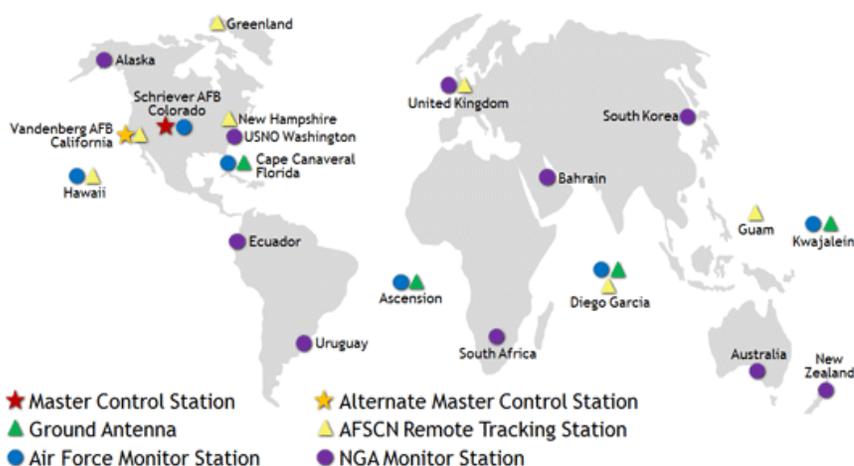


Figura 4. Segmento de Control – GPS
 Fuente: (National Coordination Office, 2018)

2.1.1.3 Segmento de usuario

El segmento de usuario está compuesto de receptores GNSS. Su función principal es recibir señales GNSS, para determinar pseudo rangos (y otros observables) y resolver las ecuaciones de navegación para obtener las coordenadas y proporcionar un tiempo muy preciso (la

posición calculada se refiere al centro de fase de la antena (Sanz, Zornoza, & Hernández, 2013). Los elementos básicos de un receptor GNSS genérico son la antena con pre amplificación, sección de frecuencia de radio, microprocesador, oscilador de precisión intermedia, fuente de alimentación, memoria para datos de almacenamiento e interfaz con el usuario.

2.1.2 Los observables GPS

Para poder determinar la posición de un punto utilizando GPS es necesario determinar las distancias entre los satélites observados y el receptor. Estos observables, se obtienen de la medición de código o por diferencias de fase (Nieto, 2016).

2.1.2.1 Medición de código

También conocido como pseudorange, hace referencia a la distancia entre satélite y receptor, obtenida por la correlación de los códigos de ruido pseudo aleatorio, el recibido del satélite y el autogenerado por el receptor o réplica (ver figura 5) (Huerta, Mangiaterra, & Noguera, 2005). Como resultado se obtiene el desplazamiento de la señal, interpretada como el tiempo que se demora en viajar desde el satélite hasta llegar al receptor (Nieto, 2016).

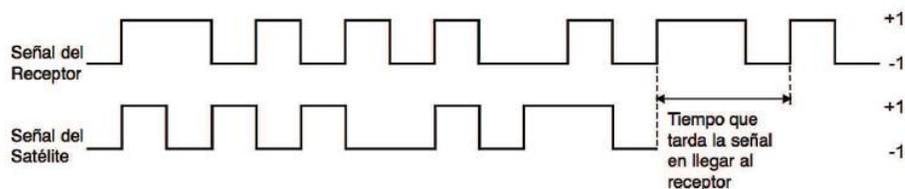


Figura 5. Retraso de la señal
Fuente: (Leica Geosystems AG, 2008)

Si la señal GPS viajara en el vacío libre de retrasos y errores, entonces vendría dada por la distancia geométrica satélite-receptor (ρ) expresado en la ecuación (1).

$$\rho = \sqrt{(X_s - X)^2 + (Y_s - Y)^2 + (Z_s - Z)^2} \quad (1)$$

Donde:

- (X_s, Y_s, Z_s) Coordenadas de los satélites calculadas utilizando efemérides transmitidas.
- (X, Y, Z) Coordenadas desconocidas del receptor

Considerando el retraso de los relojes del satélite y el receptor en referencia al tiempo GPS, se obtiene la ecuación (2) (Hofmann, Lichtenegger, & Collins, 1997):

$$\Delta t = [t_r(GPS) + \delta_r] - [t_s(GPS) + \delta_s] \quad (2)$$

$$\Delta t = \Delta t(GPS) + \Delta\delta$$

Donde:

- t_s lectura del reloj del satélite en el tiempo de emisión.
- t_r lectura del reloj del receptor en el tiempo de recepción de la señal.
- δ_s Desfase entre el reloj del satélite y el tiempo GPS.
- δ_r Desfase entre el reloj del receptor y el tiempo GPS,
- Δt diferencia de lectura de los relojes del satélite y el receptor.
- $\Delta\delta$ diferencia de los retrasos de los relojes.

Entonces, la distancia entre satélite y receptor obtenida por medición de código (l_p) se obtienen del producto del tiempo (Δt) y la velocidad de la luz (c) en el espacio, con la ecuación (3) definida en Hofmann, Lichtenegger & Collins (1997), que además puede expresarse como se muestra en la ecuación (4).

$$l_p = c\Delta t = c\Delta t(GPS) + c\Delta\delta = \rho + c\Delta\delta \quad (3)$$

$$l_p = \rho + c * (\delta_r - \delta_s) + \varepsilon_p \quad (4)$$

2.1.2.2 Medición de fase

La diferencia entre la fase emitida por el satélite hacia el receptor y la fase generada por el oscilador interno es conocida como la fase observable (ϕ), cuya formulación matemática descrita por Misra & Enge (2011) citado en Wenyou (2008) se muestra en la ecuación (5).

$$\phi = \lambda^{-1}\rho + f(\delta_r - \delta_s) + N + \varepsilon_\phi \quad (5)$$

Donde:

- N Ambigüedad
- f Frecuencia de la portadora
- λ Longitud de onda portadora
- ρ Distancia geométrica entre el satélite y el receptor.
- δ_r Desfase entre el reloj del receptor y el tiempo GPS.
- δ_s Desfase entre el reloj del satélite y el tiempo GPS.

- ε_ϕ Componente del ruido de las mediciones y multipath

Para que esta observable (ver ecuación 5) pueda convertirse a unidades de longitud, es multiplicada por la longitud de onda (ver ecuación 6), quedando expresada por la ecuación (7), donde (l_ϕ) representa la medición de fase.

$$l_\phi = \lambda\phi \tag{6}$$

$$l_\phi = \rho + \lambda f(\delta_r - \delta_s) + \lambda N + \lambda\varepsilon_\phi \tag{7}$$

La frecuencia está relacionada a la velocidad de la luz (c) y la longitud de onda (ver ecuación 8), que reemplazada en la ecuación (7) queda expresada como se observa en la ecuación (9).

$$f = \frac{c}{\lambda} \tag{8}$$

$$l_\phi = \rho + c(\delta_r - \delta_s) + \lambda N + \varepsilon_\phi \tag{9}$$

Como se observa en las ecuaciones (4) y (9), la diferencia entre la medición fase y pseudo rango, está en la presencia del término ambigüedad que hace referencia al número entero de ciclos (oscilaciones) en la señal emitida del satélite y el receptor, que se mantienen siempre y cuando no hay pérdida de la señal.

2.1.3 La señal GPS

Los osciladores de los satélites producen una frecuencia fundamental de 10.23 Mhz de la que se derivan las ondas portadoras L_1 y L_2 , así como los códigos (P y C/A) (Huerta, Mangiaterra, & Noguera, 2005). La modernización de la señal GPS ha permitido la inclusión de una frecuencia más (frecuencia L_5), y además la incorporación de varios códigos en las portadoras, dando nacimiento así a las señales civiles L_{1C} , L_{2C} y L_{5C} , además del código militar M (Sanz, Zornoza, & Hernández, 2013). En la Figura 6, se puede observar las diferentes señales, sus frecuencias y los códigos incorporados a cada una de ellas. Las características de dichas señales dadas por la National Coordination Office (2008) de los Estados Unidos se muestran en la Tabla 2.

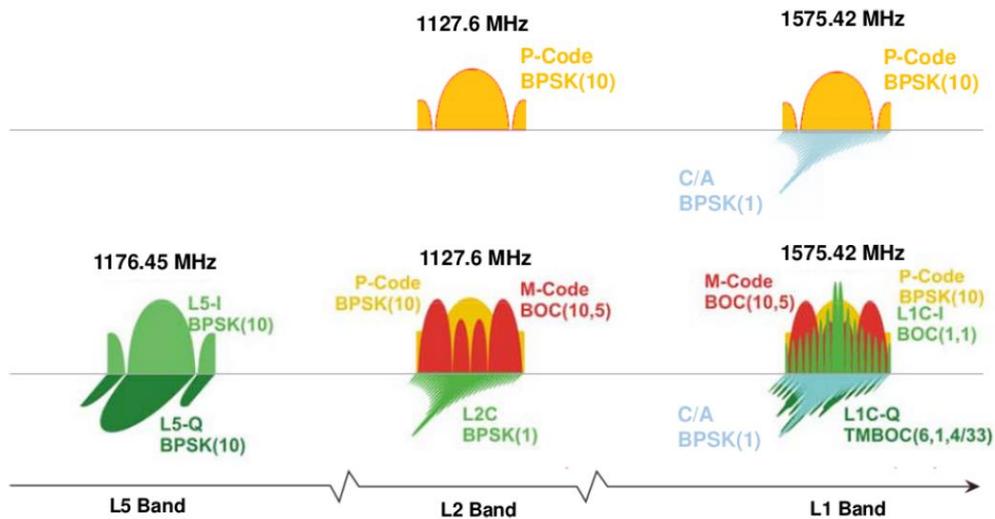


Figura 6. Espectro de las señales Actuales
Fuente: (Sanz, Zornoza, & Hernández, 2013)

Tabla 2*Características de las ondas portadoras base y modernizadas*

Nombre	Frecuencia	Descripción
L_1	1575 MHz	<ul style="list-style-type: none"> • Modulado por el código C / A y P • Utilizado para transmitir la señal L_{2C} y el código M
L_2	1227 MHz	<ul style="list-style-type: none"> • Modulado por el código P • Utilizado para transmitir la señal L_{2C} y el código M
L_5	1176 MHz	<ul style="list-style-type: none"> • Señal civil destinada a seguridad aérea y otras aplicaciones • Inicio de transmisión en el 2010 • Mayor ancho de banda, diseño avanzado • Transmitida por satélites del Bloque II-F • A futuro, mediante la aplicación de la técnica “trilaning”, será posible el uso de tres frecuencias (L_{1C}, L_{2C} y L_5) a fin de mejorar la precisión. • Estado: pre operativo
L_{2C}	1227 MHz	<ul style="list-style-type: none"> • Señal civil destinada a fines comerciales • Transmitida por los satélites del Bloque IIR-M • En combinación con L_1 /CA permite realizar correcciones de la ionosfera para mejorar la precisión • Adquisición de la señal en menor tiempo, de manera más confiable y con un rango de operación mayor. • Mayor potencia de la señal • Estado: pre operativo
L_{1C}	1575 MHz	<ul style="list-style-type: none"> • Señal civil destinada a proporcionar una mayor interoperabilidad entre GPS y otros sistemas satelitales • Será transmitida por GPS III en la misma frecuencia que L_1 C/A (conservando compatibilidades)

Fuente: Modificado de (National Coordination Office, 2018)

El código C/A mencionado en la Tabla 2 y mostrado en la Figura 6, es un código pseudo aleatorio diferente para cada satélite GPS, utilizado su identificación. Por otra parte, el código P (P-Code, precise), posee precisión en la medición del retraso en el tiempo de propagación de la señal, este modula las señales L_1 y L_2 y es de uso militar (Navarrete, 2012).

2.1.4 Refracción atmosférica de la señal GPS

La señal GPS en su recorrido del satélite al receptor se propaga al paso por la atmósfera terrestre (ver figura 7), lo que produce cambios su dirección, intensidad y velocidad. En la parte práctica, la atmósfera es un medio que produce perturbaciones y errores en la medición de las observables GPS. Como consecuencia, se ha modelado su influencia a fin de aplicarla dentro del proceso de ajuste (Seeber, 2003).

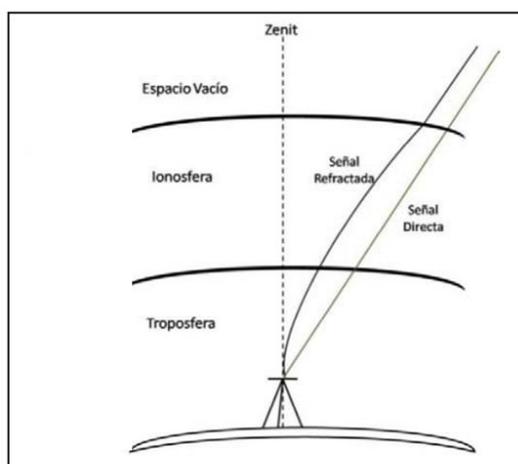


Figura 7. Refracción atmosférica de la señal GPS

Fuente: (Cioce et al, 2011)

La refracción atmosférica es influenciada en mayor parte por la ionosfera y troposfera. Estas capas presentan diferentes condiciones de propagación, por lo que en general han sido discutidas de manera separada.

2.1.5 Retardo ionosférico

La capa ionosférica es un medio dispersivo para las ondas de radio, cuya propagación depende de las frecuencias de las portadoras. Así también, depende del contenido de electrones libres en suspensión, cuya densidad (n_e) medida en m^3 varía acorde a la altura (Capilla, 2015).

La formulación matemática para el cálculo del retardo ionosférico (d_{ion}) derivado por Klobuchat (1996) citado en Mannuci et al. (1999) se muestra en la ecuación (10).

$$d_{ion} = \frac{40.3}{f^2} \int_r^{Sat} n_e dl \quad (10)$$

La expresión presentada en la ecuación (11) representa el contenido total de electrones (TEC) en la trayectoria satélite-receptor.

$$TEC = \int_r^{Sat} n_e dl \quad (11)$$

2.1.6 Retardo troposférico

La troposfera es la parte más baja de la atmósfera terrestre, la cual llega a una altitud aproximada de 15 Km respecto a la superficie terrestre (Buchdahl, 1999). Al ser un medio no dispersivo para las ondas de radio frecuencia, su propagación no depende del tipo de portadora utilizada. Esta característica hace imposible la eliminación de la propagación de la señal por medio de la doble diferencia de fase (Nieto, 2016). El efecto completo de la propagación de la señal troposférica o retardo troposférico (d_{Trop}) en su viaje satélite-receptor viene dado por la integral de la refractividad de la troposfera (N_{Trop}), como se muestra en la ecuación (12).

$$d_{trop} = 10^{-6} \int N_{Trop} ds \quad (12)$$

Este efecto, se divide en una fase seca (S_d) y otra húmeda (S_w) (ver ecuación 13), que corresponde a alrededor del 90% y 10% del retraso, respectivamente.

$$d_{Trop} = \Delta S_d + \Delta S_w = 10^6 \int_R^{H_d} N_d ds + 10^{-6} \int_R^{H_w} N_w ds \quad (13)$$

Donde:

N_d, N_w Refractividad de la parte seca y húmeda de la tropósfera.

H_d, H_w Altura de la parte seca y húmeda

2.2 EL POSICIONAMIENTO PUNTUAL PRECISO (PPP)

2.2.1 Generalidades

El PPP es una técnica de posicionamiento absoluto, la cual aplica modelos de corrección de los factores que influyen en su precisión como son la ionósfera y tropósfera, además de las correcciones de órbitas, rotación de la tierra, relojes de los satélites y receptor, cargas oceánicas entre otras, obteniendo así coordenadas de puntos con mejores precisiones (Paredes, 2013). Aplicando a grandes períodos de observación, se puede estimar la posición de un punto con exactitud centimétrica, en modo estático, y sub- decimétrica en modo cinemático (Leick, 2004). Esta técnica no utiliza mediciones simultáneas entre estaciones de referencia, receptor y base de coordenadas conocidas, por lo que no está limitada a la longitud de la línea base (Acuña, 2008). A continuación se muestran las ecuaciones de observación de la técnica PPP modificadas de

Yuan. (2015) para la medición de código (ver ecuación 16) y para la medición de fase (ver ecuación 17).

$$l_p = \rho + c * (\delta_r - \delta_s) + d_{ion} + d_{trop} + d_{ant} + d_{rot} + d_{orb} + d_{otl} + d_{set} + \varepsilon_p \quad (14)$$

$$l_\phi = \rho + c * (\delta_r - \delta_s) - d_{ion} + d_{trop} + d_{ant} + d_{rot} + d_{orb} + d_{otl} + d_{set} + d_{windup} + N\lambda + \varepsilon_\phi \quad (15)$$

Donde:

- l_p Medición de código
- l_ϕ Medición de fase
- ρ Distancia geométrica entre el satélite y el receptor.
- δ_r Desfase entre el reloj del receptor y el tiempo GPS.
- δ_s Desfase entre el reloj del satélite y el tiempo GPS.
- c Velocidad de la luz.
- d_{trop} Retardo troposférico.
- d_{ion} Retardo ionosférico.
- d_{ant} Compensación del centro fase de la antena del receptor y variación de la antena satelital
- d_{rot} Efecto de la rotación de la Tierra
- d_{orb} Error de órbita.
- d_{windup} Fase wind-up
- d_{otl} Efecto de las cargas oceánicas
- d_{set} Efecto de las mareas terrestres

- N Ambigüedad
- λ Longitud de onda de la portadora
- $\varepsilon_p, \varepsilon_\phi$ Componentes del ruido de las mediciones y multipath.

2.2.2 Correcciones para el método PPP

En este apartado se describen las correcciones de la técnica, las cuales están en función de los efectos de los satélites y del desplazamiento del sitio de observación producto de la deformación terrestre.

2.2.2.1 Fase Wind-up

Cuando se produce un cambio en la orientación relativa entre la antena del satélite y el receptor debido a la rotación sobre el propio eje de una de las antenas, se altera las medidas observadas en la fase portadora de la señal GPS. Esto es conocido como el efecto Wind-up el cual puede producir un cambio de hasta un ciclo (Capilla, 2015).

Generalmente, las antenas de los receptores no presentan este tipo de rotaciones ya que están orientadas hacia una dirección fija. Al contrario de las antenas satelitales cuyos paneles giran lentamente hacia el sol (ver figura 8), este movimiento produce una ligera rotación la cual cambia la geometría entre el receptor y el satélite (Sanz, Zornoza, & Hernández, 2013).

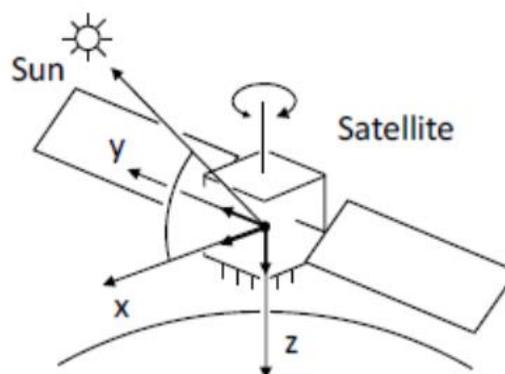


Figura 8. Fase Wind-up en la antena del satélite

Fuente: (Takasu, 2013)

2.2.2.1 Corrección de mareas terrestres

El fenómeno de las mareas sólidas produce variación en la ubicación del receptor, por efecto de la fuerza de atracción gravitacional de la luna y el sol ejercida sobre la corteza terrestre (Sanz, Zornoza, & Hernández, 2013). Este movimiento de la corteza produce desplazamientos periódicos horizontales y verticales, representados por armónicos esféricos, que dependen en cierto grado de la latitud de la estación y la frecuencia de la marea (Capilla, 2015).

2.2.2.2 Deformación rotacional debido al movimiento polar

También conocida como marea de polo, hace referencia a la deformación de la corteza terrestre debido a los cambios en el movimiento de rotación del polo (Bock, et al., 1998). Estos cambios, producen pequeñas variaciones en el potencial centrífugo que provocan deformaciones periódicas con variaciones máximas en la vertical de 2.5 cm y 0.7 cm para la horizontal (Kouba, 2009).

2.2.2.3 Corrección de cargas oceánicas

Es una respuesta elástica de la corteza terrestre producida por la distribución de las masas oceánicas, provocando deformaciones en el fondo del mar y superficies costaneras, y por ende desplazamientos en la vertical y horizontal de sus coordenadas (Bock, et al., 1998).

2.2.2.4 Corrección de los parámetros de rotación de la tierra (ERP)

Los parámetros de rotación de la Tierra permiten la transformación entre el sistema terrestre y celeste. Estos parámetros están conformados por la posición del polo (X_p, Y_p), el tiempo Universal (UT1) y el Tiempo Universal Coordinado (UTC), en conjunto con la nutación, precesión y convenciones para el tiempo sidéreo (Capilla, 2015).

Utilizando las órbitas precisas de la IGS en software comercial que trabaja directamente sobre el ITRF no es necesario el uso de los parámetros de rotación. En cambio cuando se utiliza un software en el marco inercial como el Bernesse, los archivos de rotación ERP son esenciales (Acuña, 2008).

2.2.2.5 Correcciones del desfase de los relojes del satélite.

Las correcciones de reloj son parámetros necesarios para estimar los pequeños errores estocásticos de los relojes atómicos de los satélites. Estos errores, se producen por el desfase del reloj del satélite respecto al tiempo GPS por pequeñas variaciones en la velocidad del oscilador (Cioce, 2009).

Ya que los satélites se encuentran en un campo gravitatorio más débil que el de la Tierra, son diseñados con un ligero atraso que hace que en órbita se estabilicen. De manera que logran

ajustarlos, sin embargo conservan una deriva de un nanosegundo producido cada tres horas (Vallero & Villén, 2013). Este comportamiento, se modela con la ecuación (16).

$$dt = a_o + a_1(t - t_0) + a_2(t - t_0)^2 \quad (16)$$

En PPP se considera la corrección de este error ya que la diferencia de un microsegundo corresponde a alrededor de 300 m de error en posición del satélite en órbita, factor que podría incurrir a errores en el posicionamiento del punto en tierra (Acuña, 2008).

Corrección

2.2.2.6 Corrección de la variación del centro de fase de las antenas de los receptores

En el posicionamiento GPS, las mediciones se realizan en referencia al centro de fase de la antena del receptor (APC). Para determinar la altura de la antena y conocer la posición del punto en tierra (MM), se requiere conocer la vinculación entre el APC y el punto de referencia externo (ARP) (Leick, 2004) (ver figura 9). Los procesos de calibración han permitido obtener esta información para diferentes tipos de antena, la cual ha sido recopilada por la IGS en los archivos PCV y ANTEX (Sanz, Zornoza, & Hernández, 2013).

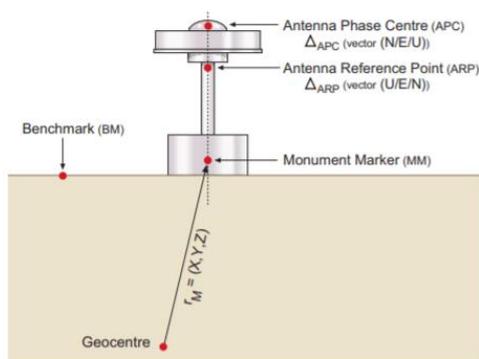


Figura 9. Centro de Fase de la antena del receptor

Fuente: (Sanz, Zornoza, & Hernández, 2013).

2.2.2.7 Sesgos (biases) diferenciales del código.

Acuña (2008) señala que “Los sesgos instrumentales C_{P1} , B_{P1} y B_{P2} con respecto a los códigos C1 (ó C/A), P1 Y P2 afectan a satélites y receptores. Es común entonces considerar las siguientes diferencias entre los sesgos de códigos las cuales son conocidas como sesgos diferenciales de código o DCBs” (p.154) (ver ecuaciones 17 y 18).

$$B_{P1} - B_{P2} = B_{P1-P2} \quad (17)$$

$$B_{P1} - B_{C1} = B_{P1-C1} \quad (18)$$

2.2.3 Tipos de PPP

Existen diferentes tipos de PPP, clasificados acorde a la manera en que se obtiene su solución, sea en post-proceso, tiempo real, modo estático o cinemático. A continuación, se presentan generalidades representativas de cada uno de ellos.

- **PPP en post-proceso**

Para el post procesamiento PPP se requiere de archivos RINEX de observación y productos de corrección. Según Capilla (2015) en la actualidad dichos productos están muy depurados. Paredes (2013) afirma que esta técnica permite obtener precisiones comparables a posicionamiento diferencial, siempre y cuando el período de observación sea el adecuado (largas horas de medición).

Este método puede ser realizado utilizando software científico (Bernese, GYPSI, entre otros), software libre (RTKLIB, BNC, entre otros) o servicios en línea (GAPS, CSRS,..) (Capilla, 2015).

- **PPP en tiempo real**

Esta técnica requiere de productos y modelos recibidos de manera continua por medio de paquetes de datos transmitidos por internet, que cumplan con parámetros de latencia y disponibilidad continua (Capilla, 2015).

- **PPP estático**

El PPP estático o tradicional, es aquel que mide un punto fijo sobre la superficie y filtra la información con el fin de que los resultados alcancen la mayor exactitud posicional (Paredes, 2013).

- **PPP cinemático**

Este método determina la posición época-por-época de un receptor que se encuentra en movimiento (Zumberge et al., 1997).

2.3 SOFTWARE RTKLIB

El software libre RTKLIB v2.4.2. desarrollado por Tomoji Takasu en el año 2013 como un paquete de programas de código abierto, disponible para su descarga en la web en: <http://www.rtklib.com/> (Takasu, 2013). Este software está constituido por un paquete de programas, cuyas principales características definidas en su manual de usuario son:

- Compatibilidad con los sistemas de posicionamiento GPS, GLONASS, Galileo, Beidou, SBAS, QZSS.
- Permite obtener soluciones en post- proceso y tiempo real, en modo de procesamiento estático y cinemático, utilizando simple y doble diferencia de fase, entre otros.
- Compatible con los formatos RINEX (2.10, 2.11, 2.12), RINEX (3.00, 3.01, 3.02), RTCM (2.3, 3.1, 3.2), BINEX, NTRIP 1.0, RTCA/DO-229C, NMEA 0183, SP3-c, ANTEX 1.4, IONEX 1.0, NGS PCV y EMS 2.0.
- Comunicación externa por medio de: TCP/IP, NTRIP, FTP/HTTP, Serial y archivo de registro local (Takasu, 2013).

2.3.1 Funciones y aplicaciones

Sus aplicaciones y funciones se presentan en la Tabla 3.

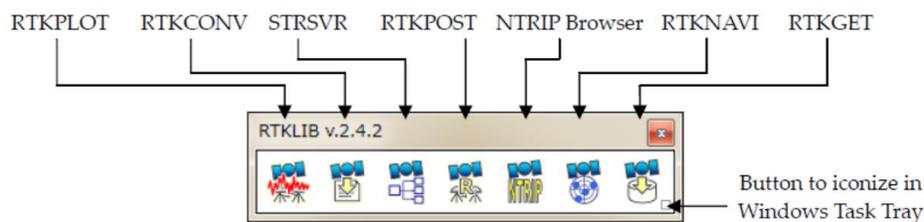
Tabla 3*Aplicaciones y funciones*

GUI AP (Aplicaciones)	Función
RTKLAUNCH (3.1)	Lanzador de AP
RTKNAVI (3.2, 3.3, 3.5)	Posicionamiento en tiempo real
STRSVR (3.3)	Servicio de Comunicación
RTKPOST (3.4, 3.5)	Post Procesamiento
RTKCONV (3.6)	Conversor a RINEX
RTKPLOT (3.7, 3.8)	Soluciones de trazado
RTKGET (3.9)	Descarga de datos

Fuente: (Takasu, 2013)

- **RTKLAUNCH**

Esta aplicación permite tener una ágil visualización y acceso al total de las aplicaciones que contiene el software (ver figura 10).

**Figura 10.** RTKLAUNCH

Fuente: (Takasu, 2013)

- **RTKPOST**

Aplicación utilizada para el post- procesamiento de observaciones GNSS en los modos: absoluto, DGPS/ DGNSS, estático, Cinemático y Posicionamiento Puntual Preciso PPP (estático y cinemático).

2.3.2 Modelos troposféricos

El software RTKLIB utiliza para la corrección de la refracción troposférica los modelos de Saastamoinen, SBAS y el preciso “Estimate ZTD”.

2.3.2.1 Modelo de Saastamoinen

Cuando se aplica el Modelo de Saastamoinen para la corrección del retraso troposférico (d_{trop}), la altura geodésica se aproxima a la elipsoidal (h), se utiliza una humedad relativa del 70% y productos derivados de la atmósfera estándar (SA) (Takasu, 2013). Su expresión está definida por la ecuación (19) dada por Takasu (2013) en el Manual de RTKLIB 2.4.2.

$$d_{trop} = \frac{0.002277}{\cos z} \left\{ P_t + \left(\frac{1255}{T_a} + 0.05 \right) P_p - \tan^2 z \right\} \quad (19)$$

Las variables de la atmósfera estándar: presión total en hPa (P_t) (ver ecuación 20), temperatura absoluta en °K (T_a) (ver ecuación 21), y presión parcial en hPa (P_p) (ver ecuación 22), dependen de la altura (h) y la humedad relativa (h_{rel}).

$$P_t = 101325 \times (1 - 2.2557 \times 10^{-5} h)^{5.2568} \quad (20)$$

$$T_a = 15.0 - 6.5 \times 10^{-3} h + 273.15 \quad (21)$$

$$P_p = 6.108 \times \exp\left\{\frac{17.15T_a - 4684.0}{T_a - 38.45}\right\} \times \frac{h_{rel}}{100} \quad (22)$$

Para calcular el ángulo cenital (z) expresado en la ecuación (19) el programa utiliza la ecuación (23), donde El_r^S es el ángulo de elevación.

$$z = \frac{\pi}{2} - El_r^S \quad (23)$$

2.3.2.2 Modelo Troposférico Preciso – “Estimate ZTD”

El software RTKLIB cuenta con un modelo propio para la corrección troposférica llamado “Estimate ZTD”, el mismo autor lo denomina como un modelo preciso (Takasu, 2013), cuya formulación se presenta en la ecuación (24).

$$d_{trop} = m_H(El_r^S)Z_{H,r} + m(El_r^S)(ZTD - ZHD) \quad (24)$$

$$m(El_r^S) = m_w(El_r^S)\{1 + \cot El_r^S(G_{N,r})\cos Az_r^S + G_{E,r}\sin Az_r^S\} \quad (25)$$

Donde:

- ZTD Retardo cenital total troposférico
- ZHD Retardo cenital hidrostático troposférico
- El_r^S Ángulo de elevación

- Az_r^S Azimut
- $m_H(El_r^S)$ Función hidrostática de mapeo
- $m_w(El_r^S)$ Función húmeda de mapeo
- $G_{N,r}, G_{E,r}$ Gradientes (únicamente utilizados para “Estimate ZTD+Grad”)

Cabe señalar que parte de este modelo se basa en el modelo de Saastamoinen, precisamente el retardo troposférico hidrostático (ver ecuación 24), utilizando una $h_{rel} = 0$ y, ángulo cenital (z) de 0° . Además, el programa aplica por defecto la función de mapeo de Niell (NMF) (Takasu, 2013), cuya base teórica se presentará en el siguiente apartado.

2.3.2.3 Función de mapeo de Niell (NMF)

Las funciones de mapeo troposférico se desarrollaron como un factor de corrección utilizado en la estimación del retardo en los diferentes ángulos en que se captó la señal. En 1996, Arthur Niell desarrolla empíricamente el NMF para el cálculo del retardo de la trayectoria hidrostática y húmeda en relación al retardo cenital de la señal (Niell, 1996). Para ello, utilizó perfiles de radio sondeo, y se basó en la ubicación geográfica y los cambios temporales. Cabe destacar, que al contrario que en otros modelos, este no requiere el uso de datos meteorológicos de superficie (Sakidin, Ahmad, & Bugis, 2014). Las funciones de mapeo hidrostática m_H y húmeda m_w definidas por Niell (1996) vienen dadas en función del ángulo de elevación (El_r^S), expresadas en las ecuaciones (26) y (27) respectivamente.

$$m_H(El_r^S) = \frac{1 + \frac{a}{1+b}}{\sin(El_r^S) + \frac{a}{\sin(El_r^S) + \frac{b}{\sin(El_r^S) + c}}} + \left[\frac{1}{\sin(El_r^S)} - \left(\frac{1 + \frac{a_H}{1+b_H}}{\sin(El_r^S) + \frac{a_H}{\sin(El_r^S) + \frac{b_H}{\sin(El_r^S) + c_H}}} \right) \right] h \quad (26)$$

$$m_w(El_r^S) = \frac{1 + \frac{a_w}{1+b_w}}{\sin(El_r^S) + \frac{a_w}{\sin(El_r^S) + \frac{b_w}{\sin(El_r^S) + c_w}}} \quad (27)$$

El parámetro a , a una latitud determinada (φ) en un tiempo (t) está expresada en la ecuación (28) como $a(\varphi, t)$, donde el tiempo (t) es día GPS y DOY (día del año) hace referencia a la fase adoptada, que para el hemisferio sur es 211 y para el hemisferio norte 28. La misma ecuación (ver ecuación 28) es utilizada para el cálculo de los parámetros b y c (Sakidin, Ahmad, & Bugis, 2014).

$$a(\varphi, t) = a_{avg}(\varphi) - a_{amp}(\varphi) \cos\left(2\pi \frac{t - DOY}{365.25}\right) \quad (28)$$

Los coeficientes a_H , b_H , y c_H utilizados en cálculo de la función de mapeo hidrostática (m_H) y los coeficientes a_w , b_w , y c_w utilizados en cálculo de la función de mapeo húmeda (m_w), dados por Niell (1996) se presentan en la Tabla 4.

Tabla 4
Coefficientes de las funciones de mapeo seca y húmeda

Coeficiente	Latitud				
	15°	30°	45°	60°	75°
a_H	$1.2769e^{-3}$	$1.2683e^{-3}$	$1.2465e^{-3}$	$1.2196e^{-3}$	$1.2045e^{-3}$
b_H	$2.9153e^{-3}$	$2.9152e^{-3}$	$2.9288e^{-3}$	$2.9022e^{-3}$	$2.9024e^{-3}$
c_H	$62.610e^{-3}$	$62.837e^{-3}$	$63.824e^{-3}$	$63.824e^{-3}$	$64.258e^{-3}$
a_w	$5.8021e^{-4}$	$5.6794e^{-4}$	$5.8118e^{-4}$	$5.9727e^{-4}$	$6.1641e^{-4}$
b_w	$1.4275e^{-3}$	$1.5138e^{-3}$	$1.4572e^{-3}$	$1.5007e^{-3}$	$1.7599e^{-3}$
c_w	$4.3472e^{-2}$	$4.6729e^{-2}$	$4.3908e^{-2}$	$4.4626e^{-2}$	$5.4736e^{-2}$

Fuente: (Niell, 1996)

2.3.3 Modelos ionosféricos

Para la corrección ionosférica el software cuenta con las opciones: Ion free LC, SBAS, Estimate STEC, IONEX TEC, QZSS Broadcast y QZSS LEX.

2.3.3.1 Modelo de Klobuchar

Cuando se escoge la opción “Broadcast” o “QZSS Broadcast” se aplica el modelo ionosférico de Klobuchar (Takasu, 2013). La ecuación para la estimación de la refracción ionosférica dada en el manual de RTKLIB 2.4.2, se observa en la ecuación (29), cuya función de mapeo F se muestra en la ecuación (30) y variable (x) en la ecuación (31), donde β_n y a_n son los coeficientes transmitidos por GPS y φ es la latitud geodésica.

$$d_{ion} = \left\{ F \times \left(5 \times 10^9 + \sum_{n=1}^4 a_n \varphi_m^n \times \left(1 - \frac{x^2}{2} + \frac{x^4}{24} \right) \right) \right\} \quad (29)$$

(30)

$$F = 1.0 \times 16.0 \times (0.53 - El_r^s)^3$$

(31)

$$x = 2\pi(t - 50400) / \sum_{n=0}^3 \beta_n \varphi_m^n$$

Este tipo de modelo de matemático es utilizado para receptores de una sola frecuencia y sus correcciones son transmitidas en el mensaje de navegación (Klobuchar, 1987).

2.3.3.2 Combinación libre de Ionósfera (Ion-Free)

Los efectos ionosféricos en la señal GPS para medición de la pseudo distancia y la fase, dependen en un 99% del inverso al cuadrado de la frecuencia de las portadoras. Entonces, el uso de los receptores doble frecuencia pueden eliminar casi en su totalidad la refracción ionosférica por medio de la combinación lineal de las medidas del código y de la portadora (Sanz, Zornoza, & Hernández, 2013). Este tipo de combinación es conocida en el RTKLIB como “Ion Free LC”, cuya formulación matemática dada en el manual RTKLIB 2.4.2 se observa en las ecuación (32) para la pseudo distancia y en la ecuación (33) para la medición de la fase portadora.

$$l_{p_{ion-free}} = C_i \rho_i + C_j \rho_j \quad (32)$$

$$l_{\phi_{ion-free}} = C_i \phi_i + C_j \phi_j \quad (33)$$

Los coeficientes C_i y C_j son obtenidos con las ecuaciones (34) y (35), donde f_i y f_j son las frecuencias de las portadoras L_i y L_j , que en GPS corresponden a la L_1 y L_2 .

$$C_i = \frac{f_i^2}{f_i^2 - f_j^2} \quad (34)$$

$$C_j = \frac{-f_i^2}{f_i^2 - f_j^2} \quad (35)$$

En el PPP es común utilizar la combinación libre de ionósfera LC, ya que este es uno de los efectos más difíciles de modelar.

2.4 FUNDAMENTOS DE METEOROLOGÍA

2.4.1 La Atmósfera

La atmósfera es la capa gaseosa que cubre totalmente al planeta Tierra, que interactúa constantemente con el campo gravitatorio del mismo. Esta capa gaseosa a su vez posee una masa y ocupa un espacio definido, siendo incolora y no visible. La atmósfera tiene funciones que son vitales para el desarrollo de la vida como la conocemos, su extensión va desde la superficie del planeta hasta espacio a una altura de 1000 km aproximadamente (Henry & Heinke, 1999).

La materia que conforma a la atmósfera, está relacionada con la presión y la fuerza que esta ejerce sobre la superficie, esta relación es inversamente proporcional con respecto a la

altura. Al ser una mezcla gaseosa, la atmósfera también es influenciada por la temperatura, la misma que varía considerablemente entre las capas la componen (Vallero, 2008). El aire forma parte de estas capas, siendo una mezcla de al menos 15 gases a la misma presión y temperatura de la primera capa de la atmósfera, la tropósfera, en donde su composición determina el comportamiento y las propiedades de la misma en donde se desarrolla la vida (Henry & Heinke, 1999).

2.4.2 Capas de la atmósfera

Debido a que la atmósfera posee un amplia gama de elementos y sustancias, se la considera un sistema químico y físico complejo en donde se da lugar a muchos procesos complejos que no son fáciles de simplificar, sin embargo se conoce que la radiación solar funciona como un catalizador a estas reacciones, al igual que otras variables como son la altura y la temperatura. Por este motivo se ha sido posible separar capas con propiedades similares entre sí, para describir la composición de la atmósfera (Liou, 2002). Las capas que conforman la estructura de la atmósfera son troposfera, estratosfera, mesosfera e ionosfera (ver figura 11) cuya descripción se detalla a continuación.

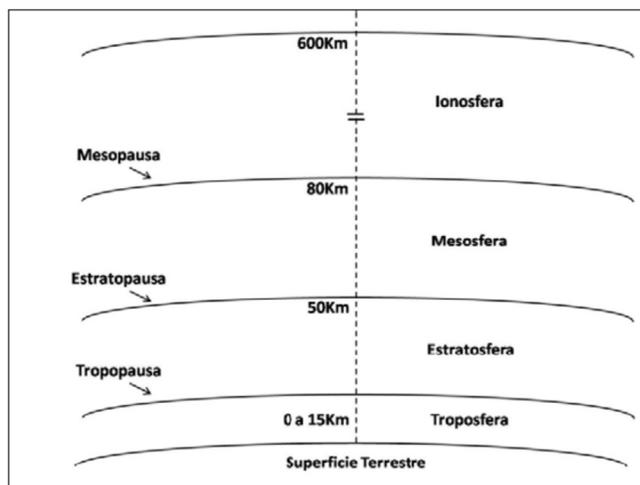


Figura 11. Estructura de la atmósfera

Fuente: (Cioce, 2009)

- **La troposfera**

Como se mencionó antes, es la capa más baja de la atmósfera, en ella la temperatura tiene una relación inversamente proporcional a la altura a razón de $6.5\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{km}$. Su espesor varía de acuerdo a la latitud y la época del año, extendiéndose hasta 9 km en el polo y el 15 km en el ecuador. En esta capa se da lugar a los fenómenos meteorológicos y climáticos los mismo (Buchdahl, 1999).

- **La estratosfera**

Es la siguiente capa, la cual se extiende desde los 15 hasta 50 km de altura. La composición principal de esta capa está dada por la absorción de energía solar por parte del ozono, elemento que predomina en esta región (Henry & Heinke, 1999).

- **La mesosfera:**

Esta capa se encuentra hasta los 80 km de altura, la temperatura disminuye hasta los -80 °C con la elevación alcanzadas, siendo la zona más fría de la atmósfera (Henry & Heinke, 1999).

- **La termosfera o ionosfera:**

Es la capa más alejada de la superficie, está por encima de los 80 km hasta los 600 km, en esta zona la temperatura aumenta directamente proporcional con respecto a la altura. Esto se debe a la disociación de moléculas de oxígeno y nitrógeno por las temperaturas que puede alcanzar la radiación solar (900 °C o más). La radiación genera iones y electrones los cuales son proporcionales a la misma, por tal motivo en esta capa ocurren diversos fenómenos electromagnéticos como las auroras polares u otros fenómenos que afectan la propagación de radioseñales (Buchdahl, 1999).

2.4.3 Variables atmosféricas

- **Temperatura**

Para poder definir la temperatura primero debemos referirnos a la termodinámica, la misma que postula que: el calor no es más que una forma de energía sustentable que puede transformarse en trabajo mecánico, por lo tanto la temperatura se puede considerar como la cantidad de calor de un cuerpo. Dicho calor también puede ser transmitido de cuerpos de mayor temperatura a los de menor (Andrades, 2012).

La temperatura en la troposfera se da por una relación inversamente proporcional con la altitud, siendo el valor medio de dicha variación de $-6,5^{\circ}\text{C}/\text{km}$, el mismo que no es constante ya que depende del contenido de humedad del aire, altura, época del año, etc (Andrades, 2012).

- **Presión atmosférica**

El aire que encontramos en la troposfera a pesar de que no lo notemos, ejerce una fuerza sobre los cuerpos debido a la fuerza de gravedad. Esta fuerza por unidad de superficie es llamada presión atmosférica y se la mide en pascales. La presión atmosférica depende de algunas variables, siendo la primordial la altitud la cual posee una relación inversamente proporcional, en donde mientras más arriba de la atmósfera no encontremos, menor será la cantidad de aire por encima de nosotros (Rodríguez, Agueda, & Portela, 2004).

- **Precipitaciones**

Cuando una masa de aire sube y esta se enfría, se lleva a cabo un proceso que se conoce como condensación o congelación que dará aparición a gotas de agua y pequeños cristales de hielo, los mismos que irán creciendo hasta que alcancen un tamaño suficiente para luego volver a bajar dando lugar a la precipitación (Andrades, 2012). Según el INAMHI (2010), esta variable es medida en milímetros, donde un milímetro corresponde a la altura obtenida de la caída de un litro de agua sobre un metro cuadrado de superficie terrestre.

2.4.4 Instrumentos de medición de las precipitaciones

Existen diferentes instrumentos utilizados en la medición de las precipitaciones, los más utilizados se describen a continuación.

- **Pluviómetro**

Instrumento destinado a la altura de agua, en donde la superficie de recepción es un anillo de 200 cm², bajo la suposición de que las precipitaciones están uniformemente distribuidas a una superficie horizontal que no es sujeta a evaporación (ver figura 12) (INAMHI, 2015).



Figura 12. Pluviómetro
Fuente: (INAMHI, 2015)

- **Pluviógrafo**

Instrumento similar al pluviómetro que incluye un dispositivo para registrar a través de forma continua y grafica la altura de la precipitación en un periodo de tiempo determinado (INAMHI, 2015). El INAMHI posee varios de estos dispositivos distribuidos a lo largo del territorio, uno de ellos se muestra en la Figura 13.



Figura 13. Pluviógrafo
Fuente: (INAMHI, 2015).

2.4.5 Intensidad de lluvia

Para el estudio del comportamiento de la lluvia en un intervalo de tiempo se debe tomar en cuenta la distribución de su intensidad, es decir, la cantidad de precipitación registrada en un determinado periodo (Monjo, 2010). La clasificación según su intensidad, dada por la Agencia Estatal de Meteorología se observa en la Tabla 5.

Tabla 5

Clasificación de la lluvia según su intensidad en una hora

Intensidad	Acumulación en una hora
Débil	entre 0.1 y 2 mm
Moderado	entre 2.1 y 15 mm
Fuerte	entre 15.1 y 30 mm
Muy Fuerte	entre 30.1 y 60 mm
Torrencial	más de 60 mm

Fuente: (Monjo, 2010)

2.4.6 Vapor de agua atmosférico

El vapor de agua no es más que agua en fase en estado gaseoso y su presencia en la atmósfera se debe a procesos químicos y físicos que ocurren en el planeta. El agua sufre de cambios en su estado físico gracias a las variaciones de temperatura gracias a la incidencia del sol sobre la superficie, por tal motivo se considera el vapor de agua en la atmósfera como un evento termodinámico (Oke, 1978).

El aire atmosférico está formado por la mezcla de vapor de agua, en donde los elementos que no se condensan en dicha mezcla, se denomina aire seco y mientras que el agua en estado gaseoso como humedad (Manahan, 2004). La humedad y la temperatura en el aire juegan un papel importante en el transporte de energía, clima y en procesos fotoquímicos (Jacob, 2001). Cuando el aire con humedad alcanza su punto de saturación, el agua condensada se precipita como líquido o sólido, esta idea está relacionada con el ciclo hidrológico, siendo el vapor de agua el principal factor para este proceso que llena de vida y regula la superficie de la tierra (Oke, 1978).

2.4.7 Técnicas de observación de vapor de agua atmosférico

Considerando la importancia del vapor de agua como elemento primordial de la atmósfera terrestre, existe la necesidad de estimar o cuantificar sus valores. A pesar de que la determinación de este gas en la troposfera ha sido estudiado por a través de los años por medio de diversos métodos, no se ha logrado obtener una caracterización completa y precisa de dicho fenómeno natural (Bates et al., 2008).

El vapor de agua al ser uno de los gases que más contribuye al efecto invernadero debido a su constante presencia en la atmósfera a través del conocido ciclo del agua (Hagemann, Bengtsson, & Genat, 2002), el cual incrementa la temperatura del planeta a la par con otros gases de características similares al CO₂ (Cioce, 2009), generando alternaciones de incidencia radiactiva tanto en la atmosfera como en la corteza terrestre (Hagemann, Bengtsson, & Genat, 2002). Por este motivo es de importancia una adecuada monitorización de la formación y acumulación del vapor de agua.

Para esto se tiene los dispositivos propios de observaciones meteorológicas clásicas, los mismos que están ubicados en la superficie terrestre y proporcionan valores indirectos del vapor de agua con una buena calidad temporal pero no espacial (Hafiz & Kamarudin, 2008). Por ello a continuación se describirá de manera concreta algunos mitos que ayudan tanto a la resolución espacial y temporal de valores de vapor de agua.

- **Radiosonda**

Es una técnica que utiliza globos de helio que contiene en su interior instrumentos (termómetro, higrómetro, barómetro) para la captura de información en la atmósfera a medida que el globo asciende. Dichos globos pueden capturar información hasta 30 km de altura, la misma que es recuperada por medio de sensores meteorológicos fijos en la superficie (Nieto, 2016). En la Figura 14 se puede observar el lanzamiento de un globo llevado a cabo por la Universidad de Colorado, el cual lleva varios dispositivos de sondeo de la atmósfera entre los que se incluye la radiosonda.



Figura 14. Radiosonda

Fuente: (Organización Meteorológica Mundial, 2010)

- **Radiómetro de vapor de agua**

Los radiómetros de vapor de agua son instrumentos que miden directamente la radiación producida por el vapor de agua. Las observaciones se realizan con una alta precisión y resolución temporal pero con una resolución espacial pobre, debido a la necesidad de disponer de una densa red de estaciones que generen una adecuada distribución en la superficie de interés, por este motivo es un método costoso (Hafiz & Kamarudin, 2008). En la Figura 15 se observa un ejemplo de este tipo de equipo.



Figura 15. Radiómetro de vapor de agua

Fuente: (Grupo de física de la atmósfera, 2018)

- **LIDAR**

Según Cioce en 2009, “Otro método para determinar el vapor de agua atmosférico se basa en el uso del LIDAR (Light Detection and Ranging), estimando la densidad óptica de este y otros constituyentes de la atmósfera. Los datos proporcionan una buena resolución temporal y son de alta calidad.”

2.4.1 Vapor de agua como elemento fundamental en la formación de lluvias

El vapor de agua está presente en el aire y en particular en la troposfera, lo que dependerá de su temperatura y presión. El aire de las zonas cálidas tropicales y ecuatoriales tiene mayor cantidad de vapor de agua que las zonas polares, en otras palabras, el aire seco puede tener más vapor de agua que el aire frío. Cuando el vapor de agua excede a sus valores máximos, se dice que la atmósfera está saturada y no admite más vapor en ella (Rodríguez, Agueda, & Portela, 2004).

Una nube se genera por la acumulación (condensación) de vapor de agua y de dicho aire seco, la condensación del vapor de agua se produce por lo general sobre partículas microscópicas de polvo, sales, etc., llamadas núcleos de condensación. Estas partículas son higroscópicas y ayudan a la condensación aun antes de haber llegado a la saturación (Andrades, 2012).

Cuando el aire con humedad alcanza su punto de saturación y ya no puede seguir acumulando masa, el agua en el vapor se condensa lo que produce su precipitación. Este proceso está directamente relacionado con el ciclo hidrológico, por lo tanto el vapor de agua es una variable central de este proceso (Gerding et al., 2004).

2.5 METEOROLOGÍA GPS

La meteorología GPS fue introducida por Bevis et al. (1992) quien expuso que las observaciones GPS son datos continuos y globales a partir de los cuales se puede obtener información atmosférica. En su estudio, enfatiza las potencialidades del vapor de agua atmosférico detectado con GPS en aplicaciones meteorológicas como el estudio del cambio climático, tormentas, química de la atmósfera y estudio del ciclo hidrológico a escala local, regional y global.

Así también, afirma que los medios convencionales como la radiosonda o los radiómetros de vapor de agua, hacen difícil la resolución de la distribución espacio temporal del vapor de agua y que gran parte de los errores en las predicciones de precipitación a corto plazo se deben a las condiciones iniciales de esta variable atmosférica en los modelos numéricos del tiempo. Por el contrario, la infraestructura GPS brinda la posibilidad de estudiar el vapor de agua con una cobertura sin precedentes (Bevis, et al., 1992).

En 1994 el mismo autor, presenta un método para transformar el retardo cenital húmedo (ZWD) observado por los receptores GPS a vapor de agua precipitable (PWV). Para ello, utilizó pronósticos numéricos del tiempo en el ajuste de la transformación, constantes de refractividad del aire húmedo y temperatura media ponderada de la atmósfera (Bevis, et al., 1994).

2.5.1 Vapor de Agua Precipitable (PWV)

Al hablar del contenido de vapor de agua atmosférico, se utiliza el término vapor de agua integrado (IWV) cuando está expresado en $\frac{Kg}{m^2}$ o vapor de agua precipitable (PWV) cuando se expresa en unidades milimétricas, cuya equivalencia es de $1 \frac{Kg}{m^2} IWV = 1 mm PWV$ (Offiler,

2010). El PWV se define como la altura de la columna de agua equivalente en unidades milimétricas (Viteri, 2013), el cual está relacionado con la componente húmeda del retardo troposférico. Bevis et al. (1994) establece que la detección remota de PWV está basada en “el desarrollo determinístico por mínimos cuadrados y técnica filtrado de Kalman” en donde el ZWD se recupera de las observaciones GPS registradas por el receptor.

Bevis et al. (1994) deduce que si el vapor de agua que está sobre el receptor está relacionado con la fase húmeda del retardo cenital (ZWD), entonces puede expresarse con la siguiente ecuación (ver ecuación 36).

$$PWV = \Pi \times ZWD \quad (36)$$

La constante adimensional de proporcionalidad Π dada por Askne & Nordius (1987) citado en Bevis et al. (1994) está definida por la ecuación (37).

$$\Pi = \frac{10^6}{\delta \times R_v \times \left[\left(\frac{k_3}{T_m} \right) + k'_2 \right]} \quad (37)$$

$$k'_2 = k_2 - w \times k_1 \quad (38)$$

Donde:

- δ Densidad del agua ($\delta = 1 \frac{gr}{cm^3}$)
- R_v Constante de los gases ($R_v = 4.61 \times 10^6 \frac{dinas \times cm}{K \times gr}$)
- T_m Temperatura media ($^{\circ}K$)
- w Relación entre el peso molecular del agua y el aire seco ($w = 0.622$)

Las variables utilizadas para el cálculo de Π , fueron motivo de extensas investigaciones. Las constantes de refractividad $k_1 \left(\frac{K}{hPa}\right)$, $k_2 \left(\frac{K}{hPa}\right)$, y $k_3 \left(\frac{K^2}{hPa}\right)$ fueron determinadas por medio de mediciones microondas directas obteniendo los valores mostrados en la Tabla 6.

Tabla 6
Constantes de Refractividad adoptadas en diferentes estudios

Referencia	k_1		k_2		k_3	
	Valor	Error	Valor	Error	Valor	Error
Smith & Weintraub (1993)	77.607	0.013	71.6	8.5	3.747	0.031
Thayer (1974)	77.604	0.014	64.79	0.08	3.776	0.004
Hasagawa & Stokesbury (1975)	77.600	0.032	69.40	0.15	3.701	0.003
Bevis et al. (1992)	77.60	0.05	70.4	2.2	3.739	0.012

Fuente: (Bevis, et al., 1992)

Para la estimación a priori de la temperatura media (T_m), Bevis et al. (1992) planteó una formulación matemática lineal, a partir del supuesto de la correlación existente entre la temperatura media (T_m) y la superficial (T_s). Basada en la lógica de la cercanía de los 2 a 3 km de la parte más baja de la atmósfera, donde se encuentra la mayor parte del vapor de agua atmosférico, a la superficie terrestre. Para ello analizó un total de dos años de datos correspondientes a 8718 estaciones de radiosonda, obteniendo la relación mostrada a continuación (ver ecuación 39).

$$T_m = 70.2 + 0.72 T_s \quad (39)$$

La aplicación de la ecuación (39), permite la estimación de la T_m en grados Kelvin, con un error relativo menor al 2% y la obtención del valor de Π utilizando la temperatura observada en la superficie (Bevis, et al., 1994).

2.5.2 Retardo Cenital Total (ZTD)

En el apartado referente a la refracción troposférica, se realizó un amplio tratamiento de la temática, donde se hizo referencia al efecto completo de la propagación de la señal troposférica (S_{Trop}) la cual puede ser expresada en términos de ZTD con la ecuación (40) mostrada a continuación.

(40)

$$ZTD = ZHD + ZWD$$

Donde:

- ZTD Retardo Cenital Total
- ZHD Retardo Cenital Hidrostático
- ZWD Retardo Cenital Húmedo

2.5.3 Retardo Cenital Hidrostático (ZHD)

Esta componente depende de la densidad del aire, para su cálculo se utilizan principalmente modelos como el de Saastamoinen o el de Hopfield, los cuales incluyen variables in situ de presión y temperatura. Físicamente el ZHD está definido por la ecuación (41).

$$ZHD = \int_0^{P_s} \frac{R_d k_1}{g} dp \quad (41)$$

Donde:

- P_s Presión atmosférica en la superficie
- R_d Constante de gas específica para aire seco
- g Aceleración de la gravedad
- k_1 Constante de refractividad

La componente hidrostática definida por el modelo de Saastamoinen se calcula usando la expresión (42), la cual se encuentra en función de la presión superficial (P_s), latitud geodésica (φ) y altura elipsoidal de la estación (h_o).

$$ZHD = \frac{(2.27683157 \times 10^{-3} \pm 0.0024) \times P_s}{1 - 0.0026 \times \cos(2\varphi) - 0.28 \times 10^{-6} \times h_o} \quad (42)$$

2.5.4 Retardo Cenital Húmedo (ZWD)

El Retardo Cenital Húmedo contribuye con un 10% del retardo troposférico total, según Cioce et al. (2011) el vapor de agua “no se encuentra bien mezclado y su distribución espacial y temporal no es homogénea.”, es decir, presenta una gran variabilidad, esto ha provocado que el modelado del ZWD como su principal componente haya presentado dificultades. Uno de los modelos propuestos es el realizado por Bevis et al. (1992) (ver ecuación 43). Donde las constantes de refractividad k'_2 y k_3 son las mismas expresadas en la Tabla 6, la presión parcial

del vapor de agua (e) en hPa y temperatura atmosférica (T_{atm}) en °K son usualmente obtenidas del radio sondeo (Bevis, et al., 1992).

$$ZWD = -10^{-6} \int \left[k_2' \frac{e}{T_{atm}} + k_3 \frac{e}{T_{atm}^2} \right] \quad (43)$$

2.6 ANÁLISIS ESTADÍSTICO

2.6.1 Distribución normal de probabilidades

La distribución de probabilidad más importante en la estadística es la normal, también conocida como Gaussiana. Su formulación matemática fue desarrollada por Abraham DeMoivre en 1733, proporcionando la base fundamental a partir de la que Karl Friedrich Gauss (1777-1855) plantearía el estudio de errores en mediciones repetidas para la derivación la ecuación de la curva normal, la cual depende de la media (μ) y la desviación estándar (σ) como se plantea en la ecuación (44) (Walpole, Myers, & Myers , 2012).

$$X \rightarrow N[\mu, \sigma] \quad (44)$$

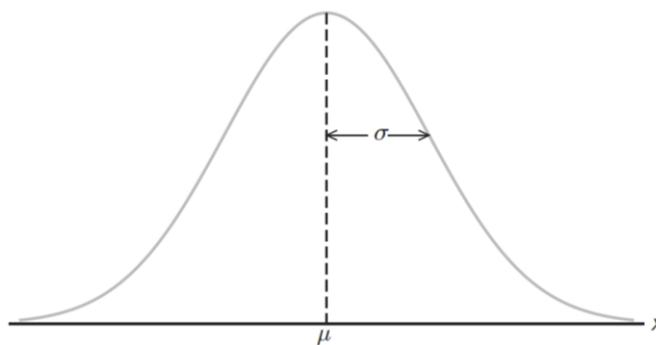


Figura 16. Curva Normal
Fuente: (Walpole, Myers, & Myers , 2012)

En la Figura 16, se puede observar la gráfica de la curva normal, donde la variable aleatoria x se presenta en forma acampanada y su área bajo la curva es igual a 1. Entre más variación exista entre los datos, más baja y ancha será la curva correspondiente (Walpole, Myers, & Myers, 2012).

La distribución normal además puede estar representada en términos de media (μ) y la varianza (σ^2), como se observa en la ecuación (45) donde se ha representado la función de la densidad $f(x)$.

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} \quad (45)$$

2.6.2 Prueba de normalidad de Kolmogorov – Smirnov

La prueba estadística de Kolmogorov – Smirnov o K-S test, fue introducida en 1933, como un medio para comprobar si un conjunto de observaciones proviene de una distribución normal (Lilliefors, 1967). La expresión que la define se muestra en la ecuación (46).

$$D = \max|F^*(x) - S_N(x)| \quad (46)$$

Donde:

- D Estadístico de prueba
- $S_N(x)$ Distribución empírica de la muestra evaluada en x
- $F^*(x)$ Distribución normal evaluada en x

A partir del planteamiento de la hipótesis nula H_0 : Los datos siguen una distribución normal, y la hipótesis alternativa H_a : Los datos no siguen una distribución normal. Se evalúan los valores del estadístico de prueba (D) y los valores críticos dados en función del nivel de significancia y el tamaño de la muestra ($CV_{(\alpha,N)}$).

Si el valor $D > CV_{(\alpha,N)}$ se rechaza la hipótesis de que las observaciones provienen de una población normal. Por el contrario, si el valor de $D < CV_{(\alpha,N)}$ se acepta el supuesto de la distribución normal $F^*(x)$ es la que generó los datos (Wang, 2009) (Lilliefors, 1967). En la Tabla 7, se muestran los valores críticos acorde a los niveles de significancia dada una muestra N de observaciones

Tabla 7

Valores Críticos en función del tamaño de la muestra y nivel de significancia

N	Nivel de significancia (α)					
	0.4	0.2	0.1	0.05	0.04	0.01
5	0.369	0.447	0.509	0.562	0.58	0.667
10	0.268	0.322	0.368	0.409	0.422	0.487
20	0.192	0.232	0.264	0.294	0.304	0.352
30	0.158	0.19	0.217	0.242	0.25	0.29
50	0.123	0.149	0.169	0.169	0.194	0.225
>50	$\frac{0.87}{\sqrt{N}}$	$\frac{1.07}{\sqrt{N}}$	$\frac{1.22}{N}$	$\frac{1.36}{\sqrt{N}}$	$\frac{1.37}{\sqrt{N}}$	$\frac{1.63}{\sqrt{N}}$

Fuente: (Wang, 2009)

2.6.3 Análisis de correlación

El análisis de correlación es un grupo de técnicas que mide el grado de relación o asociación entre dos variables cuantitativas (Lind, Marchal, & Wathen, 2008). Su indicador estadístico está definido por el coeficiente de correlación (R) el cual varía entre -1 y $+1$, indicando una correlación perfecta para ambos casos. El valor de $R = +1$ indica una correlación perfecta y directa, por el contrario un $R = -1$ una correlación perfecta e inversa. En el caso de que $R = 0$ existe ausencia de correlación entre las variables, lo que significa que son independientes la una de la otra (Pedroza & Dicovsky, 2006). En la Figura 17, se muestra el nivel de fuerza y dirección de la correlación dada por Lind, Marchal & Wathen (2008).



Figura 17. Dirección y nivel de fuerza del coeficiente de correlación

Fuente: (Lind, Marchal, & Wathen, 2008)

Como se observa en la Figura 17, un coeficiente cercano a cero, indica baja asociación entre las variables de estudio y un valor cercano a ± 1 indica una fuerte correlación entre las variables.

2.6.4 Coeficiente de correlación de Pearson

El coeficiente de correlación de Pearson mide el grado de asociación lineal entre dos variables que poseen una distribución normal bivariada. Legendre & Legendre (1983) citado por Rodríguez (2000) afirma que el coeficiente de Pearson “es una covarianza, estandarizada por la desviación estándar de las dos variables comparadas, lo cual produce valores entre -1 y 1”. La expresión que la define se muestra en la ecuación (47).

$$r_p = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (47)$$

Donde:

- n Número de variables
- x_i Medida individual de una variable en la primera muestra
- y_i Medida individual de una variable en la segunda muestra
- \bar{x} Promedio de x_i
- \bar{y} Promedio de y_i

2.6.5 Coeficiente de correlación de Spearman

Se puede aplicar métodos no paramétricos para determinar la correlación entre variables, uno de ellos es el coeficiente de correlación por rangos de Spearman. (Spiegel & Stephens, 2000). El cual puede ser utilizado para variables cualitativas y cuantitativas, tomando en cuenta que el grado de asociación medido se da en base a la concordancia o discordancia de las clasificaciones por rangos y no a las variables en sí (Pérez, 2001).

El cálculo del coeficiente de correlación de Spearman se ha planteado como un método no paramétrico, puesto que la distribución de sus variables no sigue una distribución conocida. Consolidándose como un método alternativo al uso del coeficiente de Pearson al no traer como requisito la distribución normal de sus variables. La expresión del coeficiente de correlación de Spearman viene dada por la ecuación (48).

$$r_s = 1 - \frac{6 \sum d^2}{N(N^2 - 1)} \quad (48)$$

Donde:

- r_s Coeficiente de correlación de Spearman.
- d Diferencias entre los rangos de los valores correspondientes de las variables.
- N Número de pares de valores en los datos.

2.6.6 Prueba de hipótesis

Las investigaciones científicas suelen basarse en inferencias sobre la realidad, también conocidas como hipótesis. Según Walpole et al. (2012) la hipótesis estadística “es una aseveración o conjetura respecto a una o más poblaciones”. La comprobación de la veracidad o falsedad de una hipótesis es compleja, dado que se debería analizar a toda la población involucrada. En la parte práctica, se toma una muestra aleatoria de esta población de manera que se pueda proporcionar evidencia que permita respaldar o no la hipótesis planteada.

La prueba de hipótesis se establece utilizando los términos hipótesis nula (H_o) y alternativa (H_a). La hipótesis nula es lo que se quiere probar, es una suposición hecha sobre conocimiento previo el cual se asume como verdadero. En el caso de que se rechace la hipótesis

nula se acepta la hipótesis alternativa la cual representa el opuesto a la supocisión inicial (Walpole, Myers, & Myers , 2012).

2.6.6.1 Nivel de Significancia

El nivel de significancia (α) representa el máximo riesgo o probabilidad de incurrir en un error de tipo I, es decir el riesgo de que se rechace la hipótesis nula cuando es verdadera (Walpole, Myers, & Myers , 2012). Comunmente, se usa los niveles de significancia 0.1 , 0.05 y 0.01 los cuales son utilizados en la selección de los valores críticos (VC) que limitan de la región de aceptación y rechazo de la hipótesis. Para una prueba de 2 colas el nivel de significancia es la suma de las áreas sombreada en la distribución (ver figura 18) (Walpole, Myers, & Myers , 2012).

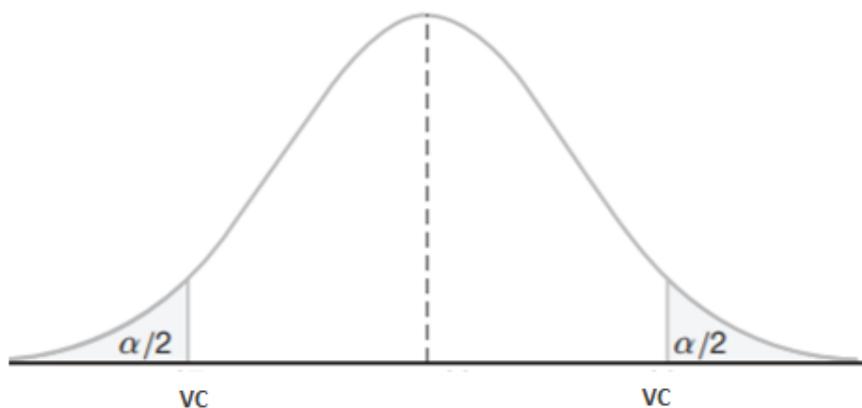


Figura 18. Nivel de Significancia para pruebas de dos colas
Fuente: Modificado de (Walpole, Myers, & Myers , 2012).

2.6.6.2 Estadístico de Prueba para diferencia entre dos medias

Para obtener el estadístico de prueba para diferencia entre dos medias hay que tomar en cuenta que si las poblaciones X_1 y X_2 son normales entonces las medias muestrales \bar{x}_1 y \bar{x}_2 también tienen una distribución normal (Emardson & Derks, 2000). Además, que en el caso de no conocer la desviación estándar de la población (σ) puede ser reemplazada por la muestral (s) siempre y cuando el tamaño de la muestra sea mayor a 30 (Gómez, 2009).

La ecuación dada en Lind, Marchal & Wathen (2008) para la obtención de estadístico Z para dos muestras grandes (mayores a 30) e independientes se observa en la ecuación (49). Suponiendo que se tiene dos poblaciones independientes X_1 y X_2 con medias μ_1 y μ_2 , cuyas desviaciones estándar σ_1 y σ_2 son desconocidas. Y que de la primera población, se extrae una muestra de tamaño n_1 con una media muestral \bar{x}_1 y desviación estándar s_1 ; y de la segunda se extrae una muestra de tamaño n_2 con una media muestral \bar{x}_2 y desviación estándar s_2 .

$$Z = \frac{(\bar{x}_1 - \bar{x}_2)}{\sqrt{\frac{s_1^2}{n_1} + \frac{s_2^2}{n_2}}} \quad (49)$$

Los valores críticos de la distribución normal Z para pruebas de una y dos colas se muestra en la Tabla 8.

Tabla 8

Valores Críticos de la distribución normal Z para pruebas de una y dos colas

Nivel de significancia α	0.1	0.05	0.01	0.005	0.002
Valores críticos de Z para pruebas de una cola	-1.28 o 1.28	-1.645 o 1.645	-2,33 o 2.33	-2.58 o 2.58	-2.88 o 2.88
Vaores críticos de Z para pruebas de dos colas	-1.645 y 1.645	-1.96 y 1.96	-2.58 y 2.58	-2.81 y 2.81	-3.08 y 3.08

Fuente: (Spiegel & Stephens, 2000)

CAPÍTULO III

METODOLOGÍA

En este capítulo, se presenta la metodología aplicada para la estimación de Vapor de Agua Precipitable (PWV) de la estación de monitoreo continuo EPEC. Un esquema total de los diferentes procesos aplicados con sus respectivos archivos de salida se observa en la Figura 19.

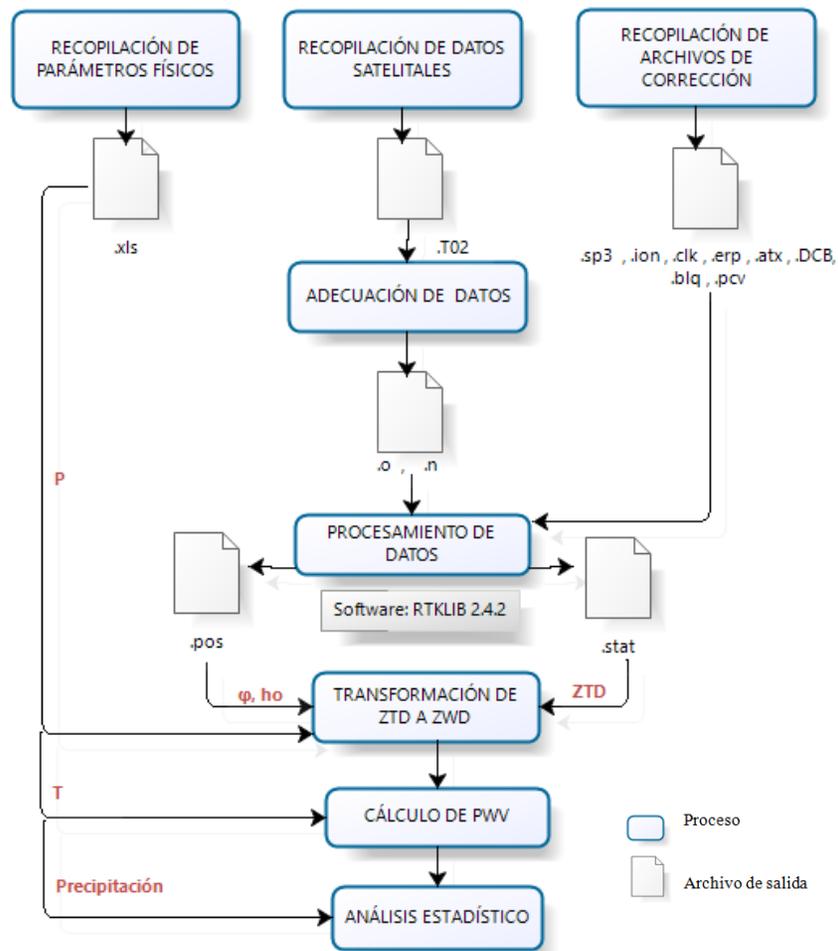


Figura 19. Diagrama metodológico

Donde la presión (P) está dada en hPa, la temperatura (T) en $^{\circ}K$, el retado cenital total (ZTD) en milímetros, la altura (h_o) en metros y la latitud (φ) del punto en radianes.

3.1 RECOPIACIÓN DE DATOS

3.1.1 Recopilación de datos Satelitales

Se recopilaron datos satelitales de estación de monitoreo continuo EPEC (ver figura 20), para el período comprendido entre el 13 de Noviembre del 2017 y el 19 de Febrero del 2018 con un total de 99 archivos generados por el receptor Trimble NETR9 en formato comprimido .T02.



Figura 20. Estación de Monitoreo Continuo ESPE- EPEC
Fuente: (Instituto Geográfico Militar, 2016)

3.1.2 Recopilación de Parámetros Físicos

La información correspondiente a temperatura y precipitación, fue recopilada de la estación meteorológica del Laboratorio de Medio Ambiente de la Universidad de las Fuerzas Armadas- ESPE y los datos de presión fueron dados por el Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología (INAMHI), en intervalos de una hora para ambos casos.

3.1.3 Recopilación de archivos de corrección

Se recopilaron correcciones generadas por los centros de análisis de la International Geosynthetic Society (IGS), obtenidas mediante el portal web de la Crustal Dynamics Data Information System (CDDIS) como son: archivos de órbita, correcciones de reloj, parámetros ionosféricos y parámetros de rotación de la tierra. Además, se incluyeron correcciones de cargas oceánicas generadas por la Onsala Space Observatory (OSO), correcciones del sesgo diferencial del código, correcciones de antenas satelitales y del receptor (ver tabla 9).

Tabla 9

Archivos de corrección

Archivos de corrección	Formato	Fuente	Página Web
Archivos de órbita precisas	.sp3	Crustal	https://cddis.nasa.gov/Data_and_Developed_Products/GNSS/GNSS_data_and_product_archive.html
Parámetros de rotación de la tierra	.erp	Dynamics Data	
Correcciones ionosféricas	.ion	Information	
Correcciones de reloj	.clk	(CDDIS)	
Archivos de corrección de cargas oceánicas	.blq	Onsala Space Observatory (OSO).	http://holt.oso.chalmers.se/loading/
Corrección del centro de fase de la antena del receptor	.pcv		
Correcciones de antenas satelitales	.atx		Cargadas en el paquete del programa
Correcciones del sesgo diferencial del código	.DCB		

3.2 ADECUACIÓN DE DATOS

Los datos de la estación EPEC fueron descargados en formato .T02 de Trimble, debido a la incompatibilidad del software RTKLIB este tipo de archivo se los transformó a RINEX, obteniendo archivos de observación (.o) y navegación (.n). Para lo que se utilizó las herramientas *runpkr00* y el *TEQc*, descargadas de la página web de la UNAVCO <http://www.unavco.org/software/data-processing/data-processing.html> y ejecutadas desde la consola de Windows. La línea de comando utilizada para la transformación a formato .tgd es:

```
runpkr00 -d -g EPEC0010.T02
```

A partir del archivo .tgd generado se obtienen los archivos de observación y navegación utilizando el comando:

```
Teqc -week 1982 -tr d +obs EPEC0010.18o +nav EPEC0010.18n EPEC0010.tgd
```

La parte del código `-tr d` cambia acorde al tipo de receptor utilizado, que para la estación EPEC corresponde al equipo TRIMBLE NETR9. El código `-week 1982` indica la semana GPS en que las observaciones fueron tomadas, en cuyo caso corresponde al 1 de Enero del 2018.

3.3 PROCESAMIENTO DE DATOS – POSICIONAMIENTO PUNTUAL PRECISO (PPP)

El procesamiento de los datos se realizó utilizando la aplicación RTKPOST perteneciente al software RTKLIB 2.4.2. Se definió como técnica de post-procesamiento al Posicionamiento Puntual Preciso (PPP), de manera que se utilizó como insumos únicamente los RINEX de la estación EPEC con observaciones a intervalos de grabación de 30 segundos y los archivos de corrección recopilados.

A continuación se hará referencia al procesamiento de una hora de observaciones para la generación de una coordenada geodésica (φ, λ, h_o) y la recuperación de las estimaciones de los ZTD generados por cada observación (en total 120 estimaciones a intervalos de 30 segundos).

En primer lugar, se definió el tiempo de inicio y fin del procesamiento, indicando la fecha (Año/ Mes/ Día) y hora (Hora / Minutos /Segundos) en tiempo GPS. Como se observa en el ejemplo mostrado en la Figura 21, se procesó el lapso comprendido entre las 00h00 y 01h00 del 13 de Noviembre del 2017.

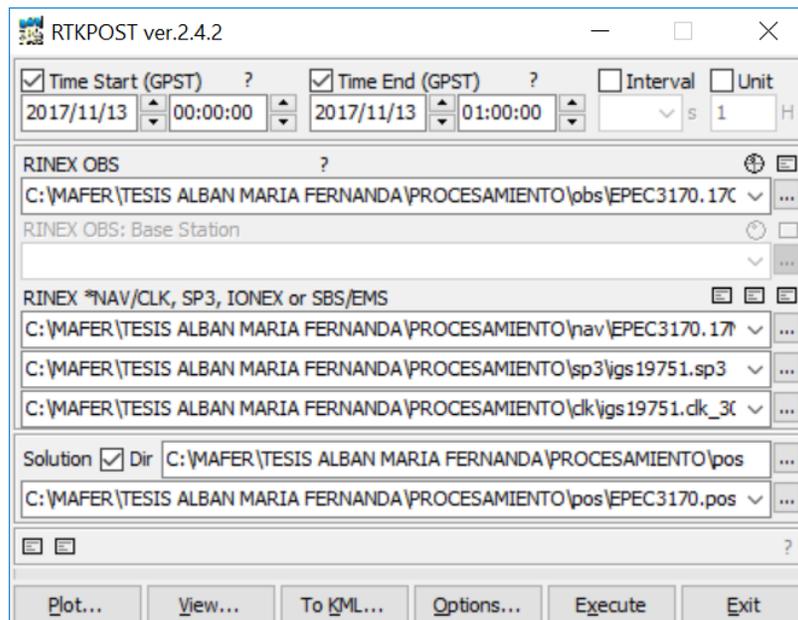


Figura 21. RTKPOST

Las configuraciones (en Options) utilizadas fueron las definidas por el trabajo realizado por Albán, Romero & Tierra (2016), las cuales se presentan a continuación (ver figura 22).

- Modo de posicionamiento: “PPP Estático ”
- Modelo ionosférico: “Ion Free LC”
- Corrección de mareas terrestres: “Solid/OTL”
- Modelo Troposférico: “Estimate ZTD”
- Máscara de elevación: 10°
- Resolución de ambigüedades: Modo “Fix and Hold”
- Efemérides: “Precisas”

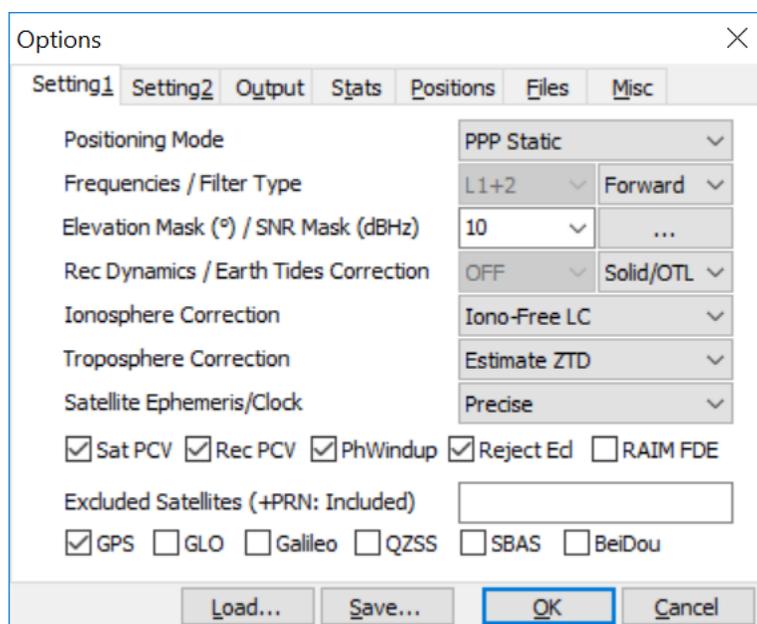


Figura 22. Ventana de configuración 1- RTKPOST

La ventana de archivos de salida se configuró de manera que se genere coordenadas geodésicas como producto. Además, se incluyó la salida del archivo “Output Solution Status” (.stat) el cual contiene los estados de la solución y residuales estimados (Takasu, 2013) (ver figura 23).

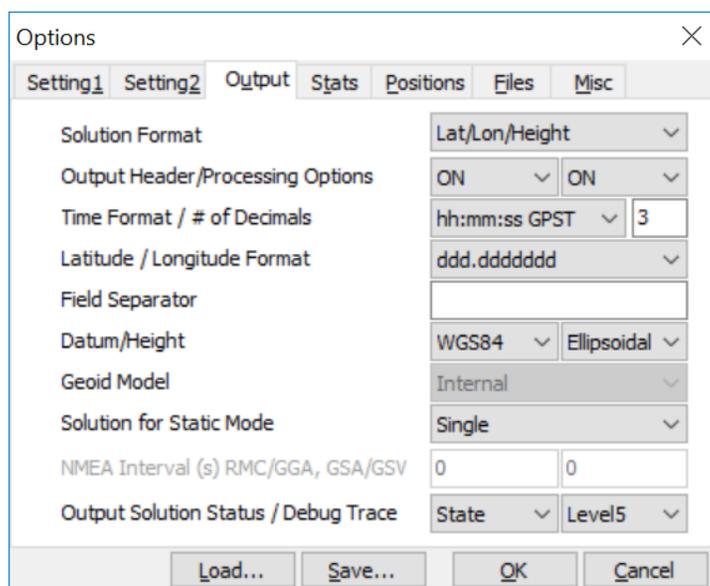


Figura 23. Ventana de Salida

Cabe destacar, que este archivo .stat se genera en el directorio utilizado por la aplicación y que el tipo de solución depende del nivel seleccionado. En la Tabla 10 se muestra los niveles del estado de la solución con su respectiva descripción. Ya que el presente estudio requiere de la estimación de parámetros troposféricos, se seleccionó el Nivel 5 (ver figura 23), el cual permite la obtención de la variable ZTD.

Tabla 10*Niveles del estado de salida de la solución*

Nivel	Archivo	Descripción
1	Posicionamiento	Posición del receptor estimada en el filtro
2	Velocidad/aceleración	Velocidad y aceleración del receptor estimada en el filtro
3	Clock-bias	Parámetros estimados del receptor clock bias
4	Parámetros ionosféricos	Parámetros ionosféricos estimados (retraso ionosférico diferencial a la vertical L1)
5	Parámetros troposféricos	Parámetros troposféricos estimados (retraso cenital troposférico)
6	Receptor H/W	Diferencia bias estimada del receptor GLONASS
7	Residuales	Residuales de pseudorange

Fuente: Modificado de Takasu (2013)

En la Figura 24 se muestra la configuración del tipo de antena, información que se obtuvo del “Formulario Informativo de la Estación de Monitoreo Continuo ESPE - EPEC de la estación EPEC” dado por el Instituto Geográfico Militar (IGM), donde se especifica la siguiente información de la antena:

- Modelo de Antena: GNSS Choke w/SCIS Dome
- Nombre Rinex: TRM59800.00 SCIS
- Altura de la Antena: 0.000 m

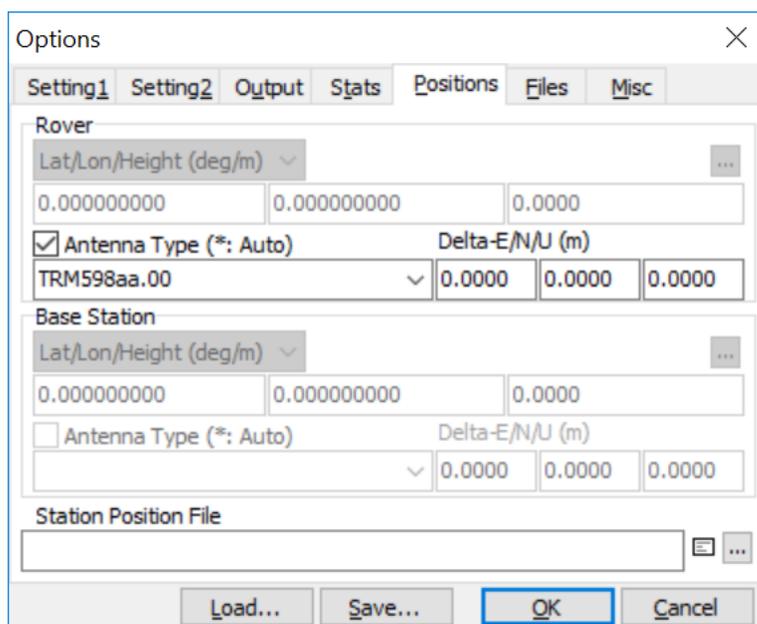


Figura 24. Ventana de Posiciones

Al seleccionar el tipo de antena que para el caso mostrado en la Figura 24 corresponde a la antena TRM59800.00 SCIS (denominada como TRM598aa.00 a modo de identificación personal), se cargan las correcciones del centro de fase. En el caso de que la antena del receptor utilizado no se encuentre en las opciones “Antenna Type”, se descarga su calibración ingresando a la página de la NOAA <https://www.ngs.noaa.gov/ANTCAL/#>, para finalmente aumentarla al archivo de corrección (.pcv) localizado en la carpeta “data”, perteneciente al mismo software.

Las correcciones incluidas en el procesamiento PPP se detallaron en la Tabla 10, su ingreso en el programa se observan en las Figuras 22 y 25.

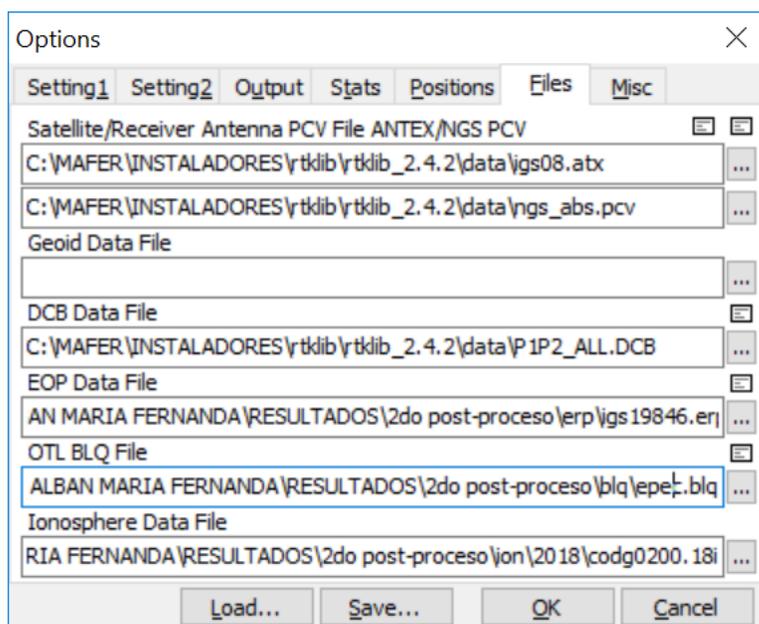


Figura 25. Ventana de Archivos

Ya configurado el programa e ingresado las correcciones correspondientes, se inicia el procesamiento de los datos. Como resultado, se obtienen dos archivos de salida: el primero en formato EPECXXXX.pos (ver figura 26) correspondiente a las coordenadas geodésicas del punto: latitud (grados), longitud (grados) y altura elipsoidal (metros); y el segundo en formato EPECXXXX.stat (ver figura 27) correspondiente al estado de la solución y los residuales estimados.

```

C:\MAFER\TESIS ALBAN MARIA FERNANDA\PROCESAMIENTO\3er post-proceso\pos\EPEC3170.pos
Find Read... Option... Close
% program : RTKPOST ver.2.4.2
% inp file : C:\MAFER\TESIS ALBAN MARIA FERNANDA\PROCESAMIENTO\ler post-proceso\obs\EPEC3170.170
% inp file : C:\MAFER\TESIS ALBAN MARIA FERNANDA\PROCESAMIENTO\ler post-proceso\nav\EPEC3170.17N
% inp file : C:\MAFER\TESIS ALBAN MARIA FERNANDA\PROCESAMIENTO\ler post-proceso\sp3\igs19751.sp3
% inp file : C:\MAFER\TESIS ALBAN MARIA FERNANDA\PROCESAMIENTO\ler post-proceso\clk\igs19751.clk_30s
% obs start : 2017/11/13 00:00:00.0 GPST (week1975 86400.0s)
% obs end : 2017/11/13 01:00:00.0 GPST (week1975 90000.0s)
% pos mode : ppp-static
% solution : forward
% elev mask : 10.0 deg
% dynamics : off
% tidecorr : on
% tropo opt : est ztd
% ephemeris : precise
% antennal : TRM598aa.00 SCIS Dorne Margolin with chokerings, Model 59 ( 0.0000 0.0000 0.0000)
%
% (lat/lon/height=WGS84/ellipsoidal,Q=1:fix,2:float,3:sbas,4:dgps,5:single,6:ppp,ns=# of satellites)
% GPST latitude(deg) longitude(deg) height(m) Q ns sdn(m) sde(m) sdu(m) sdne(m) sdeu(m) sdu(m) age(s) ratio
2017/11/13 00:00:00.000 -0.314889719 -78.446322830 2522.9605 6 10 0.0099 0.0253 0.0263 0.0074 -0.0123 -0.0086 0.00 0.0

```

Figura 26. Archivo de salida en formato EPECXXXX.pos

Cada procesamiento genera una coordenada geodésica para el intervalo de tiempo definido, en el caso de la Figura 26 se muestra una solución para el intervalo de tiempo comprendido entre las 00:00:00 a las 01:00:00 del 13/11/2017

```

C:\MAFER\TESIS ALBAN MARIA FERNANDA\PROCESAMIENTO\3er post-proceso\po...
Find Read... Option... Close
$POS,1975,86400.000,6,1277938.3460,-6251276.5944,-34832.5852,0.0000,0.0000,0.0000
$CLK,1975,86400.000,6,1,-28.389,-10.615,0.000,0.000
$TROP,1975,86400.000,6,1,1.8155,0.0000
$POS,1975,86430.000,6,1277937.1279,-6251277.3932,-34832.1237,0.0000,0.0000,0.0000
$CLK,1975,86430.000,6,1,-27.157,-9.552,0.000,0.000
$TROP,1975,86430.000,6,1,1.8141,0.0000
$POS,1975,86460.000,6,1277937.0264,-6251277.1119,-34832.3693,0.0000,0.0000,0.0000
$CLK,1975,86460.000,6,1,-27.745,-10.965,0.000,0.000
$TROP,1975,86460.000,6,1,1.8112,0.0000
$POS,1975,86490.000,6,1277937.0327,-6251277.3118,-34832.1919,0.0000,0.0000,0.0000
$CLK,1975,86490.000,6,1,-26.968,-9.616,0.000,0.000
$TROP,1975,86490.000,6,1,1.8123,0.0000

```

Figura 27. Archivo de salida en formato EPECXXXX.stat

El archivo EPECXXXX.stat mostrado en la Figura 27 contiene estado de la solución de los parámetros troposféricos, expresados en el siguiente formato:

\$TROP, week, tow, stat, rcv, ztd, ztdf

- week semana GPS
- tow tiempo en la semana (segundos)
- stat solución de estado
- rcv receptor (1: móvil, 2: estación base)
- ztd retardo cenital total (m) -flotante
- ztdf retardo cenital total (m)- ajustado

De dichos parámetros, el valor utilizado etapa del cálculo del vapor de agua precipitable es el retardo cenital total (ZTD), variable que representa la refracción de la trayectoria de la señal GPS por la presencia de la capa más baja de la atmósfera, conocida como la troposfera.

Cada procesamiento genera un total de 120 estimaciones de ZTD en intervalos de 30 segundos, de lo que se obtuvo un promedio a fin de determinar el ZTD total estimado para el intervalo de tiempo procesado (una hora para cada caso).

Con la metodología expuesta hasta este punto, se obtiene una coordenada geodésica (φ, λ, h_o) y un ZTD para el intervalo de una hora. Para obtener la serie de tiempo total, se repite la secuencia de pasos expresados en la sección 3.3 hasta completar las 24 horas por día de estudio. Una vez obtenida la serie de tiempo total a intervalos de una hora, se calculó el PWV

promedio de cada día de estudio con lo que se formaron series de PWV para meses de Noviembre, Diciembre, Enero y Febrero.

3.4 CONVERSIÓN DE ZTD A ZWD

Para la conversión del Retardo Cenital Total (ZTD) a Retardo Cenital Húmedo (ZWD), se calculó el Retardo Cenital Hidrostático (ZHD) definido por el modelo de Saastamoinen. La formulación matemática utilizada es la presentada en el Capítulo 2 (sección 2.4.3) con la ecuación (42). Tomar en cuenta que las variables latitud (φ) en radianes y altura elipsoidal de la estación (h_o) en metros fueron obtenidas del proceso anterior, y que la presión superficial (P_s) en hPa, corresponde a información tomada de la estación meteorológica.

Con el valor de ZHD obtenido y el ZTD recuperado del procesamiento PPP, se calcula el ZWD despejando la ecuación (40) presentada en el Capítulo 2 (sección 2.4.2), como se muestra a continuación:

$$ZWD = ZTD - ZHD \quad (50)$$

3.5 CÁLCULO DEL VAPOR DE AGUA PRECIPITABLE (PWV)

Finalmente, utilizando el Retardo Cenital Húmedo (ZWD) se estima la cantidad de vapor de agua precipitable con la expresión: $PWV = \Pi \times ZWD$ definida por Bevis et al. (1994). Para la obtención de la constante adimensional de proporcionalidad (Π) se utiliza la ecuación (37) presentada en el Capítulo 2 (sección 2.4.1), considerando que los parámetros k_1 , k_2 , k_3 , w , δ y R_v utilizados, son los presentados en la Tabla 11.

Tabla 11
Parámetros considerados

Parámetro	Valor	Unidad
k_1	77.6	K/hPa
k_2	70.4	K/hPa
k_3	3.739×10^5	K^2/hPa
w	0.622	-
δ	1	gr/cm^3
R_p	4.61×10^6	$dinas \times cm/K \times gr$

Fuente: Modificado de Romero et al. (2009)

Además, para la determinación de la Temperatura media (T_m) se aplicó la formulación matemática lineal: $T_m = 70.2 + 0.72 T_s$ dada por Bevis et al. (1992) presentada en el Capítulo 2, sección 2.4.1. La cual utiliza la medida de la temperatura superficial (T_s) medida por los sensores meteorológicos en tierra.

3.6 ANÁLISIS ESTADÍSTICO

Una vez obtenidas las soluciones, se realizó el análisis estadístico de las variables PWV y precipitación, utilizando el software libre R 3.4.4 disponible en la web para su descarga en el enlace: <https://cran.r-project.org/bin/windows/base/>, y la herramienta de entorno gráfico, R Studio 1.1.477, descargado de la página: <https://www.rstudio.com/products/rstudio/download/#download>.

Se aplicó la prueba de normalidad de Kolmogorov – Smirnov a un nivel de significancia de 0.05, para 2357 datos correspondientes a los estimados de PWV obtenidos cada hora y a la precipitación registrada por el pluviómetro. Y, para 99 datos de los valores promedios diarios de PWV y precipitación acumulada diaria. Siendo en todos los casos el tamaño de la muestra $L > 50$,

se calculó el valor crítico utilizando la fórmula: $CV = \frac{1.36}{\sqrt{N}}$, expresada en la Tabla 7. Se planteó la hipótesis nula H_0 : los datos siguen una distribución normal; y alternativa H_a : Los datos no siguen una distribución normal. Una vez realizada la prueba de normalidad, se determinó el tipo de coeficiente de correlación a utilizar, a fin de determinar la relación entre las variables de estudio.

3.7 VALIDACIÓN

La validación de técnica de Posicionamiento Puntual Preciso para la recuperación de PWV se realizó por medio de la comparación de los últimos datos procesados por el Instituto Geográfico Militar – IGM en la campaña del 2017, con soluciones obtenidas de la aplicación de la metodología PPP tratada en este estudio. Se realizó una prueba estadística Z para diferencia de medias a un nivel de significancia de 0.05, planteando la hipótesis nula $H_0: \mu_{PPP} = \mu_{IGM}$ y la alternativa $H_a: \mu_{PPP} \neq \mu_{IGM}$ a fin de determinar si existe igualdad estadística entre las medias poblacionales de PWV obtenidas de la aplicación de la técnica PPP y las obtenidas de la aplicación del método relativo. Además, se calcularon las diferencias entre ambas soluciones y los estadísticos correspondientes a diferencias máximas, mínimas, promedio y desviación estándar.

CAPÍTULO IV

ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

Una vez realizado el procesamiento de datos aplicando la técnica de Posicionamiento Puntual Preciso y obtenidas las soluciones de PWV con la metodología indicada, se obtuvo un total 2376 estimaciones correspondientes a 99 días de procesamiento en intervalos de una hora.

Este capítulo, presenta los resultados del contenido de Vapor de Agua Precipitable en series de tiempo diarias para días lluviosos y sin precipitaciones, en comparación con datos de precipitación; y el cálculo de promedios diarios de PWV, analizados de manera mensual en comparación con la precipitación acumulada diaria. Para ambos casos se calculó un estadístico de correlación a fin de establecer si el contenido de PWV es un indicador de ocurrencia de precipitaciones. Finalmente, se muestran los resultados de la validación de la metodología PPP expuesta.

4.1 CONTENIDO DE PWV EN DÍAS LLUVIOSOS

A partir de la clasificación de la intensidad de lluvia dada por la Agencia Estatal de Meteorología (2009), citada anteriormente, se encontraron días con débil, modera y fuerte intensidad de precipitación. Cabe destacar, que dicha intensidad se refiere a la cantidad de precipitación registrada en una hora y que los datos obtenidos no corresponden a una intensidad instantánea, sino a precipitación acumulada en el intervalo de tiempo definido (Monjo, 2010). Como se observa en las gráficas presentadas en este apartado, la intensidad de precipitación va desde 1 mm, 2 mm, 3 mm, 4 mm, 5 mm, 7 mm, 10 mm, 11mm, 15 mm y hasta un máximo 20 mm.

4.1.1 Días con débil intensidad de precipitación

Las precipitaciones de intensidad débil corresponden a aquellas cuyo contenido de lluvia oscila entre 0.1 y 2 milímetros en una hora. Durante la época de estudio hubo 17 días con dicha característica, aquellos que presentaron recurrentes precipitaciones leves a lo largo del día, se observan en la Figura 28 y 29. En el Anexo 1 se puede observar más gráficas con la presencia de precipitaciones de este tipo.

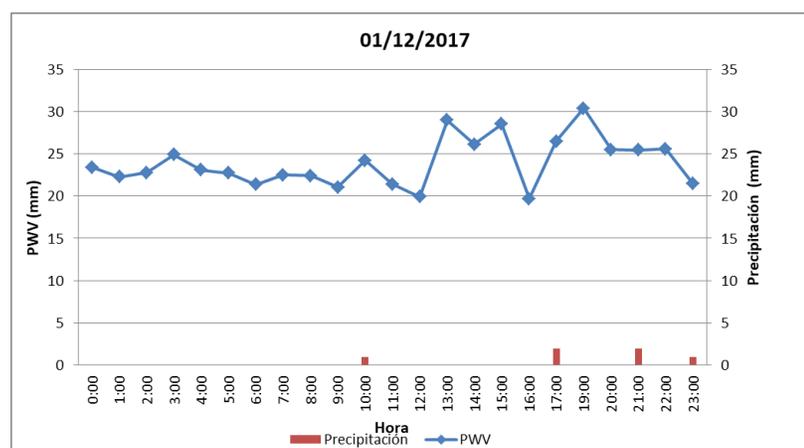


Figura 28. Comparación de PWV y Precipitación el 1 de Diciembre del 2017

Como se observa en la Figura 28, a las 19h00 se estima el mayor contenido de PWV para el período de estudio, con un total de 30.39 mm. Sin embargo, no existe registro de precipitación en ese lapso. El 25 de Noviembre del 2017 (ver figura 29) con un PWV de 27.2 mm se precipita un milímetro de lluvia. El comportamiento observado en los dos casos, se repite otras ocasiones, y puede atribuirse a la influencia de otros factores meteorológicos que inhiben o promueven eventos de precipitación de grandes magnitudes. Champollion, et al (2004) afirma que esta variable por sí sola no es suficiente para la comprensión de completa de los procesos atmosféricos, por lo que es necesario combinarla con otras que la influencien. Para el estudio

realizado por Campo (2013), valores altos de masa de agua precipitable en la atmósfera no siempre coinciden con precipitaciones intensas. En el destaca su importancia en la formación de lluvias intensas, y a su vez afirma que “deben darse condiciones dinámicas adicionales que desencadenen la convección”.

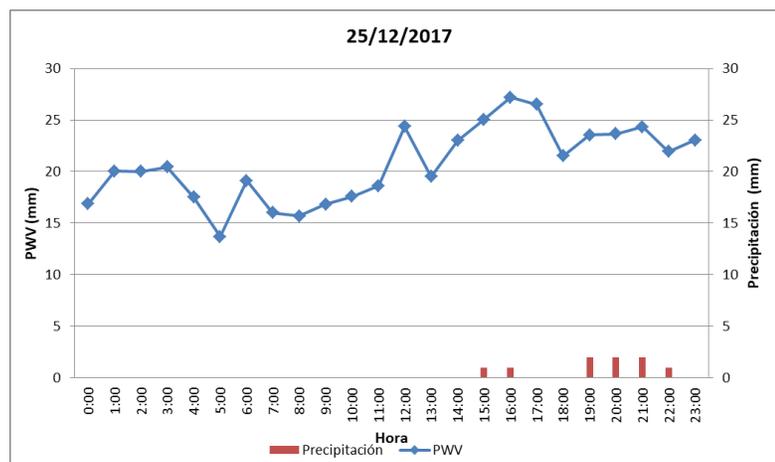


Figura 29. Comparación de PWV y Precipitación el 25 de Diciembre del 2017

4.1.2 Días con moderada intensidad de precipitación

Las precipitaciones de intensidad moderada corresponden a aquellas cuyo contenido oscila entre 2.1 y 15 milímetros en una hora (Agencia Estatal de Meteorología, 2009). En las Figuras 14, 15 y 16 se pueden apreciar ejemplos de días intensidad de precipitación de hasta 5mm, 10mm y 15mm, respectivamente.

- **Presencia de precipitaciones de hasta 5 mm**

En el Anexo 2, se observan los 15 días con este tipo de precipitación. El 27 de Enero del 2018 es un ejemplo de día con la presencia de precipitaciones de intensidad de hasta 5 mm. Para

dicho evento la cantidad de vapor de agua alcanza los 23.71 mm, el mayor de su serie diaria, precedido por contenido 21.55 mm de vapor de agua atmosférico (ver figura 30).

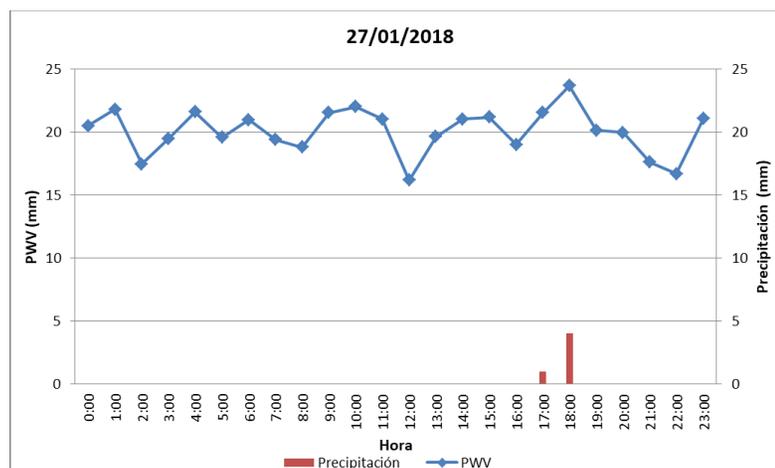


Figura 30. Comparación de PWV y Precipitación para el 27 de Enero del 2018- Día con intensidad de precipitación de hasta 5 mm.

En la Figura 31, se presenta una serie de PWV y precipitación para el periodo comprendido entre el 31 de Diciembre del 2017 y 1 de Enero del 2018. Como se observa en la gráfica, a partir de las 20h00 se presentan sucesivos eventos de precipitación moderada, que culmina tras 12 horas de lluvias.

El primer evento corresponde a un PWV de 25.33 mm, seguido de varias precipitaciones durante las cuales el contenido de PWV se mantuvo entre los 23 y 24 mm hasta las 03h00 de 1 de Enero, hasta entonces con un total de 22 mm de lluvia acumulada de manera interrumpida. A partir de ello, se observa un decaimiento en el contenido que PWV, el cual fluctua entre los 19 y 21 mm, con una caída de 11 mm de lluvia hasta las 7h00 (ver figura 31).

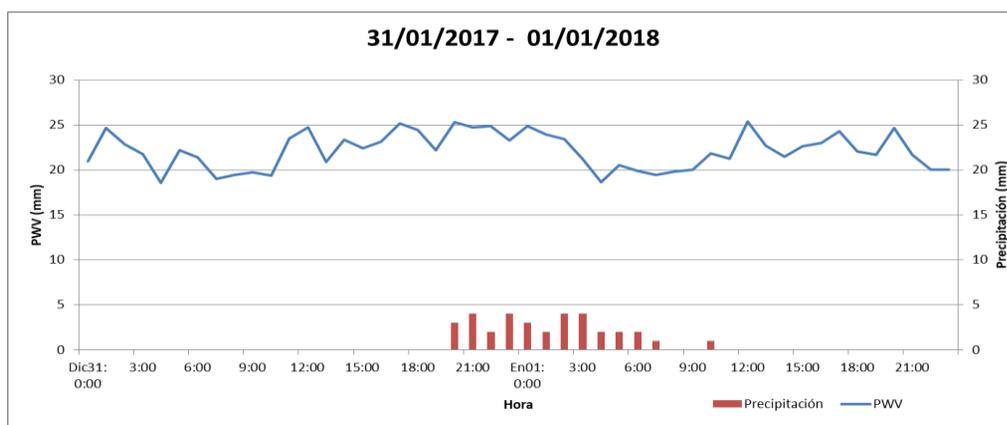


Figura 31. Serie de PWV en comparación con el evento de precipitación ocurrido del 31 de Diciembre del 2017 al 01 de Enero del 2018.

- **Presencia de eventos de precipitación de hasta 10 mm**

El único evento de precipitación de intensidad de 10 mm se dio el 21 de Noviembre del 2017, en la Figura 32 se observa que dicho evento coincide con el punto de mayor cantidad de PWV de la serie diaria, correspondiente a 29.5 mm. Evento seguido se precipitan 1 mm y 2mm, con 23.98 mm y 20.06 mm de PWV respectivamente.

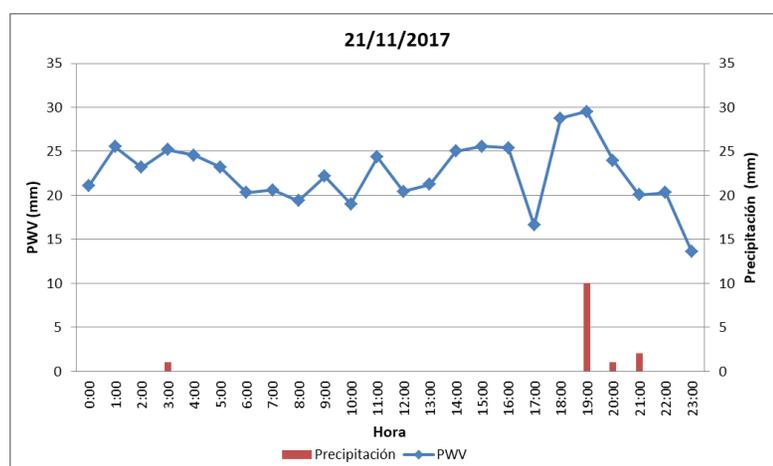


Figura 32. Comparación de PWV y Precipitación para días con intensidad de precipitación de hasta 10 mm.

Tomando en cuenta la máxima cantidad de PWV de la serie producida a las 19h00, tras la precipitación de 13 mm de lluvia en el lapso de 3 horas, el contenido de PWV llega a un valor mínimo de 13.62 a las 23h00 (ver figura 32).

- **Presencia de eventos de precipitación de hasta 15 mm**

En las Figuras 33, 34 y 35 se puede observar los dos días registrados con la presencia de precipitaciones de intensidad de hasta 15 mm en una hora. En la Figura 33, a las 15h00 se precipitaron 15 mm de lluvia, seguido 4 mm para las 16h00, con un PWV de 24.68 mm y 24.26 mm para cada caso. Los valores correspondientes al vapor de agua para dicho día son en promedio altos, y para el evento se observa que se mantiene entre sus máximos valores.

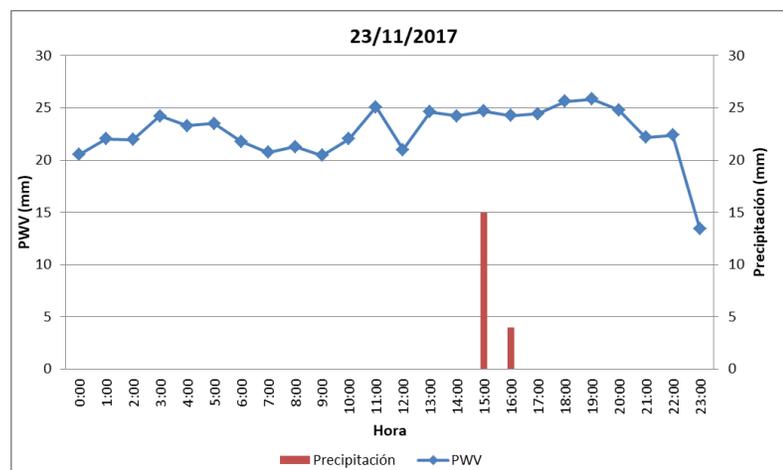


Figura 33. Comparación de PWV y Precipitación para el 23 de Noviembre del 2017- Día con intensidad de precipitación de hasta 15 mm.

El 14 de Noviembre del 2017, se produce un episodio de lluvia de 15 mm a las 17h00 y dos episodios de 1 mm a las 22h00 y 23h00. Cabe destacar el crecimiento de la cantidad de PWV

anterior a los eventos citados, mostrando un aumento a partir de las 14h00 que se mantiene hasta la finalización del día (ver figura 34).

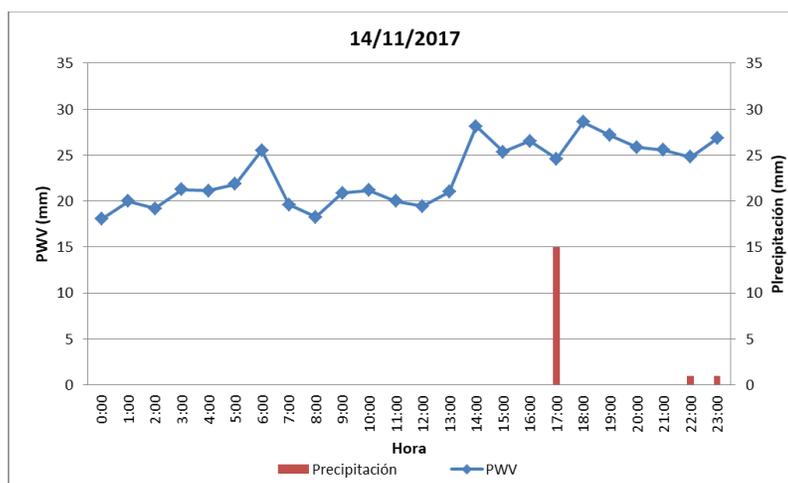


Figura 34. Comparación de PWV y Precipitación para el 14 de Noviembre del 2017- Día con intensidad de precipitación de hasta 15 mm.

En la Figura 35, se muestra el día con la mayor cantidad de precipitación acumulada para el período de estudio, con un total de 40 mm de pluviosidad registrada en 14 horas de lluvias distribuidas a lo largo del día. Como se observa en la gráfica, el contenido de PWV para la serie es alto durante todo el día, con un mínimo de 20.61mm hasta un máximo de 26.56mm.

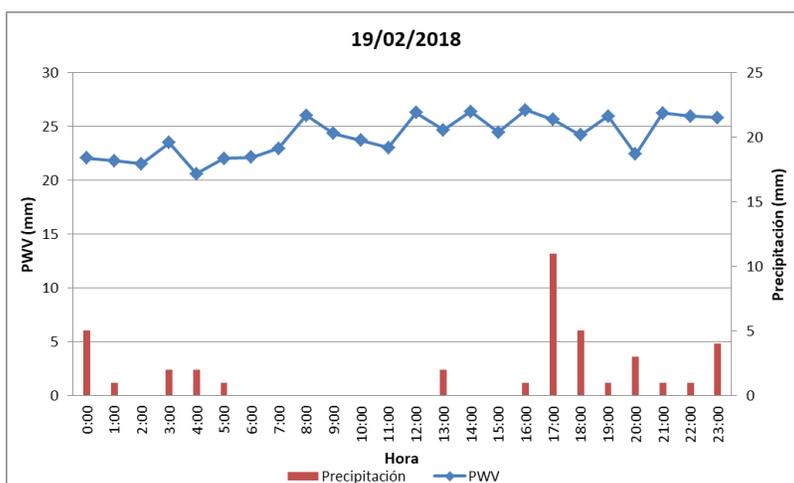


Figura 35. Comparación de PWV y Precipitación para el 19 de Febrero del 2018- Día con intensidad de precipitación de hasta 15 mm.

4.1.3 Días con fuerte intensidad de precipitación

Las precipitaciones de intensidad fuerte corresponden a aquellas cuyo contenido de lluvia oscila entre 15.1 y 30 milímetros en una hora. (Agencia Estatal de Meteorología, 2009). En el periodo estudiado hubo un solo evento de esta magnitud, dado el 10 de Diciembre del 2017 con la presencia de una descarga de 20 mm, seguida por otras de diferentes intensidades.

Como se observa en la Figura 36 , para el inicio de este fenómeno hubo un crecimiento previo en la cantidad de Vapor de Agua disponible en la atmósfera, de las 15h00 a las 16h00 el PWV ascendió de 21.92 mm a 26.92 mm, llegando a un máximo de 26.95 mm a las 17h00 en donde se produce la mayor precipitación registrada, con un total de 20 mm. Además, se puede observar que a medida que se precipita el vapor de agua en forma de lluvia su cantidad va descendiendo, llegando a las 23h00 a un total de 21.31 mm.

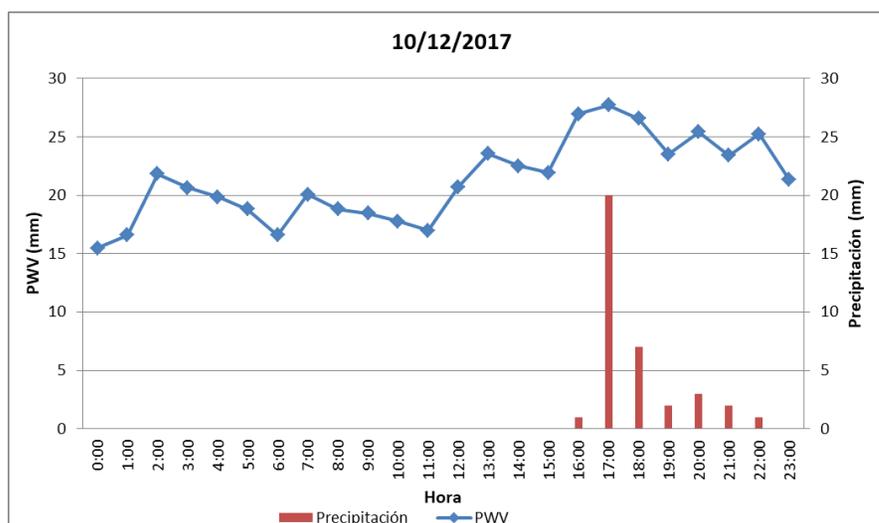


Figura 36. Comparación de PWV y Precipitación para días con fuerte intensidad de precipitación.

La serie de PWV de la Figura 36, evidencia que el contenido de PWV entre las 0h00 y 12h00 no supera los 22 mm, mientras que a partir de las 13h00 tiende a crecer. Dicho comportamiento, coincide con el periodo del día en que no se presentan precipitaciones y el inicio de su descarga consecutiva. Como se observa en la serie, existe un claro aumento del contenido de vapor de agua atmosférico previo al comienzo de la precipitación. Champollion et al. (2004) afirma que las precipitaciones fuertes están asociadas a la acumulación de vapor de agua y que el uso de GPS permite el estudio de la variación del PWV de manera precisa y continua antes, durante y después de la ocurrencia de episodios de precipitación

Durante el periodo de estudio, se registraron 11 episodios de mayor precipitación acumulada (ver tabla 12). Cabe destacar que se tomaron en cuenta únicamente los episodios de lluvia ininterrumpida, marcada hora a hora por la estación pluviométrica.

Tabla 12*Mayores episodios de lluvia*

Fecha	Precipitación acumulada	Duración	PWV inicial	PWV final
14/11/2017	15 mm	1h	24.57	-
21/11/2017	13 mm	3h	29.5	20.06
23/11/2017	19 mm	2h	24.68	24.26
02/12/2017	14 mm	7h	27.03	23.89
10/12/2017	36 mm	7h	26.95	25.22
26/12/2017	12 mm	5h	21.75	19.65
31/12/2017	33 mm	12h	25.33	19.44
01/01/2018				
13/01/2018	11 mm	4h	26.83	24.58
06/02/2018	12 mm	4h	23.68	22.71
19/02/2018	27mm	8h	26.56	25.83

Existieron episodios de larga duración, el mayor de ellos ocurrió del 31/12/2017 al 01/01/2018 con una duración de 12 horas y un total de 33 mm de lluvia. Seguido por el ocurrido el 19/02/2018 en el cual se precipitaron 27 mm en el lapso de 8. Otro episodio destacable fue el del 10/12/2017 donde se precipitaron 36 mm en 7 horas (ver Tabla 12).

Como se observa en la Tabla 12, tras episodios de lluvia ininterrumpida el contenido de vapor de agua en la atmósfera desciende para todos los casos en magnitudes diferentes. El 21/11/2017 hubo un decrecimiento de 9.44 mm de PWV, que corresponden a un contenido inicial de PWV=29.5 final de PWV=20.06 mm, tras la precipitación de 13 mm de lluvia en un lapso de 3 horas. En el episodio ocurrido entre los días 31/12/2017 y 01/01/2018 hubo un decrecimiento de 5.89 mm de vapor de agua, el cual inició en 25.33 mm y terminó en 19.44 mm tras la caída de 33 mm de lluvia.

4.2 CONTENIDO DE PWV EN DÍAS SIN PRECIPITACIONES

El contenido de Vapor de Agua en días sin precipitaciones es bastante variable y no se ha reconocido un patrón específico. En el Anexo 3, se presenta una muestra de las gráficas resultantes.

4.3 CONTENIDO PROMEDIO DIARIO DE VAPOR DE AGUA PRECIPITABLE EN LA ESTACIÓN EPEC CADA MES

La comparación del contenido promedio de PWV y la Precipitación para los meses de Noviembre, Diciembre, Enero y Febrero se observan en las Figuras 37, 38, 39 y 40. En dicho periodo se registraron 40 días con presencia de lluvia cuyos valores diarios oscilan entre 1 y 40 milímetros.

En el mes de Noviembre el contenido promedio de Vapor de Agua fue de 20.87 mm. Para días lluviosos el PWV está entre los 22.45 mm y 24.25 mm, y para días sin precipitaciones 16.15 mm a 22.5 mm. Como se observa en la Figura 37, la serie de tiempo varía en el contenido de PWV y este está relacionado a la ocurrencia de precipitaciones, presentando valores mayores en días con presencia de episodios de lluvia.

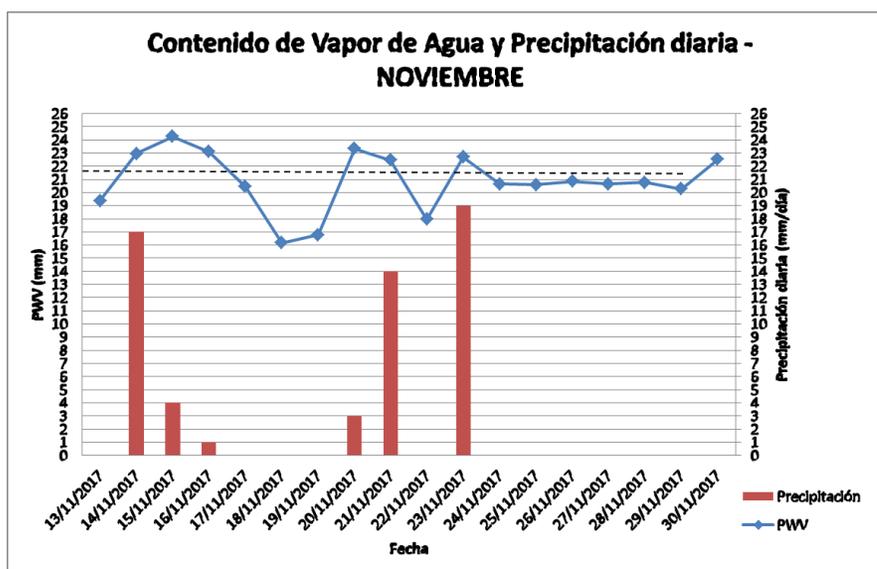


Figura 37. Contenido de Vapor de Agua y Precipitación diaria en el mes de Noviembre.

Para Diciembre se repite el mismo comportamiento en los 13 días con presencia de episodios de precipitación, donde se presentan altos contenidos de vapor de agua en la atmósfera el cual varía entre 19.07 mm y 25.16 mm. Los días en los que no se presentan episodios de lluvia, tienen en general valores menores a los anteriormente mencionados, sin embargo, no puede considerarse una generalidad puesto que excepciones como los días 4, 21, 29 y 30 de Diciembre, muestran altos contenidos de PWV correspondientes a 21.28 mm, 20.07 mm, 21.95 mm y 22.27 mm, respectivamente (ver figura 38).

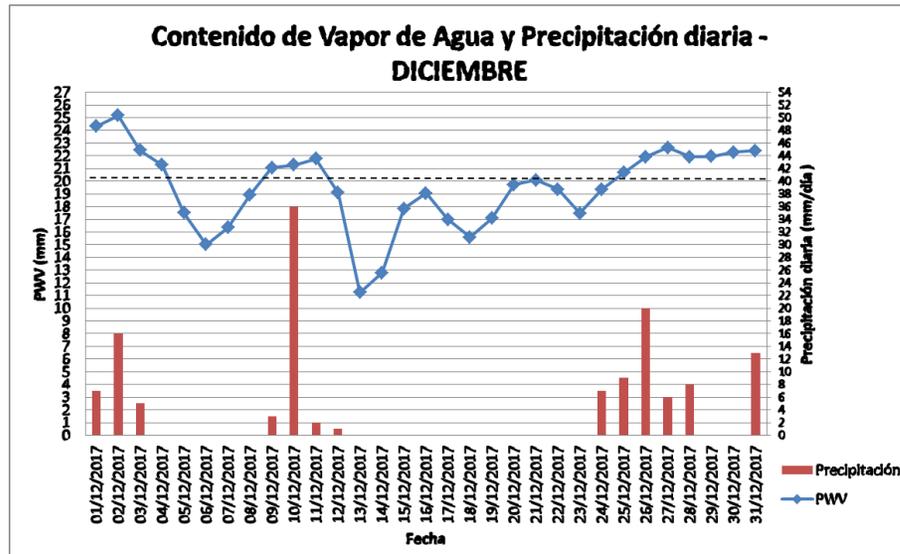


Figura 38. Contenido de Vapor de Agua y Precipitación diaria en el mes de Diciembre.

En el mes de Enero el contenido promedio de PWV para días lluviosos fue de 21.53 mm, con un máximo de 23.18 mm y un mínimo de 17.28 mm, para los días 17/01/2018 y 07/01/2018, respectivamente. Como se observa en la Figura 39, del 11/01/2018 al 12/01/2018 existe un crecimiento de 4.7 mm en el contenido de PWV, el cual aumenta de 16.33 mm a 21.01 mm. A partir de ello, la serie de tiempo mantiene valores altos de PWV hasta el 17/01/2018 (PWV=23.18 mm), lapso de 5 días en el que se precipitaron 52 mm de lluvia.

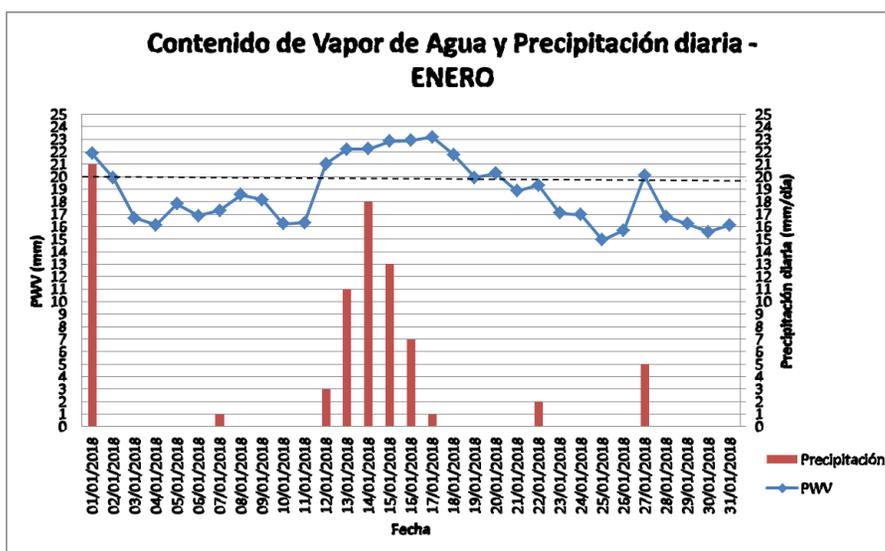


Figura 39. Contenido de Vapor de Agua y Precipitación diaria en el mes de Enero.

En el período estudiado en el Febrero, existieron 11 días con presencia de precipitaciones cuyo contenido de PWV oscila entre un mínimo de 18.28 mm y un máximo de 24.11 mm. Se destaca el día 19/02/2018 el cual presenta la mayor precipitación diaria acumulada de la época de estudio, 40 mm de lluvia, con un contenido promedio de 24.11mm de vapor de agua en la atmósfera. Por otra parte, los días sin presencia de precipitaciones presentaron un contenido de PWV máximo de 22.74 y mínimo de 15.49 mm. Comparando ambas situaciones se observa que el contenido de PWV es en general mayor en días con presencia de precipitaciones. Y que en el transcurso de este mes, a contenidos mayores de PWV= 22.74 mm, ocurren precipitaciones en todos los casos (ver figura 40).

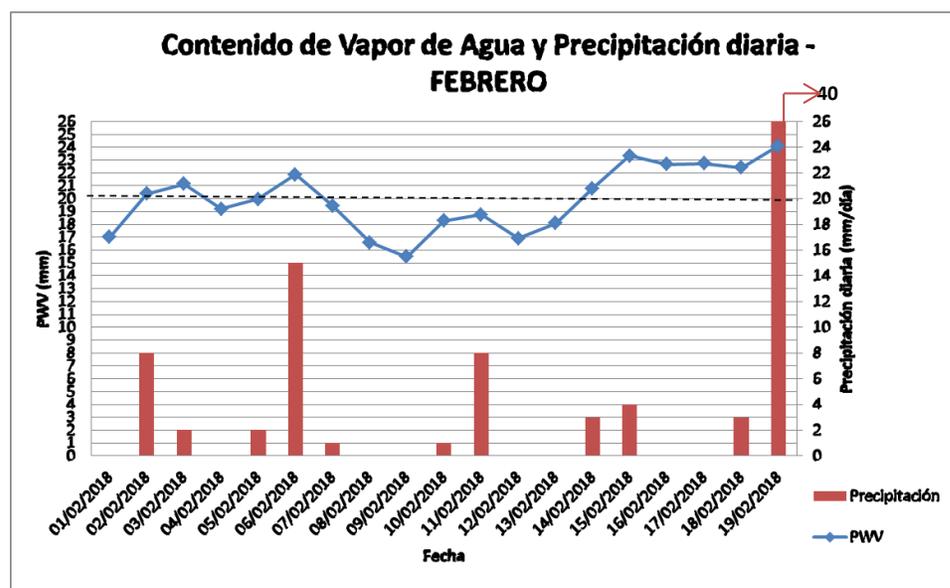


Figura 40. Contenido de Vapor de Agua y Precipitación diaria en el mes de Febrero

La Figura 41 muestra la totalidad de la serie de tiempo de PWV para periodo de estudio, que incluye los meses de Noviembre, Diciembre, Enero y Febrero. Según información del Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología (INAMHI), en la región Sierra, la estación lluviosa inicia en el mes de Octubre y finaliza en Mayo, como resultado se puede observar que la serie de tiempo presentada, muestra gran cantidad de días con presencia de precipitaciones.

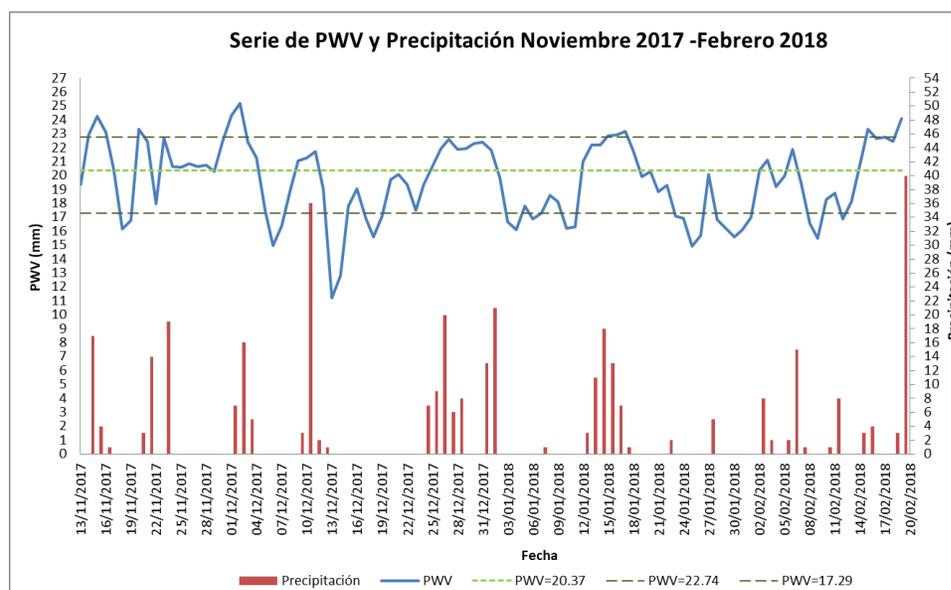


Figura 41. Serie total del PWV y Precipitación diaria para el periodo de estudio.

La serie de tiempo total, evidencia que existe relación entre el comportamiento del vapor de agua y la ocurrencia de episodios de lluvia. Como se observa, en aquellos días en los que existen precipitaciones la gráfica de PWV muestra picos, que en el 77.5% de los casos se encuentran por sobre la línea verde punteada (PWV=20.37 mm); el 22.5% restante, oscila entre valores de 11 y 20 milímetros. Así también, hay días en que a pesar de presentar PWV altos no ocurren precipitaciones, en términos porcentuales, el 20.33% de los días sin registro de precipitaciones superan los 20.37 mm de contenido de vapor de agua en la atmósfera (ejemplo: 16/02/2018). Como conclusión, si bien el alto contenido de PWV es un indicador atmosférico de la ocurrencia de lluvias, existen otros factores climatológicos que influyen la ocurrencia o no de estos eventos. Por lo que es necesario el estudio de una mayor cantidad de variables que aporten con resultados concluyentes.

El contenido promedio, máximo y mínimo de PWV para el total de los datos diarios, en días lluviosos y sin precipitaciones se muestra en la Tabla 13. De los resultados presentados, se

puede deducir que en aquellos días en que el contenido promedio de PWV es mayor a 22.74 mm se producen precipitaciones en todos los casos; y que en aquellos cuyo contenido es menor a 17.29 mm no se producen precipitaciones (ver tabla 13). Entonces, el intervalo comprendido entre ambos (17.29 mm - 22.74 mm), marca un tramo de incertidumbre en el que puede o no presentarse episodios de lluvia. Dentro de este tramo, existieron 31 días con PWV mayores a 20.37 mm, de los cuales 20 días presentaron precipitaciones, obteniendo así una probabilidad del 66.66 % de que se produzcan precipitaciones en los días en que el PWV esté entre los 20.37 mm y 22.74 mm. Sin embargo, existen otros factores climatológicos que influirían en el comportamiento del 33.34% de días restantes.

Tabla 13

Contenido de PWV para el total de los datos diarios, en días lluviosos y sin precipitaciones

	Total PWV (mm)	Días lluviosos PWV (mm)	Días sin precipitaciones PWV (mm)
Promedio	19.52	21.65	18.19
Máximo	25.16	25.16	22.74
Mínimo	11.24	17.29	11.24

En resumen se puede decir que el contenido promedio diario de vapor de agua en la estación EPEC presenta valores no menores a 11.24 mm y no mayores a 25.16 mm, con un promedio de 19.52 mm (ver tabla 13).

Otros trabajos relacionados al estudio del Vapor de Agua atmosférico en relación a las precipitaciones, coinciden con los resultados expuestos. De acuerdo con Priego (2012), el contenido de PWV está altamente relacionado con la probabilidad de que ocurran o no precipitaciones y los episodios de lluvia se producen en valores máximos de PWV.

4.4 ANÁLISIS ESTADÍSTICO

4.4.1 Análisis Gráfico- Diagramas de Caja

En la Figura 42 se presenta el diagrama de caja correspondiente al PWV estimado cada hora, como se observa, el contenido total de la serie varía desde un mínimo de 9.2 mm hasta un máximo de 30.39 mm. El primer cuartil (Q_1), mediana o segundo cuartil (Q_2), y tercer cuartil (Q_3), corresponden a 17.04 mm, 19.89 mm y 22.4 mm, respectivamente. A partir de lo que se afirma que el 50% de las estimaciones están entre los 17.04 y 22.4 mm. De este análisis además, se identificaron 18 valores atípicos, los cuales fueron retirados al ser considerados posibles errores.

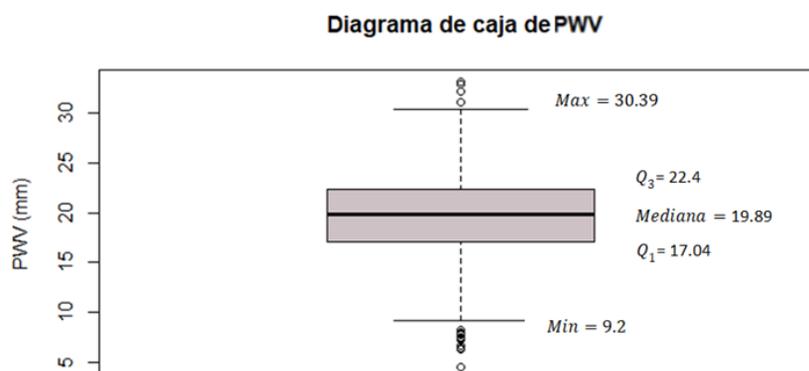


Figura 42. Diagrama de caja del estimado de PWV en intervalos de una hora

Según datos del Instituto Geográfico Militar (IGM), en el año 2016 el contenido de PWV de la estación EPEC varió entre 9.61 mm y 33.81 mm, y el 50% de sus observaciones se encontraron entre los 17.73 mm y 24.52mm. Esta comparación muestra que el contenido de PWV de la

estación EPEC presenta un comportamiento estable, que se mantienen dentro de un rango de valores que no presenta variaciones significativas.

El diagrama de caja del contenido promedio diario de PWV se muestra en la Figura 43, en este caso, varía entre los 11.24 mm y 25.16 mm. Como se observa en la gráfica, el 50% de los datos se encuentra entre los 17.08 mm y 21.91 mm. Además, no se encontraron valores atípicos.

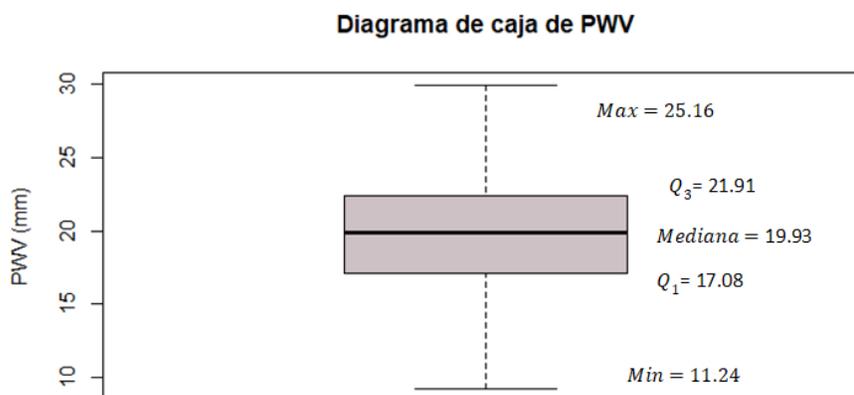


Figura 43. Diagrama de caja de los valores promedio de PWV al día

4.4.2 Prueba de normalidad

Se realizó la prueba de normalidad K-S test a un nivel de significancia de $\alpha = 0.05$ a fin de determinar si las variables de estudio, PWV y precipitación, siguen una distribución Gaussiana. Acorde al número de muestras (L) se calculó el valor crítico (CV) y utilizando el software R se obtuvo el estadístico de prueba (D) como se observa en la Tabla 14.

Tabla 14*Estadísticos de la prueba K-D test*

Variable	L	CV	D
PWV en intervalos de 1 hora	2357	0.033	0.031
PWV promedio diaria	99	0.163	0.084
Precipitación en intervalos de 1 hora	2357	0.033	0.503
Precipitación acumulada diaria	99	0.163	0.307

Para la variable PWV en intervalos de una hora y en valor promedio diario, se acepta la hipótesis nula H_0 : Los datos siguen una distribución normal, como se observa, para ambos casos $D < CV_{(\alpha, N)}$ (ver tabla 14). En Figura 44 a) presenta la gráfica de la distribución del Vapor de Agua atmosférico en intervalos de una hora, y la Figura 44 b), la distribución su contenido promedio diario.

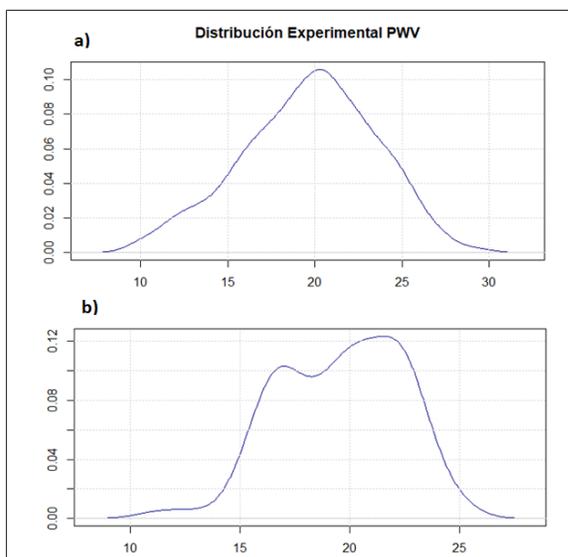


Figura 44. Distribución de la variable PWV de la serie a intervalos de una hora y en valor promedio diario

Otra de las variables analizadas es la precipitación en intervalos de una hora y acumulada diaria, en este caso, se rechaza hipótesis nula H_0 , ya que para ambas series el estadístico de prueba es mayor que el valor crítico ($D > CV_{(\alpha, N)}$). Afirmación con la que se demuestra que la precipitación no sigue una distribución normal. En la Figura 45 a) presenta la gráfica de la distribución de la variable precipitación en intervalos de una hora, y la Figura 45 b), la distribución precipitación acumulada diaria, donde observa que las curvaturas no siguen una distribución Gausseana.

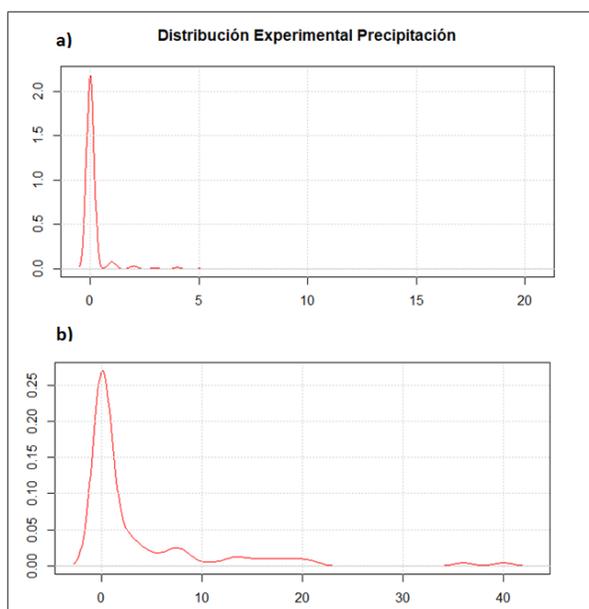


Figura 45. Distribución de la variable Precipitación a intervalos de una hora y acumulada diaria.

4.4.3 Coeficiente de correlación

Se planteó la determinación de estadísticos de correlación a fin de establecer si el contenido de PWV en la atmósfera es un indicador de ocurrencia de precipitaciones. Del apartado anterior, se define que únicamente la variable PWV sigue una distribución normal, por lo que se decidió aplicar como estadístico el coeficiente de correlación de Spearman.

Para la serie de tiempo a intervalos de una hora se obtuvo un coeficiente de correlación $r_s = 0.26$, lo que significa acorde al nivel de fuerza y dirección de la correlación dada por Lind, Marchal & Wathen (2008) (ver figura 17) que estas variables presentan una correlación positiva débil.

Para la serie de tiempo diaria (PWV promedio y precipitación acumulada diaria) se obtuvo un coeficiente de correlación $r_s = 0.65$, es decir que correlación entre las variables es positiva y fuerte (Lind, Marchal, & Wathen, 2008). Al contrario de lo expuesto, Navarrete (2008) sostiene en su estudio que existe una baja asociación entre estas variables, al aplicar una regresión lineal obtiene un coeficiente de correlación de Pearson de 0.363, lo que se traduce en una correlación positiva débil. Esta comparación permite ver la importancia de la selección del tipo de coeficiente de correlación, que para el presente estudio fue justificado a partir del rechazo de la hipótesis de normalidad de la variable precipitación.

4.5 LA VALIDACIÓN DE TÉCNICA DE POSICIONAMIENTO PUNTUAL PRECISO PARA LA RECUPERACIÓN DE PWV

Varios autores han validado el uso de GPS como un sistema de estimación del contenido de vapor de agua precipitable en la atmósfera comparando sus soluciones con las de radio sondeos (Tregoning et al, 1998; Priego, 2012; Cioce, 2009; Alexandrov, 2009; Vázquez et al, 2013; entre otros). Dada la carencia de estos datos a nivel nacional, se realizó la validación de la técnica de Posicionamiento Puntual Preciso para la recuperación de PWV (PWV-PPP) por medio de la comparación de los últimos datos procesados por el Instituto Geográfico Militar – IGM de la campaña del 2017 (PWV-IGM). Cabe señalar, que la estrategia utilizada por el IGM se basó en la utilización del software científico Gamit/Globk, con el que se calculó las posiciones relativas entre un grupo de 6 estaciones, entre las que se incluye la estación EPEC. Y el uso del módulo `sh_metutil`, perteneciente al mismo software, para estimación de los parámetros troposféricos, aplicación de correcciones en el ZHD y conversión a PWV (Porrás, et al., 2017).

4.5.1 Comparación entre soluciones

Las soluciones (a intervalos de una hora) comparadas difieren en el tipo de método de estimación aplicado, y del software utilizado. En el presente estudio se aplicó la técnica PPP utilizando el software libre RTKLIB (ver sección 3.3), mientras que, el IGM lo hizo utilizando el método relativo en software científico Gamit/Globk. En la Figura 46, se puede observar que las series de PWV-PPP y PWV-IGM siguen un comportamiento similar. Los estadísticos correspondientes a la media aritmética, desviación estándar, valor máximo y mínimo de dichas soluciones se observan en la Tabla 15.

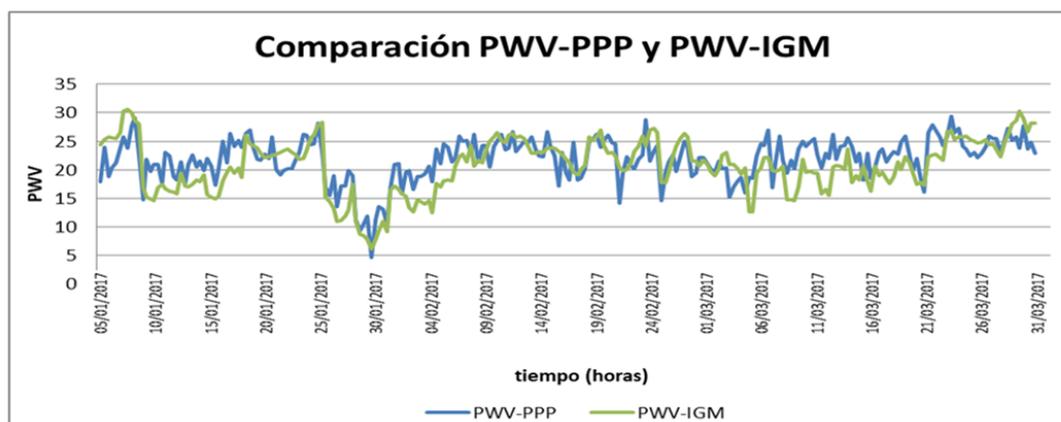


Figura 46. Series de PWV-PPP y PWV-IGM

Tabla 15

Estadísticos de las soluciones de PWV-PPP y PWV-IGM

Estadísticos	PWV-PPP (mm)	PWV-IGM (mm)
Media Aritmética (\bar{x})	21.8604	20.7389
Desviación Estándar (s)	3.7841	4.7383
Máximo	29.3567	30.5400
Mínimo	4.5872	6.1400

A fin de determinar si existe igualdad estadística entre soluciones comparadas, se realizó una prueba de hipótesis para la diferencia de medias con las hipótesis nula (H_0) y alternativa (H_a) definidas a continuación:

- $H_0: \mu_{PPP} = \mu_{IGM}$
- $H_a: \mu_{PPP} \neq \mu_{IGM}$

Utilizando la información de la Tabla 15, se obtuvo el estadístico de prueba Z para dos muestras n_1 y n_2 de 246 observaciones; para ello se aplicó la ecuación (49) (ver sección 2.6.6.2).

$$Z = \frac{21.8604 - 20.7389}{\sqrt{\frac{3.7841^2}{246} + \frac{4.7383^2}{246}}} \quad (51)$$

(52)

$$Z = 2.9$$

A un nivel de significancia del $\alpha = 0.05$ para una prueba Z de dos colas, el valor crítico es de 1.96 (ver tabla 9). La zona de rechazo de la prueba va para valores ≤ -1.96 y para valores ≥ 1.96 . Como se observa en la Figura 47, el estadístico Z cae dentro de la zona de rechazo de la prueba, por lo que se rechaza la hipótesis nula (H_0) indicando que no existe igualdad estadística entre las medias poblacionales de las soluciones obtenidas de la aplicación de la técnica de PPP en el software libre RTKLIB y las soluciones obtenidas de la aplicación del método relativo utilizado en el software Gamit/Globk. Este resultado puede deberse a que en algunas ocasiones las diferencias obtenidas entre ambas técnicas son muy grandes, alcanzando un máximo de 6.99 mm, el análisis de dichas diferencias se presenta en la sección 4.5.2.

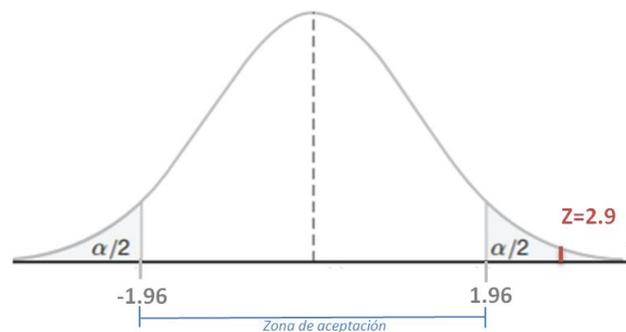


Figura 47. Prueba de hipótesis

Fuente: Modificado de (Walpole, Myers, & Myers, 2012).

4.5.2 Análisis de las diferencias

Las diferencias en valor absoluto obtenidas entre el PWV-PPP y el PWV-IGM (D_PWV) se presenta la Figura 48, considerando que las estimaciones de PWV-IGM son las de mayor precisión. Por otra parte, en la Tabla 16 se muestran los estadísticos de las diferencias entre los ZTD obtenidos por ambas técnicas (D_ZTZ) a más de los estadísticos de D_PWV.

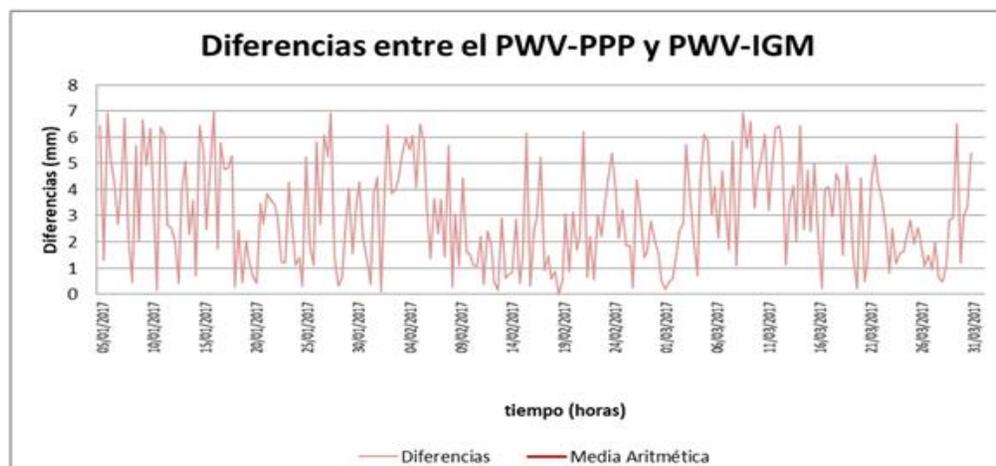


Figura 48. Diferencias entre el PWV- PPP y PWV-IGM

Tabla 16

Estadísticos de las diferencias entre PWV-PPP y PWV-IGM y de las diferencias de ZTD

Estadísticos	D_ZTD (cm)	D_PWV (mm)
Media Aritmética	1.92	3.01
Desv. Est (σ)	1.25	1.95
Máximo	6.37	6.99
Mínimo	0.07	0.00

El la Figura 48, se observa que existen variaciones en la serie de D_PWV, que van desde los 0.00 mm hasta los 6.99 mm, con una media aritmética de 3.01 mm y una desviación estándar de 1.95 mm (ver tabla 16). Además, se observa una línea referencial de color rojo, la cual marca el límite establecido por la European Meteorological Services Network (EUMETNET) en

términos de exactitud, para que los estimados de vapor de agua derivados de los sistemas satelitales de navegación sean considerados de utilidad en la meteorología.

Considerando que el límite de exactitud establecido es de $5 \frac{Kg}{m^2}$ y 5 mililitros, para estimados de IWV y PWV respectivamente (Offiler, 2010). Se observa que la mayor parte de los datos cumplen con la exactitud establecida, en términos porcentuales el 80.49 % de las estimaciones de PWV obtenidas con la metodología expuesta son aceptados como datos para utilidad en la meteorología. Aunque los resultados expuestos se verificaron en base a la comparación con un método más preciso como es el relativo, hace falta su validación con otras técnicas de detección. La EUMETNET ha definido como base de verificación a las técnicas de radio sondeo, WV Lidar y a los radiómetros de vapor de agua (WVR), con cuya comparación se podría definir la aplicabilidad de las estimaciones de PWV obtenidas en la predicción numérica del tiempo (NWP) a escala regional y local (Offiler, 2010).

Por otra parte, el restante 19.51 % de estimaciones de PWV caen fuera del límite establecido por la EUMETNET, con diferencias que superan los 5 mm, valores a los que se les puede atribuir el rechazo de la prueba de medias realizado anteriormente. Al comparar los D_{PWV} y D_{ZTD} , se observa que existe una relación directa entre ellos. Cuando las D_{ZTD} superan los 3.2 cm (D_{ZTD}^*) las D_{PWV} son mayores a 5 mm (ver figura 49). Por otra parte, cuando los D_{ZTD} son menores a 3.2 cm (D_{ZTD}_v) expresados como barras verdes, se generaron PWV cuyas diferencias se encuentran bajo el límite de 5 mm (ver figura 49).

Las diferencias entre los ZTD generados por ambos software pueden deberse en parte al tipo de modelo troposférico utilizado para cada caso. Mientras para el procesamiento realizado en el software RTKLIB se utilizó el modelo “Estimate ZTD” propuesto y recomendado por el

mismo autor (Paredes, 2013). “El software GAMIT parametriza ZTD como una variación estocástica del modelo Saastamoinen con interpolación lineal por partes” (Maorong & Calais, 2002).

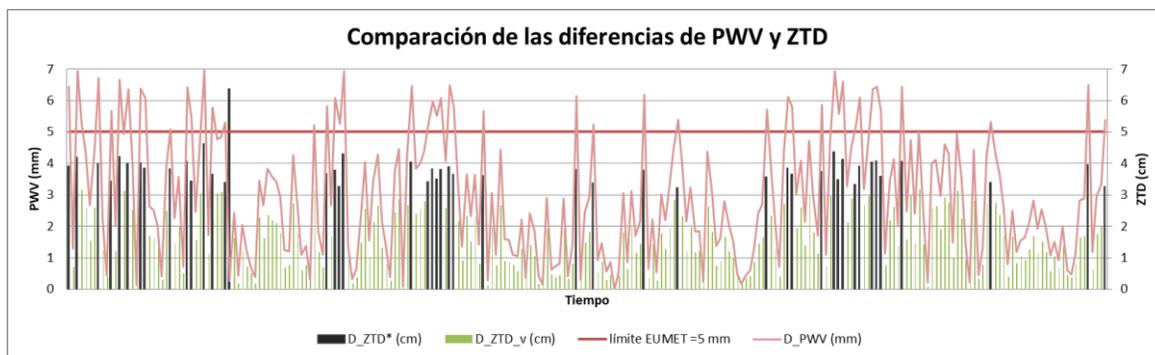


Figura 49. Comparación entre las diferencias de ZTD y PWV obtenidos con ambas técnicas

Como se observa en los resultados, si bien algunas soluciones de PWV obtenidas con la técnica PPP en este estudio son muy cercanas al método relativo, existen otras que presentan grandes diferencias por lo que queda abierta la posibilidad de explorar diferentes modelos, y productos que permitan mejorar las estimaciones obtenidas.

Otros trabajos relacionados han obtenido resultados en parte similares a los expuestos en este estudio. En el trabajo realizado por Cioce et al. (2016) se obtuvo diferencias medias de 9 mm al comparar las soluciones de ZTD obtenidas con PPP y el método relativo utilizando en ambos casos el software científico Bernesse v5.2. En el presente trabajo se obtuvieron diferencias medias de ZTD de 1.9 cm, a diferencia del anteriormente citado, se compararon soluciones PPP obtenidas de software libre con soluciones del método relativo obtenidas en software científico.

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 CONCLUSIONES

- Con la metodología empleada, la técnica PPP permite la estimación de vapor de agua atmosférico con diferencias promedio de 3 mm respecto al método relativo.
- En cuanto a la relación entre precipitación y PWV, se obtuvieron estadísticos de correlación que indicaron que, el contenido promedio diario de vapor de agua es el que mejor describe el comportamiento de la atmósfera en cuanto a la ocurrencia de precipitaciones
- Se identificó, que en los días en que el PWV promedio fue mayor a 22.74 mm ocurrieron precipitaciones en todos los casos. Mientras que a PWV menores a 17.29 mm no se registraron datos pluviométricos. Sin embargo, el contenido de PWV comprendido entre ambos extremos (17.29 mm a 22.74 mm) marca un tramo de incertidumbre en el que puede o no presentarse episodios de lluvia.
- Dentro del tramo de incertidumbre, existe una probabilidad del 66.66% de que ocurran episodios de lluvia en los días en que el PWV es mayor 20.37 mm. Como se observa, un alto contenido de PWV es un indicador de ocurrencia de lluvias. Sin embargo, existen otros factores climatológicos que influirían en el comportamiento del 33.34% de días restantes.

5.2 RECOMENDACIONES

- Es importante validar la metodología expuesta para la estimación de vapor de agua atmosférico con otras técnicas de detección (radiosondas o los radiómetros de vapor de agua), de manera que se puedan contrastar soluciones y establecer su aplicabilidad en la predicción numérica del tiempo.
- Además, se recomienda aplicarla en otras estaciones de la REGME, que presenten condiciones climáticas diferentes a las expuestas en este estudio.
- Tomando en cuenta la importancia del vapor de agua en el desarrollo de procesos atmosféricos así como su potencial en el pronóstico de tiempo y estudios del cambio climático. Se sugiere profundizar su estudio utilizando la tecnología GPS, al ser una alternativa viable y de bajo costo, la misma que ayudaría a obtener esta variable meteorológica con una mejor distribución espacio temporal.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Acuña, G. (2008). *Introducción al Posicionamiento GPS de Punto Preciso (PPP): Fundamentos Teóricos*. Maracaibo: Universidad de Zulia.
- Agencia Estatal de Meteorología. (2009). *Plan Nacional de Predicción y Vigilancia de Fenómenos Meteorológicos Adversos (Meteoalerta)*. España: Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural Y Marino.
- Albán, M., Romero, R., & Tierra, A. (2016). *Cálculo de coordenadas usando el método Precise Point Positioning –PPP estático mediante el software libre RTKLIB*. Quito: Revista Geociencias.
- Alexandrov, M., Schmind, B., Turner, D., Cairns, B., Oinas, V., Lacis, A., . . . Eilers, J. (2009). *Columnar water vapour retrievals from multifilter rotating shadowband radiometer data*. Journal of Geophysical Research.
- Andrades, M. (2012). *Fundamentos de climatología*. Iberus, Universidad de La Rioja.
- Bates, B., Kundzewicz, Z., Wu, S., & Palutikof, J. (2008). *El Cambio Climático y el Agua*. Ginebra: Documento técnico del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático.
- Bevis, M., Businger, S., Chiswell, S., Herring, T., Anthes, R., Rocken, C., & Ware, R. (1994). *GPS Meteorology: Mapping Zenith Wet Delays onto Precipitable Water*. American Meteorological Society.

- Bevis, M., Businger, S., Thomas, H., Rocken, C., Anthes, R., & Ware, R. (1992). *GPS Meteorology: Remote Sensing of Atmospheric Water Vapor Using the Global Positioning System*. *Journal of Geophysical Research*, 97, 787-801.
- Bock, Y., Wdowinski, P., Zhang, S., Johnson, J., Gengrich, J., & Dean, M. (1998). *Southern California permanent GPS geodetic array: continuous measurements of regional crustal deformation between the 1992 Landers and 1994 Northridge earthquakes*. *Geophysical Journal*, 189, 1813-1833.
- Buchdahl, J. (1999). *Global Climate Change, Student Guide*. Atmosphere, Climate & Environment Information Programme. Manchester: Manchester Metropolitan University.
- Campo, I. (2013). *Masa de agua precipitable, índices de inestabilidad e isocero en el Mediterráneo Occidental durante el Periodo de Observación Especial HyMeX- SPO1 (otoño de 2012)*. Barcelona: Universidad de Barcelona.
- Capilla, R. (2015). *Aportación al estudio de la capacidad de los modelos conceptuales en posicionamiento absoluto preciso (precise point positioning) para tiempo real a través del análisis del rendimiento de productos y prototipos en un escenario multi-constelación GNSS*. Valencia: Universidad Politécnica de Valencia.
- Champollion, C., Masson, F., Baelen, J., Walpersdorf, A., Chery, J., & Doerflinger, E. (2004). *GPS monitoring of tropospheric water vapor distribution and variation during 9 September 2002 torrential precipitation episode in the Cévennes*. *Journal of Geophysical Research*, 109.

- Cioce. (2009). *Aplicación de observaciones GPS para la cuantificación de Vapor de Agua troposférico en la ciudad de Maracaibo*. Maracaibo: Universidad de Zulia.
- Cioce, V., Espinoza, D., Rincón, M., Wildermann, E., Royero, G., & Sánchez I. (2016). *Estimación y seguimiento del retardo troposférico GPS empleando posicionamiento de punto preciso*. Quito: Simposio SIRGAS 2016.
- Cioce, V., Hoyer, M., Wildermann, E., Royero, G., & Días, A. (2011). *Determinación del Vapor de Agua Troposférico través de observaciones GPS: Primeros ensayos en Venezuela*. *Interciencia*, 36(10), 721-730.
- Cuixian, L. (2016). *Real-time sensing of atmospheric water vapor from multi-GNSS constellations*. Berlín: Technischen Universität Berlin.
- Dlugokencky, E., Houweling, S., Schroder, M., Hurst, D., & Foster, P. (2016). *Observación del vapor de agua*. Organización Meteorológica Mundial.
- Emardson, R., & Derks, H. (2000). *On the relation between the wet delay and the integrated precipitable water in the European atmosphere*. *Meteorol*, 61-68.
- European Meteorological Service Network. (2010). *Product Requirements Document version 1.0*. Bruxelles: GNSS Water Vapour Programme (E-GVAP-II).
- Falvey, M., & Beavan, J. (2002). *The Impact of GPS Precipitable Water Assimilation on Mesoscale Model Retrievals of Orographic Rainfall during SALPEX'96**. *American Meteorological Society*, 130, 2874–2888.

- Fernández, L., Meza, A., & Natali, M. (2009). *Determinación del contenido de vapor de agua precipitable (PWV) a partir de mediciones GPS: Primeros resultados en Argentina*. GEOACTA, 34, 35-57.
- Font , I. (2000). *Climatología de España y Portugal*. Salamanca: Ediciones Universidad de Salamanca.
- Gerding, M., Ritter, C., Muller, M., & Neuber, R. (2004). *Tropospheric water vapour soundings by LIDAR at high Arctic latitudes*. Journal of Atmospheric Research. 71, 289-302.
- Gómez, H. (2009). *Estadística*.
- Grupo de física de la atmósfera. (2018, 05 25). *Radiómetro*. Retrieved from Universidad de León: <http://193.146.101.113/drupal/?q=node/25>
- Hafiz, M., & Kamarudin, N. (2008). *Proceedings International Conference on environmental research and technology*. GPS Meteorology in Malaysia.
- Hagemann, S., Bengtsson, L., & Genat, G. (2002). *Determination of atmospheric water vapour from GPS measurements*. Max-Planck Institute for Meteorology.
- Henry, J., & Heinke, G. (1999). *Ingeniería Ambiental*. México: Prentice Hall.
- Hofmann, B., Lichtenegger, H., & Collins, J. (1997). *Global Positioning System* . Springer-Verlag.
- Huerta, E., Mangiaterra, A., & Noguera, G. (2005). *GPS Posicionamiento Satelital*. Rosario: UNR Editora-Universidad Nacional de Rosario.

INAMHI. (2015). *Anuario Meteorologico* Nro. 52-2012. Quito, Ecuador.

Instituto Geográfico Militar. (2016). *Formulario Informativo de la Estación de Monitoreo Continuo ESPE - EPEC*. Quito.

Jacob, D. (2001). *The rol of water vapour in the atmosphere. A short overview from a climate modeller's point of view*. Chem Earth.

Kačmařík, M. (2017). *Retrieving of GNSS Tropospheric Deays from RTKLIB in Real- Tome and Post-procesing Mode*. Dynamics in GIscience, 181-194.

Kleusberg, A., & Teunissen, P. (1998). *GPS for Geodesy*. Berlin: Springer.

Klobuchar, J. (1987). *Ionospheric time-delay algorithm for single-frequency GPS users*. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 325-331.

Kouba, J. (2009). *A guide to using international gps Service (IGS) products*. GPS Solutions, 5(2), 12-28.

Leica Geosystems AG. (2008). *Introducción al Sistema GPS (Sistema de Posicionamiento Global)*. GPS Basics.

Leick, A. (2004). *GPS Stellite Surveying*. New York: John Wiley.

Lilliefors, H. W. (1967). *On the Kolmogorov- Smirnov Test for normality with mean and variance unknown*. Journal of the American Statistical Association, 62(318).

Lind, D., Marchal, W., & Wathen, S. (2008). *Estadística aplicada a los negocios y la economía* (13 ed.). México DF: McGraw-Hill.

- Liou, K. (2002). *An Introduction to Atmospheric Radiation*. San Diego: Academic Press.
- Mackern, M., Calori, A., Mateo, M., Camisay, M., Robín, A., & Barroso, F. (2016). *SIRGAS-CON una red geodésica utilizada en el monitoreo del vapor de agua troposférico*. Revista Jornadas de Investigación, 66.
- Manahan, S. (2004). *Primera Comunicación Nacional en Cambio Climático de Venezuela*. Caracas: Ministerio del Ambiente y los Recursos Naturales.
- Maorong, G., & Calais, E. (2002). *Sensitivity of zenith total delay accuracy to GPS orbit errors and implications for near-real-time GPS meteorology*. Journal of Geophysical Research, 107(D16,4315).
- Monjo, R. (2010). *El índice de la precipitación intensa*. Universidad de Vlencia , 1-2.
- Munnucci, A., Iijima, B., Lindqwister, U., Pi, X., Sparks, L., & Wilson, B. (1999). *GPS and ionosphere*. Oxford University Press, 625-665.
- Mussi, J. (2005). *Europa lanzó el primer satélite de navegación civil*.
- National Coordination Office. (2018, 05 23). *GPS.gov*. Retrieved from <https://www.gps.gov/systems/gps/modernization/civilsignals/>
- Navarrete, M. S. (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, D.C.* Bogotá, Colombia: Universidad Nacional de Colombia.

- Niell, A. E. (1996). *Global mapping functions for atmosphere delay at radio wavelengths*. Journal of geophysical research.
- Nieto, S. (2016). *Variación del Vapor de Agua en las estaciones BOGA y TUNA a través de observable GPS*. Bogotá: Universidad Distrital San Francisco de Caldas.
- Offiler, D. (2010). *Product Requirement Document*. Bruxelles: EUMETNET GNSS Water Vapour Programme (E-GVAP-II).
- Oke, T. (1978). *Boundary Layer Climates*. Londres: Methuen & Co.
- Organización Meteorológica Mundial. (2010). *Asociados en el tiempo clima, el clima y el agua para el desarrollo*. Ficha informativa 5, Ginebra.
- Paredes, M. (2013). *Procesamiento PPP de observaciones GNSS utilizando software libre RTKLIB*. Santiago de Chile: Universidad de Santiago de Chile.
- Pedroza , H., & Dicovsky, L. (2006). *Sistema de Análisis Estadístico con SPSS*. Managua: Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura.
- Pérez, C. (2001). *Técnicas estadísticas con SPP*. Madrid: Pearson Education.
- Pestana, A. (2015). *GPS Clock Corrections and Orbit Computations using RINEX 2.11 GPS Navigation Message Files*.
- Porras, L., Romero, R., Herrera, M., Amores, M., Estrella, C., Zabala, M., & Tierra, A. (2017). *Diferencias del contenido de vapor de agua en ciertas regiones del Ecuador entre*

productos satelitales y meteorológicas de la REGME. Revista Geociencias & Geodatos, 89-95.

Priego, E. (2012). *Análisis y predicción de lluvias intensas en la comunidad de Valencia basado en la estimación del contenido de vapor de agua atmosférico obtenido con técnicas GNSS*. Valencia: Universidad Politécnica de Valencia.

Rocken, C., Braun, J., Vanhove, T., Johnson, J., & Kuo, B. (2003). *Developments in Ground-Based GPS Meteorology*. University Corporation for Atmospheric Research (UCAR).

Rodríguez, M. (2000). *Coefficientes de Asociación*. Plaza y Valdes.

Rodríguez, R., Agueda, B., & Portela, A. (2004). *Meteorología y Climatología*. FECYT (Fundacion Española para la ciencia y la tecnología).

Romero, P., Cuevas, A., Ramos, R., Valdés, M., & 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*. España: Agencia Estatal de Meteorología.

Sakidin, H., Ahmad, A., & Bugis, I. (2014). *Modeling of GPS Tropospheric Delay Wet Neill Mapping Function (NMF)*. AIP Publishing, 350-354.

Sanz, J., Zornoza, J., & Hernández, M. (2013). *GNSS Data Processing* (Vol. 1). Netherlands: ESA Communications.

Seeber, G. (2003). *Satellite Geodesy*. Berlin: Walter de Gruyter.

- Shi, J., Gao, Y., Xu, C., & Guo, J. (2015). *Real-Time GPS Precise Point Positioning- Based Precipitable Water Vapor Estimation for Rainfall Monitoring and Forecasting*. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing.
- Spiegel, M., & Stephens, L. (2000). *Estadística* (3era ed.). Buenos Aires: McGraw-Hill.
- Takasu, T. (2013). *RTKLIB ver 2.4.2 Manual*. Japón.
- Tregoning, P., Boers, R., & Brien, D. (1998). *Accuracy of absolute precipitable water vapour estimates from GPS observations*. Journal of Geophysical Research, 28.701-28.710.
- Vallero. (2008). *Fundamentals of Air Pollution*. San Diego: Academic Press.
- Vallero, J., & Villén, N. (2013). *Fundamentos y aplicaciones en Geodesia y Topografía*. Valencia.
- Vázquez, B., Dorota, A., & Brzezinska, G. (2013). *GPS-PWV estimation and validation with radiosonde data and numerical weather prediction model in Antarctica*. GPS Solutions, 29-39.
- Viteri, A. (2013). *Estudio Metodológico para la elaboración de un modelo matemática de vapor de agua a partir de estaciones de monitoreo continuo GPS*. Sangolquí: Universidad de las Fuerzas Armadas- ESPE.
- Walpole, R., Myers, R., & Myers, S. (2012). *Probabilidad y estadística para ingeniería y ciencias*. México: Pearson Educación.

- Wang, H. (2009). *Comparison of the Goodness-of-Fit Tests: the Pearson Chi-square and Kolmogorov-Smirnov Tests*. Metering management journal, 6.
- Wells, D., Berck, N., Kaleusberg, A., Krakiwsky, E., Lachapelle, G., Langley, R., . . . Vanicek, P. (1986). *Guide to GPS Positioning*. Canadian GPS Associates.
- Wenyou, T. (2008). *Near Real-time GPS PPP-inferred Water Vapour System Development and Evaluation*. Calgary: University of Calgary.
- Yuan, Y. (2015). *Real-time Retrieval of Precipitable Water Vapour from GNSS Precise Point Positioning*. University. Australia.
- Yuga, D., & Yamada, T. (2013). *The Role of GPS Precipitable Water Vapour Atmosphere Stability Index in the Statistically Based Rainfall Estimation Using MTSAT Data*. Journal of Hydrometeorology, 14.
- Zumberge, J., Heflin, M., Jefferson, D., Watkins, M., & Webb, F. (1997). *Precise point positioning for the efficient and robust analysis of GPS data from large networks*. Journal of Geophysical Research, 102(B3), 5005-5017.