

**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA
SEDE QUITO**

**CARRERA:
INGENIERÍA AMBIENTAL**

**Trabajo de titulación previo a la obtención del título de:
INGENIERO AMBIENTAL**

**TEMA:
ANÁLISIS DE CAUSALIDAD ENTRE LOS INCREMENTOS DEL RETRASO
TROPOSFÉRICO DE LA SEÑAL GPS Y LAS PRECIPITACIONES LLUVIOSAS,
CASO DE ESTUDIO ANTISANA**

**AUTOR:
KENNY JOSÉ GUERRERO GUANÍN**

**DOCENTE TUTORA:
MARÍA SHEILA FABIOLA SERRANO VINCENTI**

Quito, marzo del 2021

CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR

Yo, Guerrero Guanín Kenny José, con documento de identificación N° 1715336416, manifiesto mi voluntad y cedo a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que soy autor del trabajo de titulación intitulado: **ANÁLISIS DE CAUSALIDAD ENTRE LOS INCREMENTOS DEL RETRASO TROPOSFÉRICO DE LA SEÑAL GPS Y LAS PRECIPITACIONES LLUVIOSAS, CASO DE ESTUDIO ANTISANA**, mismo que ha sido desarrollado para obtener el título de: INGENIERO AMBIENTAL, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En aplicación a lo determinado en la Ley de Propiedad Intelectual, en mi condición de autor me reservo los derechos morales de la obra antes citada. En concordancia, suscribo este documento en el momento que hago entrega del trabajo final en digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.



Kenny José Guerrero Guanín
C.I.: 171533641-6

Quito, marzo del 2021

DECLARATORIA DE COAUTORÍA DEL TUTOR

Yo declaro que bajo mi dirección y asesoría fue desarrollado el trabajo experimental, **ANÁLISIS DE CAUSALIDAD ENTRE LOS INCREMENTOS DEL RETRASO TROPOSFÉRICO DE LA SEÑAL GPS Y LAS PRECIPITACIONES LLUVIOSAS, CASO DE ESTUDIO ANTISANA**, realizado por Kenny José Guerrero Guanín, obteniendo un producto que cumple con todos los requisitos estipulados por la Universidad Politécnica Salesiana, para ser considerado como trabajo final de titulación.

Quito, marzo 2021



María Sheila Fabiola Serrano Vincenti
C.I.: 171026757-4

DEDICATORIA

A mis padres Segundo Guerrero y Vilma Guanín ya que gracias a su apoyo y sus consejos siempre he salido adelante ante toda circunstancias por más difícil que se presente han estado para darme su confianza y apoyo incondicional y saber guiar por el camino correcto de esta manera poder cumplir mis metas.

A mis hermanos los cuales me han dado ánimos para continuar en todo lo que me proponga realizar y de esta forma ser un ejemplo de superación para que se sientan orgullosos de mí y saber que cuento con su apoyo y consejos.

De igual manera a mi familia que ha estado siempre pendiente de los logros que pueda alcanzar ya que me inculcado que la unión familiar es un lazo muy fuerte y que unidos se puede salir adelante, además de llenar de grandes valores morales y éticos.

Dios, que me ha llenado de sus bendiciones y me ha dado la fuerza para continuar avanzando en las metas que me proponga alcanzar ya que siempre astado a mi lado dando el valor necesario de surgir en mis anhelos de superación le dedico este logro académico doy gracias por todas sus bendiciones.

AGRADECIMIENTO

Un agradecimiento muy especial a la prestigiosa Universidad Politécnica Salesiana, por acogerme y formarme como un buen profesional para así poder servir y aportar a la sociedad.

También agradezco a la carrera de Ingeniería Ambiental, carrera la cual me ha enseñado a valorar aún más la vida el medio ambiente y el entorno que nos rodea, de igual manera a los docentes quienes me han inculcado sus conocimientos tanto en el ámbito científico y valores de respeto tanto morales como éticos.

A todas las Instituciones que me han brindado las facilidades para poder llevar a cabo la realización de este trabajo experimental, ayudándome y facilitándome con la información necesaria.

Un agradecimiento muy especial a mi tutora María Sheila Fabiola Serrano Vincenti, quien me ayudado con sus conocimientos para la elaboración de este trabajo experimental ya que sus consejos y guías han sido de gran aporte y ayuda.

ÍNDICE GENERAL

1. INTRODUCCIÓN	1
2. OBJETIVOS	3
2.1 Objetivo General.....	3
2.2 Objetivos Específicos	3
3. MARCO TEÓRICO.....	4
3.1 La Atmósfera	4
3.1.1 Tropósfera	6
3.2 Variables Atmosféricas en la Superficie.....	6
3.2.1 Temperatura	6
3.2.2 Presión Atmosférica	7
3.2.3 Humedad	7
3.2.4 Precipitación.....	8
3.3 Sistemas de Posicionamiento Global	11
3.3.1 La Señal GPS	13
3.4 Efectos de la Tropósfera en Señal del Sistema de Posicionamiento Global	

3.4.1	Ventajas de la Estimación de Vapor de Agua Utilizando Sistemas GPS	16
3.5	Software GAMIT	18
3.5.1	Generalidades	18
3.5.2	Refracción Troposférica.....	20
3.5.3	Funciones de Mapeo Troposférico.....	21
4.	MATERIALES Y MÉTODOS	22
4.1	Descripción del Área de Estudio.....	22
4.2	Ubicación Geográfica	23
4.3	Métodos	24
4.4	Datos y Equipos	25
4.4.1	Cálculo de la Humedad Específica.....	26
4.4.2	Control de Calidad	27
4.4.3	Homogenización de la Resolución de la Data.....	30
4.4.4	Análisis de la Climatología	30
4.4.5	Cálculo del Retraso Troposférico ZTD.....	30
4.4.6	Análisis de las Variables Meteorológicas y el ZTD.....	31
4.4.7	Análisis por Evento.	31
5.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	32

5.1	Climatología en el Antisana.....	32
5.1.1	Análisis del Ciclo Diurno.....	33
5.1.2	Análisis del Ciclo Estacional.....	36
5.1.3	Análisis del Ciclo Interanual.....	38
5.2	Relación Entre las Variables Meteorológicas y ZTD.....	40
5.2.1	Análisis del Ciclo Diurno del ZTD.....	42
5.2.2	Análisis del Ciclo Estacional del ZTD.....	44
5.3	Análisis de Eventos Extremos y su Relación con ZTD.....	45
5.3.1	Evento 1.....	46
5.3.2	Evento 2.....	47
5.3.3	Evento 3.....	48
5.3.4	Evento 4.....	49
6.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	51
6.1	Conclusiones.....	51
6.1.1	Climatología del Antisana.....	51
6.1.2	Relaciones Climáticas con el ZTD.....	52
6.2	Recomendaciones.....	54
7.	BIBLIOGRAFÍA.....	55
8.	ANEXOS.....	59

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Materiales y equipos utilizados.....	18
Tabla 2 Parametros estudiados.....	21
Tabla 3 Datos y equipos y software utilizados.....	26
Tabla 4 Parametros e instrumentos de medicion de la estacion ORE.....	25
Tabla 5 Valores promedio de la estacion ORE	31

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Composición de la atmósfera.....	4
Figura 2 Variación de la temperatura con la altitud.....	5
Figura 3 Ciclo del agua – Precipitación	9
Figura 4 Pluviómetro	10
Figura 5 Pluviómetro de báscula.....	10
Figura 6 Constelación GPS	11
Figura 7 Segmento de Control GPS	12
Figura 8 Principio de funcionamiento del sistema GPS.....	14
Figura 9 Representación de la señal de GPS y la trayectoria.....	16
Figura 10 Ubicación Estaciones ASEC y ORE	24
Figura 11 Análisis interanual de la estación ORE antes del control de calidad.....	28
Figura 12 Análisis interanual de la estación ORE después del control de calidad	29
Figura 13 Análisis diario de la estación ORE del 2005 al 2018	33
Figura 14 Análisis estacional de la estación ORE.	36
Figura 15 Análisis interanual de las variables meteorológicas de la estación ORE ..	38
Figura 16 Eventos de lluvia más grandes, Antisana 2014	41
Figura 17 Análisis diario del ZTD de la estación ASEC	42
Figura 18 Análisis estacional del ZTD de la estación ASEC	44
Figura 19 Evento de lluvia, 2014-10-11, las partes vacías indican ausencia de datos.	46

Figura 20 Evento de lluvia, 2014-06-10	47
Figura 21 Evento de lluvia, 2014-10-30	48
Figura 22 Evento de lluvia, 2014-06-10	49

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo 1 Software RStudio	59
Anexo 2 Arc GIS 10.5.....	60
Anexo 3 Red de Estaciones Automáticas.....	59
Anexo 4 Red del Instituto Geofísico de la Escuela Politécnica Nacional.....	59
Anexo 5 Base de Datos de los Receptores GPS (Plataforma Virtual UNAVCO).....	59

RESUMEN

El objetivo del presente trabajo experimental fue analizar la causalidad entre los incrementos registrados del retraso troposférico de la señal del Sistema de Posicionamiento Global (GPS) de la Red del Instituto Geofísico de la Escuela Politécnica Nacional (IG-EPN), con valores de precipitación registrados en la zona del Antisana. Se realizó un análisis de causalidad entre los incrementos del retraso troposférico ZTD (Zenith Total Delay) de la señal GPS y las precipitaciones lluviosas en la zona del Antisana, con lo cual se definió la data a relacionarse en función de las correspondencias espaciales y temporales de la zona. La presente climatología se construyó con datos de 14 años con las siguientes variables atmosféricas: lluvia, temperatura, humedad relativa, velocidad del viento y humedad específica del año 2005 al 2018. Para relacionar las variables climáticas con el ZTD, se trabajó únicamente con el año 2014. Ya que es este año el que presentaba los cálculos de ZTD. Se analizaron las series de ZTD calculadas en el Instituto de Investigación para el Desarrollo de Francia (IRD) conjuntamente con la Universidad Politécnica Salesiana, y los valores de precipitación registrados en la zona, con el software RStudio. Se encontró una correspondencia entre los valores de ZTD y precipitación a nivel mensual, que indica un comportamiento proporcional entre la lluvia y ZTD; mientras que a nivel horario se registra un pico de ZTD previo al pico de lluvia de 3 horas que se puede dispersar hasta 18 horas, lo que muestra la capacidad predictiva de esta variable en detectar eventos significativos de lluvia intensa.

PALABRAS CLAVES: Retraso troposférico, GPS, lluvia intensa

ABSTRACT

The objective of the present experimental work was to analyze the causality between the recorded increases of the tropospheric delay of the signal of the Global Positioning System (GPS) of the Geophysical Institute Network of the National Polytechnic School (IG-EPN), with registered precipitation values in the Antisana area. A causality analysis was carried out between the increases in the tropospheric delay ZTD (Zenith Total Delay) of the GPS signal and the rainfall in the Antisana area, with which the data to be related was defined based on the spatial and temporal correspondences of the area. The present climatology was constructed with 14-year data with the following atmospheric variables: rain, temperature, relative humidity, wind speed and specific humidity from 2005 to 2018. To relate the climatic variables with the ZTD, we worked only with the year 2014. Since it is this year that presented the ZTD calculations. The ZTD series calculated at the Research Institute for Development -France (IRD) in conjunction with the Salesian Polytechnic University, and the precipitation values recorded in the area analyzed, with RStudio software. A correspondence was found between the values of ZTD and precipitation at the monthly level, which indicates a proportional behavior between the rain and ZTD, while at the hourly level a peak of ZTD prior to the 3-hour rain peak that can be dispersed up to 18 hours, which shows the predictive capacity of this variable in detecting significant heavy rain events.

KEYWORDS: Tropospheric delay, GPS, intense rainfall

1. INTRODUCCIÓN

La tropósfera es la capa más cercana a la superficie terrestre donde se producen todos los fenómenos meteorológicos que influyen en el desarrollo de los seres vivos (Suárez, 2009). Además, de la importancia del vapor de agua en la atmósfera que debe ser monitoreado constantemente, involucrando variables atmosféricas como temperatura y presión presentes en el aire. Varias investigaciones indican que existe una causalidad entre los picos que se presentan del retraso troposférico y la precipitación lluviosa intensa (Cioce et al., 2017). Varios estudios han mostrado la relación entre el vapor de agua y la lluvia intensa (Sapucci, 2018 ; Brenot, 2014); sin embargo la medición de vapor de agua sobre tierra tiene dificultades y suele ser un proceso costoso. Es por esto, se propone la utilización de los Sistemas de Posicionamiento Global (GPS), debido a la gran precisión de estos equipos, que posibilitan detectar retrasos en la señal, que están relacionados con la presencia de variables meteorológicas (Fiallas, 2002).

El retraso troposférico total ZTD (por sus siglas en inglés Zenit Total Delay), de estas señales GPS está relacionado con los componentes hidrostática y componente húmeda. La parte del componente hidrostático es determinado por los gases inertes presentes en la atmósfera con el 90% del retraso troposférico total; por otra parte, el componente húmedo hace referencia a la cantidad de vapor de agua que se encuentra en el recorrido de la señal emitida por el GPS (Nieto, 2016).

El presente trabajo experimental tiene como objetivo general analizar la causalidad entre los incrementos registrados del retraso troposférico de la señal del Sistema de Posicionamiento Global (GPS) de la Red del Instituto Geofísico de la Escuela Politécnica Nacional (IG-EPN), calculado por Andrea Walpersdorf el IRD y Sheila Serrano UPS (Universidad Politécnica Salesiana); siendo éstos datos de entrada para la presente investigación, y su relación con los valores de precipitación registrados en la zona del Antisana.

Con el objetivo de conocer la base climatológica, las variables que se toman en cuenta son precipitación, temperatura, vapor de agua y presión atmosférica proporcionados por el INAMHI (Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología) e IRD (Instituto de Investigación para el Desarrollo), el cual está constituido por receptores de señal GPS que operan de forma constante.

Con los datos obtenidos, se analiza el incremento del retraso troposférico mediante meteorología GPS del (IG – EPN) y estaciones meteorológicas en la zona del Antisana, tanto a nivel horario como mensual.

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivo General

- Analizar la causalidad entre los incrementos registrados del retraso troposférico de la señal del Sistema de Geoposicionamiento Global (GPS) de la Red del Instituto Geofísico de la Escuela Politécnica Nacional IG-EPN, con valores de precipitación registrados en la zona del Antisana

2.2 Objetivos Específicos

- Definir la data a relacionarse en función de las correspondencias espaciales y temporales.
- Describir la Geografía y Climatología de la zona de estudio elegida.
- Analizar las series de retraso troposférico calculadas en el IRD, y los valores de precipitación registrados, en software R.

3. MARCO TEÓRICO

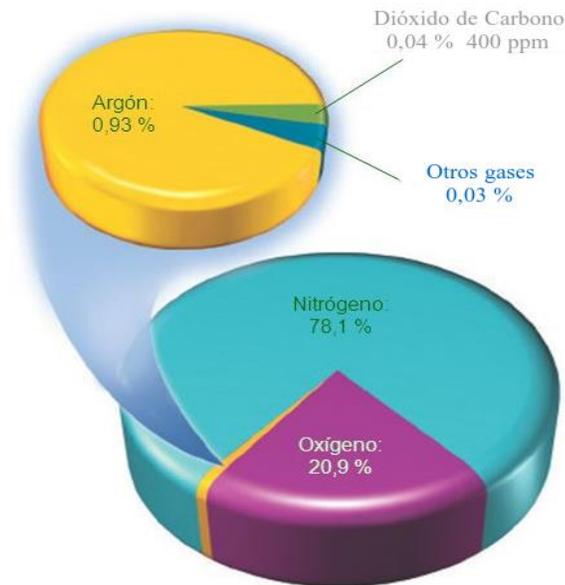
3.1 La Atmósfera

La atmósfera es la capa de gases que rodea la Tierra, siendo el componente fundamental para la vida del ser humano. Además, actúa como regulador climático, porque en ella se generan los principales fenómenos climáticos y meteorológicos que se producen en el planeta (Nieto, 2016).

La atmósfera está constituida por los siguientes gases: 78.08% de nitrógeno y 20.95% de oxígeno. Además de otros gases en pequeñas proporciones como líquidos (vapor de agua) y sólidos (polvo, polen, microorganismos y cristales de hielo).

Figura 1

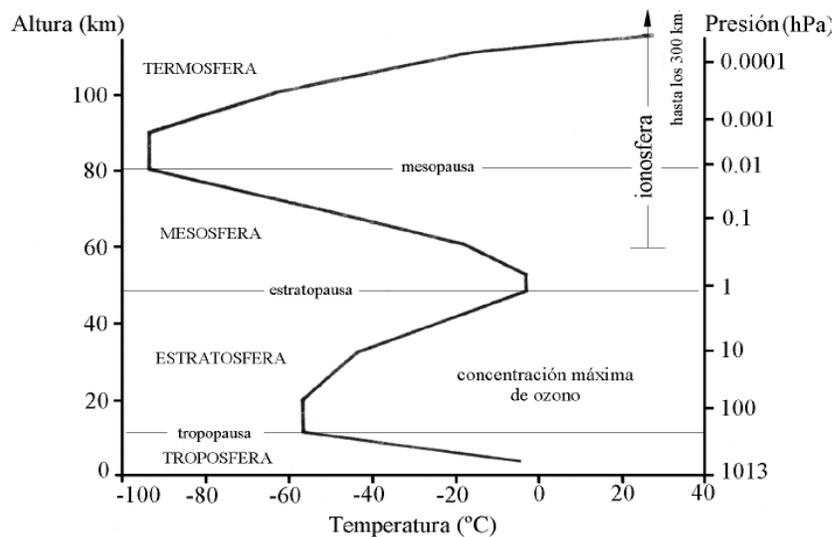
Composición de la atmósfera



Nota: Tomado de Ecos del Futuro (2017)

De acuerdo con Nieto (2016) describe que la capa gaseosa por efecto de la fuerza de gravedad es más densa sobre la superficie terrestre y a medida que la altura va aumentando decrece su densidad, fenómeno que se cumple igualmente con la presión la cual decrece con la altura. A su vez, el incremento de la temperatura cambia con la altura, debido a la absorción del ozono de la radiación ultravioleta (Ver Figura 2).

Figura 2
Variación de la temperatura con la altitud



Nota: Tomado de Nieto (2016)

Esta capa atmosférica está distribuida de la siguiente manera:

1. Tropósfera: la capa más cercana a la superficie (<10-15 km).
2. Estratosfera: donde se genera el ozono atmosférico (10-50 km).
3. Mesosfera: se produce la desintegración de los meteoritos (50-80 km).
4. Termósfera o ionósfera: se produce la absorción de las radiaciones solares (>80 km).

3.1.1 Tropósfera

La tropósfera es la capa que se encuentra en contacto directo con la superficie terrestre, tiene una altura máxima de 15 km y en ella se producen los fenómenos meteorológicos que influyen en el desarrollo de la humanidad. La tropósfera posee un espesor de aproximadamente 12 km. Además, “es un regular térmico del planeta; sin él, las diferencias de temperatura ente el día y la noche serían tan grandes que no se podría sobrevivir” (Sapucci y Machado, 2006).

3.2 Variables Atmosféricas en la Superficie

Se debe tomar en cuenta lo siguiente: de no existir valores de presión, temperatura y vapor de agua en la superficie, se debe emplear las fórmulas empíricas desarrolladas en condiciones atmosféricas normales (Suárez, 2009). A continuación, se describirán los principales comportamientos de las variables meteorológicas utilizadas en este estudio.

3.2.1 Temperatura

En la tropósfera la temperatura es una relación inversamente proporcional a la altitud. Siendo así que esta variable no es constante en todas zonas geográficas del planeta, existiendo variaciones de longitud y latitud. La unidad de medida de la temperatura se mide en gados centígrados - °C.

La temperatura en términos de la termodinámica es la cantidad de calor desprendido por un cuerpo; a su vez, este calor puede ser transmitido de cuerpos con mayor temperatura a otros de menor temperatura (Andrades, 2012).

3.2.2 Presión Atmosférica

En la tropósfera el aire que nos rodea es inapreciable, pero este ejerce una fuerza los cuerpos debido a la gravedad. Esta fuerza por unidad de superficie es llamada presión atmosférica, medida en hectopascales (hPa). La presión atmosférica es inversamente proporcional a la altitud (Albán, 2018).

3.2.3 Humedad

La cantidad es la cantidad de vapor de agua en el aire. De esta manera, el aire a temperatura ambiental puede contener una cierta cantidad de vapor de agua; cuando alcanza el límite, se deduce que el aire está saturado de humedad. Si sobre pasa el límite, el exceso de vapor se condensa (Meruane y Garreaud, 2015).

3.2.3.1 Humedad Relativa

La humedad relativa es la relación que existe entre el vapor de agua real en el aire con la cantidad de vapor de agua necesaria para la saturación a la temperatura correspondiente, se mide en porcentajes (%) entre 0 y 100, siendo 0 el aire seco y 100 el aire saturado.

3.2.3.2 Humedad Específica

La humedad específica es la cantidad de vapor de agua contenida en una masa de aire húmedo (mezcla de aire seco y vapor de agua), sus unidades son de gramos de vapor/kilogramo de aire seco (Garreaud y Meruane, 2015).

3.2.3.3 Vapor de Agua Precipitable

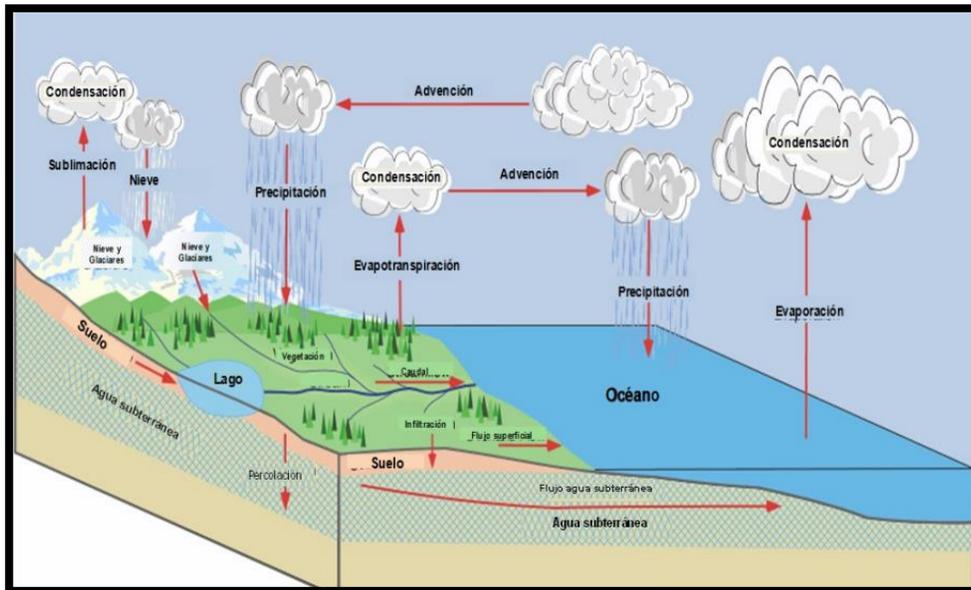
El vapor de agua precipitable (W), es la cantidad de vapor de agua entre la superficie terrestre y la parte superior de la atmósfera. Siendo un parámetro muy importante en estudios de hidrología y modelos de radiación, su unidad correspondiente es masa por unidad de área y es así que 1mm de la capa corresponde a 1 kg/m². La medida de vapor de agua precipitable tiene una correlación con distintos parámetros meteorológicos como es la humedad específica humedad relativa y la temperatura. (Martinez, 2011)

3.2.4 Precipitación

La precipitación involucra a una masa de aire que sube y se enfría, lo cual se conoce como el proceso de condensación generando gotas de agua y pequeños cristales de hielo, los cuales irán creciendo o se unirán hasta alcanzar un tamaño suficiente dando lugar a la precipitación.

Figura 3

Ciclo del agua – Precipitación



Nota: Tomado de Ordoñez (2011)

La lluvia utiliza equipos de medición como pluviómetros, este instrumento sirve para medir la cantidad de lluvia caída en un intervalo de tiempo determinado (Garreaud y Meruane, 2015). En su interior posee un vaso cilíndrico en donde se dispone una probeta graduada para realizar la medición en milímetro o litros por metro cuadrado.

Figura 4

Pluviómetro



Nota: Tomado de Garreaud y Meruane (2005)

Figura 5

Pluviómetro de báscula



Nota: Tomado de Garreaud y Meruane (2005)

3.3 Sistemas de Posicionamiento Global

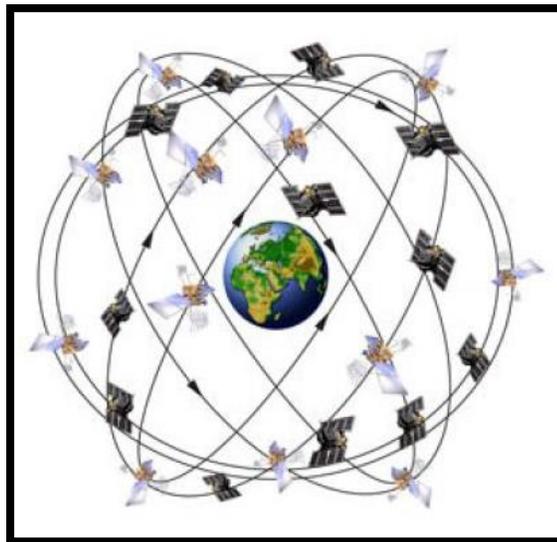
El Sistema de Posicionamiento Global – GPS, es un sistema implementado para la localización precisa de posición, velocidad y tiempo; los datos obtenidos son determinados mediante la triangulación de la altitud, longitud y latitud de un objeto sobre la superficie terrestre (Pozo y Sandoval, 2016).

El sistema GPS, está conformado por tres segmentos básicos:

- 1) Segmento espacio, formado por 24 satélites GPS con una órbita de 26560 km de radio y un periodo de 12 horas. Este segmento se compone de satélites de navegación y comunicación que orbitan alrededor del planeta (Nieto, 2016).

Figura 6

Constelación GPS



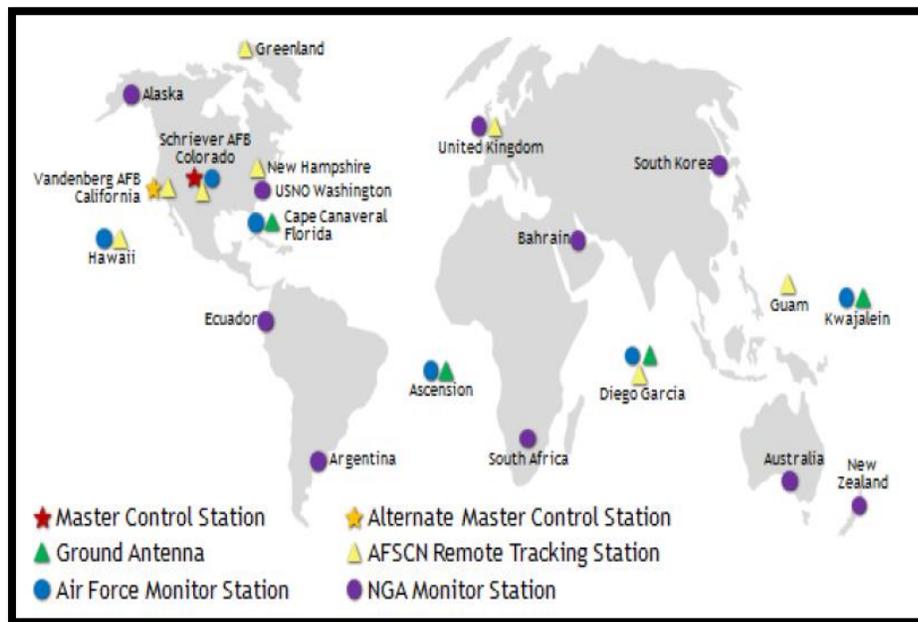
Nota: Tomado de Nieto (2016)

2) Segmento control: consta de 5 estaciones monitoras encargadas de mantener en órbita los satélites y supervisar su correcto funcionamiento, 3 antenas terrestres que envían a los satélites las señales que se debe transmitir y una estación experta de supervisión de todas las operaciones (Pozo y Sandoval, 2016).

La estación de control principal se encarga de determinar la localización exacta de los satélites, a partir de las estaciones monitoreo que son aquellas que reciben la información atmosférica. La estación de control principal se encuentra instalada en el Estado de Colorado (USA), y la estación de control maestra suplente se encuentra ubicada en Estado de California (USA).

Figura 7

Segmento de Control GPS



Nota: Tomado de Nieto (2016)

- 3) Segmento usuario: formado por las antenas y receptores en la superficie terrestre, quienes reciben los mensajes provenientes de cada satélite.

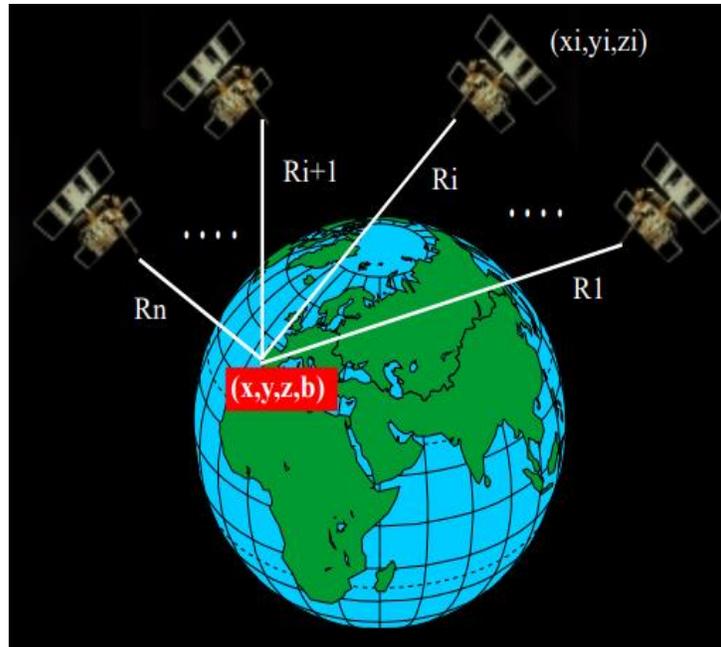
3.3.1 La Señal GPS

La señal GPS en su camino entre el satélite y el receptor sufre una serie de adversidades por las variables atmosféricas como presión atmosférica, temperatura y la humedad atmosférica, lo cual genera un retraso en la transmisión de las señales por la presencia de la ionósfera. Este retraso es empleado para la determinación del vapor de agua precipitable (Nieto, 2016).

La principal función del sistema GPS es calcular la posición o localización de un objeto en un espacio de coordenadas (x, y, z) , mediante el cálculo de la distancia de un objeto a un mínimo de tres satélites (Pozo y Sandoval, 2016). La distancia entre el receptor y un satélite se mide multiplicando el tiempo de vuelo de la señal emitida desde el satélite por su velocidad de propagación (Ver Figura 8) y Ecuación (1).

Figura 8

Principio de funcionamiento del sistema GPS



Nota: Tomado de Sandoval (2016)

$$R_i = \sqrt{(x_i - x)^2 + (y_i - y)^2 + (z_i - z)^2} \quad (1)$$

Donde:

- R_i = Pseudodistancia
- (x_i, y_i, z_i) = posición conocida de los satélites

Para el cálculo de la pseudodistancia se pone en conocimiento que la señal de GPS emitidas por los satélites es muy débil, lo cual produce un ruido natural formado por pulsos aleatorios. Estos pulsos generan el código pseudo-aleatorio emitido por el receptor GPS, cada

instante un satélite emite una señal con el mismo patrón que la serie pseudo-aleatoria. En base a estos códigos, el receptor calcula la distancia en un desplazamiento temporal (Pozo y Sandoval, 2016).

El tiempo de vuelo de la señal de radio se debe mantener sincronizados los relojes de los satélites y los receptores con el fin de generar el mismo código simultáneamente. Se denominan pseudodistancias a las distancias que se generan por error del sincronismo (Pozo y Sandoval, 2016).

3.4 Efectos de la Tropósfera en Señal del Sistema de Posicionamiento Global

La aplicación de las ondas electromagnéticas para establecer los efectos que ha sufrido la superficie terrestre en el medio troposférico, se denomina retraso que sufre la señal de GPS al traspasar la troposfera (Suárez, 2009).

El retraso troposférico es producido por la variación en el índice (n) de los gases atmosféricos en relación con el espacio libre. De acuerdo con lo mencionado: “(n) es la relación entre la velocidad de las ondas en el vacío subíndice y la velocidad de la onda electromagnética en un medio cualquiera (v)” (Sapucci y Machado, 2006), demostrado de la siguiente forma:

$$n = \frac{c}{v} \quad (2)$$

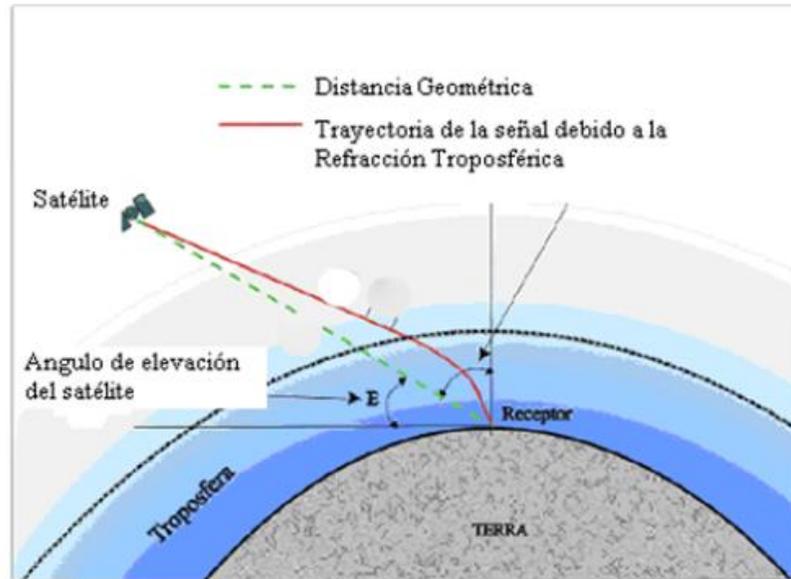
Donde:

- c : Velocidad de una onda en el vacío
- v : Velocidad de la onda electromagnética en un medio cualquiera

Por lo tanto, debido a la variación o retraso que sufre la señal de GPS se forma una curvatura, entre un satélite y su receptor (Suárez, 2009).

Figura 9

Representación de la señal de GPS y la trayectoria



Nota: Tomado de Sapucci y Machado 2006

3.4.1 Ventajas de la Estimación de Vapor de Agua Utilizando Sistemas GPS

Las mediciones atmosféricas mediante GPS han mostrado su eficiencia y exactitud al ser comparadas con los datos de estaciones meteorológicas y satelitales, inclusive, muestran la capacidad de mejorar con datos de entrada más exactos a los modelos numéricos de predicción en el tiempo. Además de poseer ventajas ya que son menos costosas que otros instrumentos de medición, funciona en todas las condiciones climáticas, obtención de datos con mejor resolución, son fáciles de manipular y transportar ya que son equipos portátiles, se puede obtener datos en tiempo real, es decir están disponibles en el momento de realizar la medición. (Brenot, 2014)

Sin embargo, también se tienen ciertas desventajas que incluyen la necesidad de tener una red de datos GPS lo suficientemente densa y funcional y la necesidad de recursos computacionales de alto rendimiento HPC (High Performance Computing Systems).

De esta manera, la medición de humedad atmosférica a través del retraso troposférico GPS (retraso zenital total: ZTD) posee varias ventajas sobre las mediciones meteorológicas tradicionales, adicionalmente, estas mediciones se realizan a costos bajos. Para determinar el retraso troposférico se requiere del análisis de los datos casi en tiempo real, determinados por la descarga de datos por hora, posterior al procesamiento optimizado en el tiempo para proporcionar parámetros troposféricos con una latencia de 1h.

Las variables troposféricas de GPS se deducen por el desplazamiento de la serie temporal de coordenadas. La temporización es evaluada mediante la combinación de una red local densa. La red de estimaciones de parámetros troposféricos y la red regional se producen en efecto con un número limitado de errores en el posicionamiento vertical; por lo tanto, permite evaluar la incertidumbre de acuerdo con tres parámetros troposféricos asociados. (Mancebo, 1999)

Debido a esta relación entre ZTD y vapor de agua precipitable, y la relación entre este último y la precipitación lluviosa; es que se sugiere una relación transitiva entre el ZTD y la precipitación lluviosa, misma que se analizará en el presente estudio.

3.5 Software GAMIT

3.5.1 Generalidades

El software GAMIT es un sistema que permite el análisis de datos GPS fue desarrollado en el Instituto de Tecnología de Massachusetts (MIT). Este software se emplea para la estimación de coordenadas de la estación, velocidades, retrasos atmosféricos, órbitas de satélites y parámetros de orientación de la Tierra (Moreno, 2015).

GAMIT es un programa que sirve para el análisis de datos desde que el satélite emite la señal y de pseudodistancias para estimar posiciones relativas tridimensionales de las estaciones terrestres (x, y, z), órbitas de los satélites y retrasos cenitales atmosféricos.

Este programa se basa en una serie de algoritmos de mínimos cuadrados para interpretar la posición relativa de las estaciones atmosféricas, parámetros orbitales y rotación de la Tierra y retrasos cenitales. Debido a que es un modelo matemático se relacionan las observaciones y parámetros dando como resultados dos soluciones, la primera es crear coordenadas dentro de un área más precisa, y el segundo es generar estimaciones finales (Moreno, 2015). Los datos de entrada utilizados en GAMIT, son aquellos en formato rinex cuyo formato está estandarizado y se encuentra libremente en UNAVCO. Los componentes fundamentales de GAMIT son funciones de preparación de los datos para su procesamiento makexp y makex estos determinan las estaciones que van a ser incluidas para poder generar el archivo X-File, este archivo se mantiene en un mismo intervalo de tiempo a todos los archivos rinex de observación a considerarse en el procesamiento de datos, generación de los valores órbita, los valores del tiempo y ubicación interpolación de los valores atmosféricos y

derivadas parciales de un modelo geométrico, la detección de valores atípicos o roturas de datos.

Es necesario indicar, que el cálculo con GAMIT no fue echo en el marco de esta tesis los datos de entrada fueron proporcionados por la Doctora Andrea Walpersdorf en colaboración Física María Sheila Serano Vincenti, los cálculos se desarrollaron en el HPC de la Universidad de Grenoble, en Francia, CIMENT. A continuación, se realizará una breve descripción del método utilizado en GAMIT.

Tabla 1

Materiales y equipos utilizados

MATERIALES	EQUIPOS Y SOFTWARE
Datos receptores GPS IG-EPN:	GAMIT
➤ Equipo: Doble frecuencia	HPC, CIMENT
➤ Modelos: Trimble NetRS, NetR8 Y NetR9	

Nota: Elaborado por Guerrero (2021)

Los datos rinex, se obtuvieron de la página de UNAVCO que es la plataforma que recoge los datos de la Red de GPS del Instituto de la Escuela Politécnica Nacional cuyos sensores son descritos en la Tabla 1, para el funcionamiento del software Gamit – Globk, se requiere el sistema operativo UNIX. El procesamiento de datos en el programa necesita la configuración de tablas en las cuales se incluyen parámetros y modeladores que establezcan

la precisión de las coordenadas. El software sigue una serie de procesos para determinar la ubicación de las estaciones, al ejecutar el comando (Viteri, 2013):

$$\gg \text{sh}_{\text{gamit}} - \text{expt NAM} - \text{s yyyy } ddd_{(\text{inicial})} ddd_{(\text{final})} \quad (3)$$

Donde:

- NAM: nombre del proyecto
- yyyy: año al que corresponde
- $ddd_{(\text{inicial})}$: día inicial del procesamiento
- $ddd_{(\text{final})}$: día final del procesamiento

3.5.2 Refracción Troposférica

El posicionamiento geodésico utilizando GPS es afectado por la presencia de dos componentes principales de la tropósfera las cuales en conjunto retardan la señal GPS, es así que la primera es la componente hidrostática que es causada principalmente por el nitrógeno y el oxígeno y la segunda componente que es la humedad dada por la influencia del vapor de agua el cual representa un 10% del total del efecto troposférico.

La refracción troposférica depende de dos componentes el uno que es el retardo cenital hidrostático y el otro es el retado cenital húmedo también conocido como ZTD

$$ZTD = ZHD \times m(\varepsilon) + ZWD \times m(\varepsilon)$$

En donde, ZHD y ZWD simbolizan el retardo de las componentes hidrostática y la humedad, relacionada cada una con su función de mapeo m para cualquier ángulo de elevación ε .

3.5.3 *Funciones de Mapeo Troposférico*

Existen algunas metodologías para calcular la función de mapeo para cada una de las componentes de la tropósfera, la hidrostática y la húmeda la diferencia entre muchas de ellas está basada en la cantidad de parámetros meteorológicos, como son la temperatura, la presión atmosférica, la humedad específica, humedad relativa y otros parámetros.

Las funciones de mapeo actúan como un factor de corrección para el cálculo del retardo troposférico y es así que el retardo producido en la troposfera va aumentando a medida que disminuye el ángulo de elevación del satélite además las funciones de mapeo dependerán directamente del ángulo de elevación. Las funciones de mapeo que se utiliza para el cálculo de ZTD con GAMIT son:

- Función de mapeo de Lanyi
- Función de mapeo de Niell (NMF)
- Función de mapeo de Vienna (VMFI)
- Función de mapeo global (GMF)

4. MATERIALES Y MÉTODOS

4.1 Descripción del Área de Estudio

El presente apartado detalla el área de estudio, descripción geográfica, climatológica y factores que influyen en dicha investigación.

Las estaciones utilizadas en esta investigación se presentan en la Tabla 2:

Tabla 2

Parámetros estudiados

ESTACIÓN		ASEC	ORE
COORDENADAS	ESTE	814980.8	816853.5
	NORTE	9944965.8	9947554.7
m.s.n.m		4571.1	4859.0
PERÍODO		2014	2005-2018
RESOLUCIÓN TEMPORAL		1 h	30 min
VARIABLES ATMOSFÉRICAS		Retraso troposférico	Precipitación Humedad relativa Temperatura Velocidad del viento Humedad específica

Nota: Elaborado por Guerrero (2021)

4.2 Ubicación Geográfica

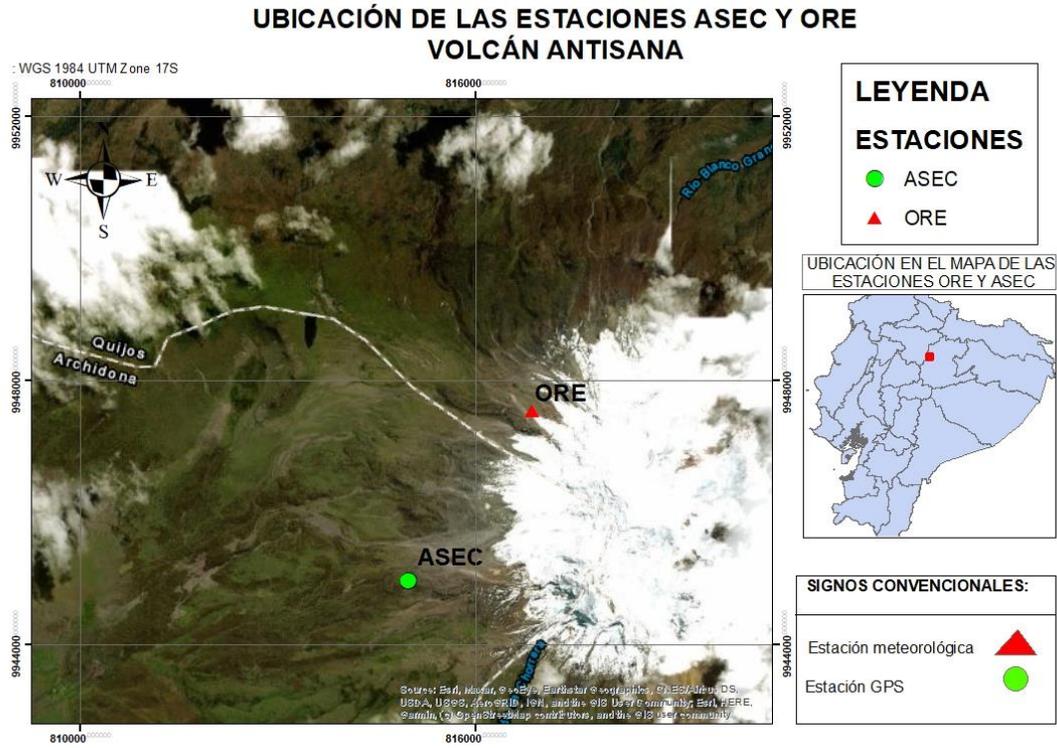
Las dos estaciones de estudio, se encuentra localizada en Ecuador, Provincia de Napo, cercanas al volcán Antisana. Su ubicación geográfica caracteriza al sector con un clima frío de alta montaña y vegetación arbustiva, presentando temperaturas de 4 a 8°C (Díaz, 2018).

La estación ORE, se ubica en la morrena NE del glaciar a una altura de 4859 m.s.n.m, se encuentra monitoreando al volcán Antisana desde el 21 de diciembre del 2004 (Díaz, 2018) (Ver Figura 10). Esta estación almacena datos de viento, temperatura, precipitación, humedad relativa y radiación de onda corta y onda larga; sin embargo, en esta investigación sólo se estudiará temperatura, velocidad del viento, precipitación y humedad específica y humedad relativa.

Mediante, el software ArcGIS 10.5 se identificó la ubicación geográfica de la estación GPS – ASEC y estación meteorológica – ORE, ubicadas en provincia de Napo, tal como se muestra en la figura 10.

Figura 10

Ubicación Estaciones ASEC y ORE



Nota: Adaptado de Sandoval (2016)

4.3 Métodos

A continuación, se describirá la metodología aplicada para analizar la causalidad entre los incrementos registrados del retraso troposférico de la señal del GPS de la Red del Instituto Geofísico de la Escuela Politécnica Nacional IG-EPN, con valores de precipitación registrados en la zona del Antisana.

4.4 Datos y Equipos

En la Tabla 3 se presentan los datos además de los equipos y software utilizados.

Tabla 3

Datos y equipos y software utilizados

Datos	Equipos y Software
➤ Datos de ZTD, calculados de la estación ASEC	Software de Sistema de Información Geográfica – ArcGIS
➤ Datos estaciones meteorológicas INAMHI, de la estación ORE	Microsoft Excel Software R

Nota: Elaborado por Guerrero (2021)

La precisión de cada una de las variables de los datos receptores GPS de la estación ORE, se detallan en la Tabla 4:

Tabla 4

Parámetros e instrumentos de medición en la estación ORE

Variable, unidad	Tipo de sensor (altura de medida m)	Precisión dada por el fabricante
Precipitación, mm	Géonor T-200B, (1.83m)	±0.1 mm
Precipitación, mm	Davis Rain Collector II (1.4 m)	±0.2 mm
Precipitación, cm	Pluviómetro Totalizador, (1.31m)	
Temperatura del aire, °C	Vaisala HPM45C – ventilada, (1.6m)	±0.2 °C
Temperatura del aire, °C	Pt100 – no ventilada, (1.7m)	±0.5 °C
Humedad relativa, %	Vaisala HPM45C – ventilada, (1.6m)	±2% sobre [0 – 90%]
Velocidad del viento, ms⁻¹	Young 05103, (2.17m)	±0.3 ms ⁻¹
Dirección del viento, grados	Young 05103, (2.17m)	±3 deg
Radiación onda corta incidentes y reflejadas, Wm⁻²	Kipp&Zonen CM3 0.305<1<2.8 μm, (1m)	±10% sobre la suma diaria
Radiación onda larga incidentes y emitidas por la superficie, Wm⁻²	Kipp&Zonen CG3 5<1<50 μm, (1m)	±10% sobre la suma diaria
Temperatura del suelo, °C	Termocuplas Cu-Cst, (-3, -10, -30cm)	±0.2 °C
Flujo de calor del suelo, Wm⁻²	Hukse flux HPF01, (-3cm)	60 V/ μWm ⁻²
Acumulación/Ablación, mm	Sonda de ultrasonidos SR50, (1.31m)	±1 cm

Nota: Tomado de Maisincho (2021)

4.4.1 Cálculo de la Humedad Específica

Debido a que la humedad relativa no es una variable independiente de la cantidad de vapor de agua de la superficie, se calculó la humedad específica q_l utilizando las fórmulas (Lowe, 1997; Garrat, 1992)

$$esat1 = 6.1078 * \exp\left(\frac{17.08085 * T}{243,175 + T}\right) \quad (6)$$

$$e1 = Rh * \frac{esat1}{100} \quad (7)$$

$$q1 = e1 * \frac{Mvd}{(Patm/100)} \quad (8)$$

Donde:

- *T*: temperatura del aire a altura de cálculo
- *Rh*: humedad relativa a altura de cálculo
- *Patm*: presión atmosférica ($Patm_{Antisana} = 55830,075$ Pa)
- *esat*: % de la presión del vapor del aire seco en mb (milibares)
- *q1*: % de humedad específica
- *e1*: % de la presión del vapor saturado para el aire húmedo

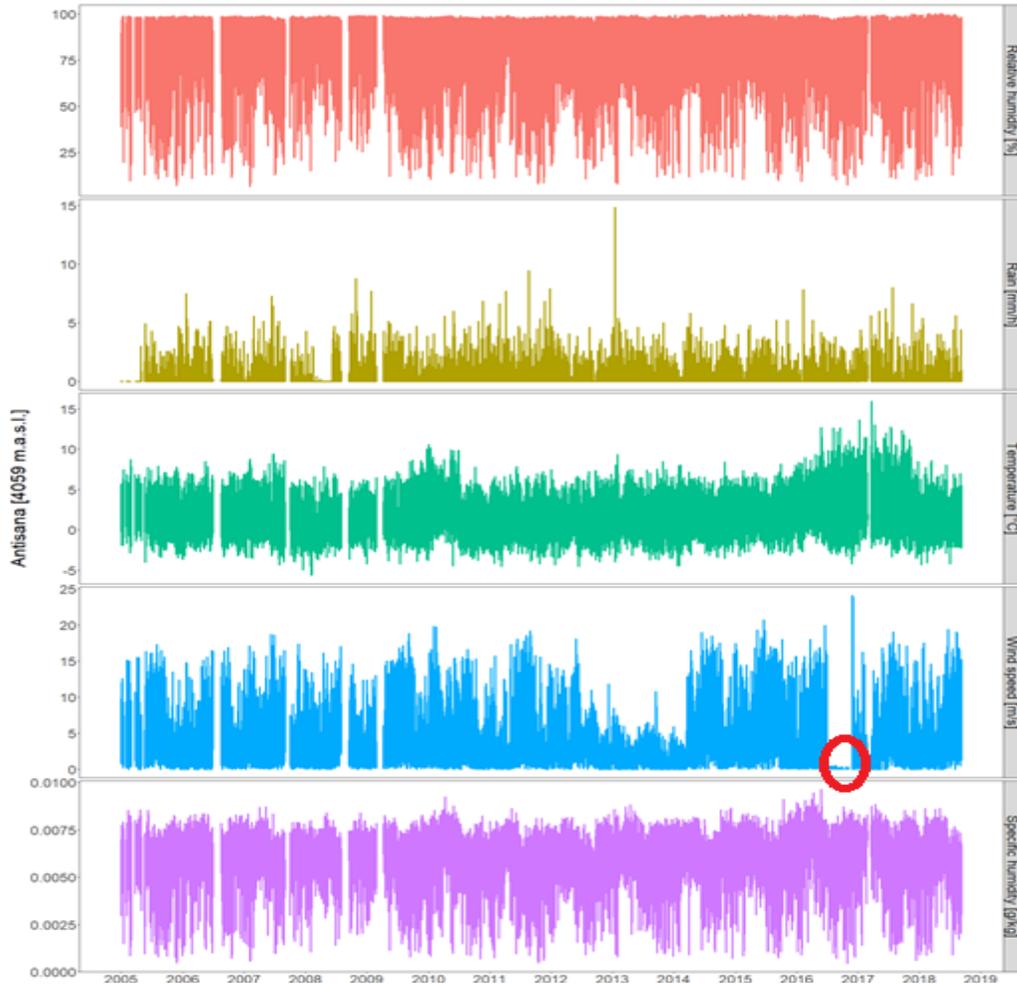
4.4.2 Control de Calidad

El control de calidad busca encontrar dentro de la data, valores erróneos que pueden darse por diferentes motivos, entre los que se incluyen sensores apagados (que registran por ejemplo, valores constantes), sensores descalibrados o mal encerados, que generan errores de “bias”, o inclusive cambios en el voltaje que pueden apagar los sensores o registrar valores extremadamente bajos o altos. Sin mencionar los errores humanos de digitación o lectura de los sensores. Aunque existen diversas metodologías o paquetes, para encontrar estos errores como la sección de control de calidad de Climdex que encuentra generalmente los outliers definiéndolos como aquellos valores que están fuera de 4 desviaciones estándar sobre la media (Lanzante, 2016), siempre es necesario realizar una inspección visual de la serie de tiempo.

En la figura 11 se presenta una comparación entre la serie temporal y las variables meteorológicas graficadas con el software RStudio. Las variables meteorológicas estudiadas fueron humedad relativa, lluvia, temperatura, velocidad del viento y humedad específica. En un círculo de color rojo se marcan aquellos datos a ser eliminados (los que marcan cero) durante el control de calidad del 2005 al 2018 en la estación ORE. Asimismo, en la figura 11 se muestran los datos después del control de calidad

Figura 11

Análisis interanual de la estación ORE antes del control de calidad.

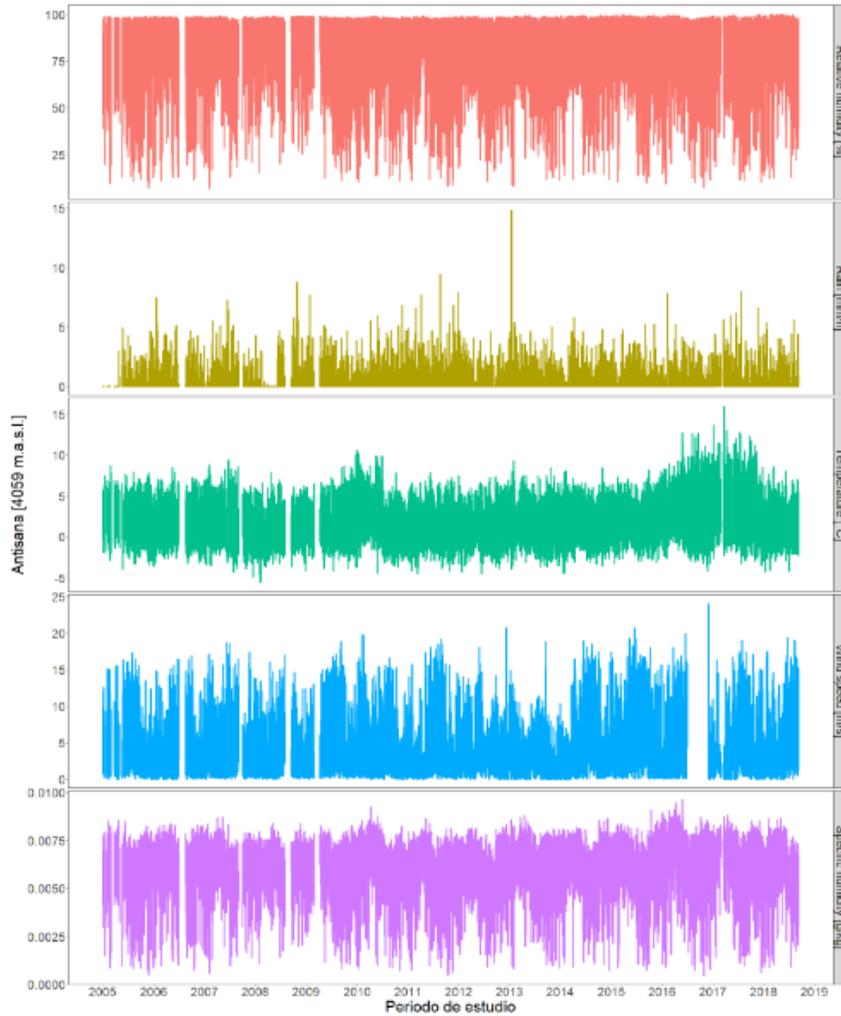


Nota: Elaborado por Guerrero (2021)

En la figura 12, se observa los datos eliminados después del control de calidad del 2005 al 2018 en la estación ORE.

Figura 12

Análisis interanual de la estación ORE después del control de calidad



Nota: Elaborado por Guerrero (2021)

4.4.3 Homogenización de la Resolución de la Data

Debido a que los datos de ZTD son horarios, y los meteorológicos se toman cada 30 min. Se realizaron los siguientes procedimientos utilizando RStudio: para la precipitación, se acumuló la precipitación registrada en una hora, mientras que para las demás variables se promedió el valor encontrado en cada hora.

4.4.4 Análisis de la Climatología

Con el objetivo de conocer el comportamiento de las variables meteorológicas de la zona, se ha realizado un estudio de los valores tanto a nivel interanual (anual), estacional (mensual) y de ciclo diurno (horario). Los resultados se muestran en las figuras 13, 14 y 15.

4.4.5 Cálculo del Retraso Troposférico ZTD

El cálculo del retraso troposférico con los archivos rinex de los GPS no fue realizado en el marco de esta tesis, sino que fueron datos de entrada proporcionados por la Doctora A. Walpersdorf en afiliación Física Sheila Serrano Vincenti, en una cooperación entre la UPS, el IRD y la EPN; sin embargo, el funcionamiento resumido del cálculo utilizando el software GAMIT se presenta en el apéndice 3.5.3 del marco teórico. Este software se utiliza para el análisis GPS mediante la estimación de línea base, coordenadas y velocidades de estaciones, a través de órbitas satelitales y variables de orientación terrestre.

4.4.6 Análisis de las Variables Meteorológicas y el ZTD

Con el objetivo de conocer el comportamiento de las variables meteorológicas y el ZTD, se realizó tanto a nivel interanual, estacional (mensual) y de ciclo diurno (horario). Los resultados se muestran en las figuras 16, 17 y 18.

4.4.7 Análisis por Evento.

Con el objetivo de conocer la causalidad del ZTD y las demás variables meteorológicas, respecto a los eventos de lluvia intensa, se analizaron los 4 eventos de lluvia más grandes registrados en la estación ORE, y que corresponden a las fechas 2014-06-10 (13:00), 2014-10-30 (09:00) y 2014-10-11 (11:00) y 2014-06-10 (11:00). Los resultados se muestran en las Ilustraciones 19, 20, 21 y 22.

5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

5.1 Climatología en el Antisana

La presente climatología se construyó con datos de 14 años de las siguientes variables lluvia, temperatura, humedad relativa, velocidad del viento y humedad específica del año 2005 al 2018. El análisis se realizó a nivel de ciclo diario, ciclo estacional y ciclo interanual con lo que se obtuvo las gráficas con ayuda del software RStudio, y se presentan a continuación. Los valores promedios de las variables estudiadas de la estación ORE se presentan en la Tabla 5

Tabla5

Valores promedio de la estación ORE

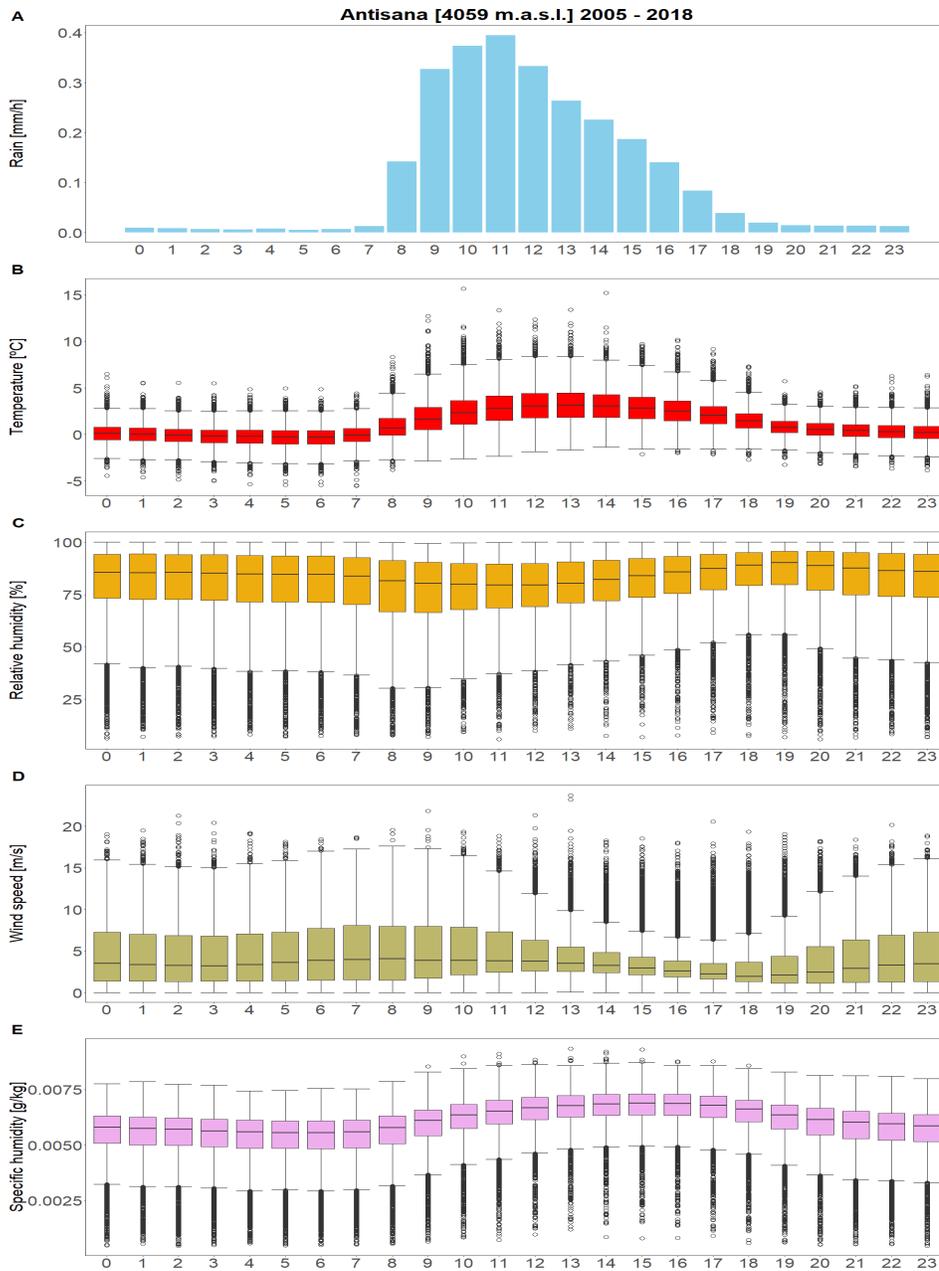
Variables	Promedio
Precipitación (mm/h)	0.065
Humedad Relativa (%)	82.15
Humedad Especifica (g/kg)	0.004
Velocidad Viento (m/s)	4.42
Temperatura (°C)	1.02

Nota: Elaborado por Guerrero (2021)

5.1.1 Análisis del Ciclo Diurno

Figura 13

Análisis de ciclo diurno en la estación ORE del 2005 al 2018



Nota: Elaborado por Guerrero (2021)

Es importante indicar que existen muy pocos estudios de la climatología ciclo diurno en el Antisana, por lo que se espera que en las siguientes observaciones climatológicas sean un aporte de este trabajo de investigación. En la figura 13, se presenta el análisis diurno de las variables meteorológicas encontradas en la estación ORE desde el año 2005 al 2018. Los valores de precipitación acumulada diurno se muestran con histogramas, mientras que las demás variables se muestran con boxplots.

La estación ORE está situada al NE del Antisana, lo cual hace que reciba directamente la luz del sol, y sea este el principal forzante de todos los fenómenos meteorológicos, incluyendo precipitación. Se registran valores de precipitación significativos desde las 08:00 de la mañana, llegando a un pico a las 11:00 de la mañana que luego decrece hasta las 18:00 y 19:00 de la noche. Los autores sugieren que es la fuerte pendiente de la topografía la que favorece que los movimientos convectivos sean extremadamente rápidos y la precipitación lluviosa se forme rápidamente con la presencia del sol; sin embargo, es necesario realizar más estudios que comprueben dicha aseveración.

Asimismo, observamos en la figura 13, que el sol es el principal forzante de los cambios de temperatura al salir el sol a las 06:00 de la mañana la temperatura logra elevarse a las 07:00 u 08:00 de la mañana, llegando a su valor máximo a la 13:00 de la tarde, para luego decrecer constantemente. El valor mínimo se registra a las 06:00 de la mañana am y el máximo a la 13:00 de la tarde.

La humedad relativa es una medida inversa a la temperatura, aunque parece relativamente constante registra ligeros descensos desde las 06:00 de la mañana (hora que

sale el sol) logra su valor mínimo a las 08:00 o 09:00 am, para luego aumentar paulatinamente. Aparentemente registra otro descenso a las 23:00 horas.

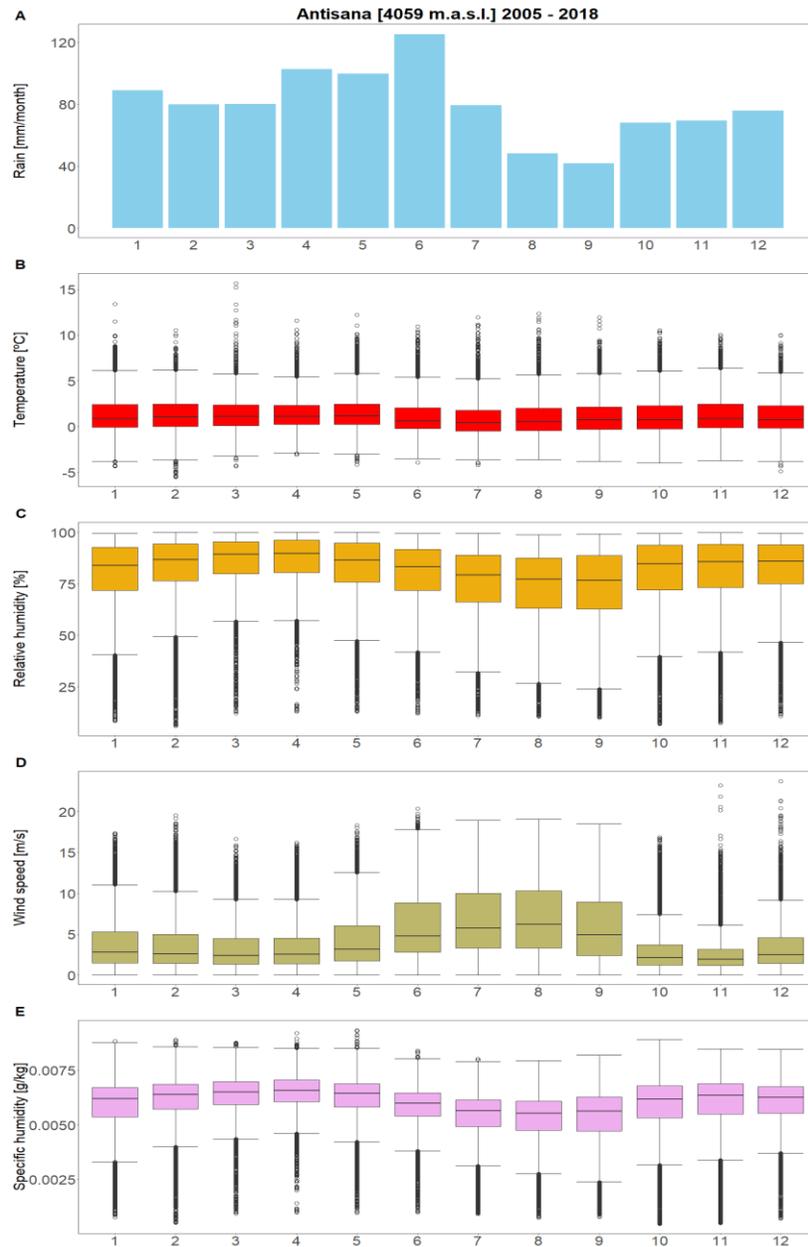
De la misma manera que los casos anteriores es el sol el principal causante de los cambios de la velocidad del viento, el cual llega a sus valores máximos en la madrugada entre 06:00, 07:00, 08:00, 09:00 y 10:00 am; luego ocurre un periodo de calma en las horas de la tarde, esto se deba a la fuerte convección de los vientos ascendentes producidos por la salida del sol en la mañana como se observa en la figura 13; mientras que en la tarde después que se enfría la superficie con la puesta del sol, se activan nuevamente los vientos descendentes.

Tal como se ve el incremento de la velocidad del viento desde las 19:00 hasta las 23:00 horas, lo cual genera un descenso en la humedad relativa. El periodo entre estos dos momentos que dura desde las 14:00 hasta 18:00 horas es un periodo de vientos calmos.

Finalmente, nótese que el comportamiento entre la humedad relativa y la humedad específica no es igual, aunque presenta cierta diferencia. La humedad específica indica la cantidad de humedad presente independientemente de la temperatura. El sol es el principal forzante de la presencia de humedad, el cual llega a sus valores máximos desde las 08:00 hasta las 14:00 horas para luego disminuir constantemente.

5.1.2 Análisis del Ciclo Estacional

Figura 14
Análisis estacional en la estación ORE.



Nota: Elaborado por Guerrero (2021)

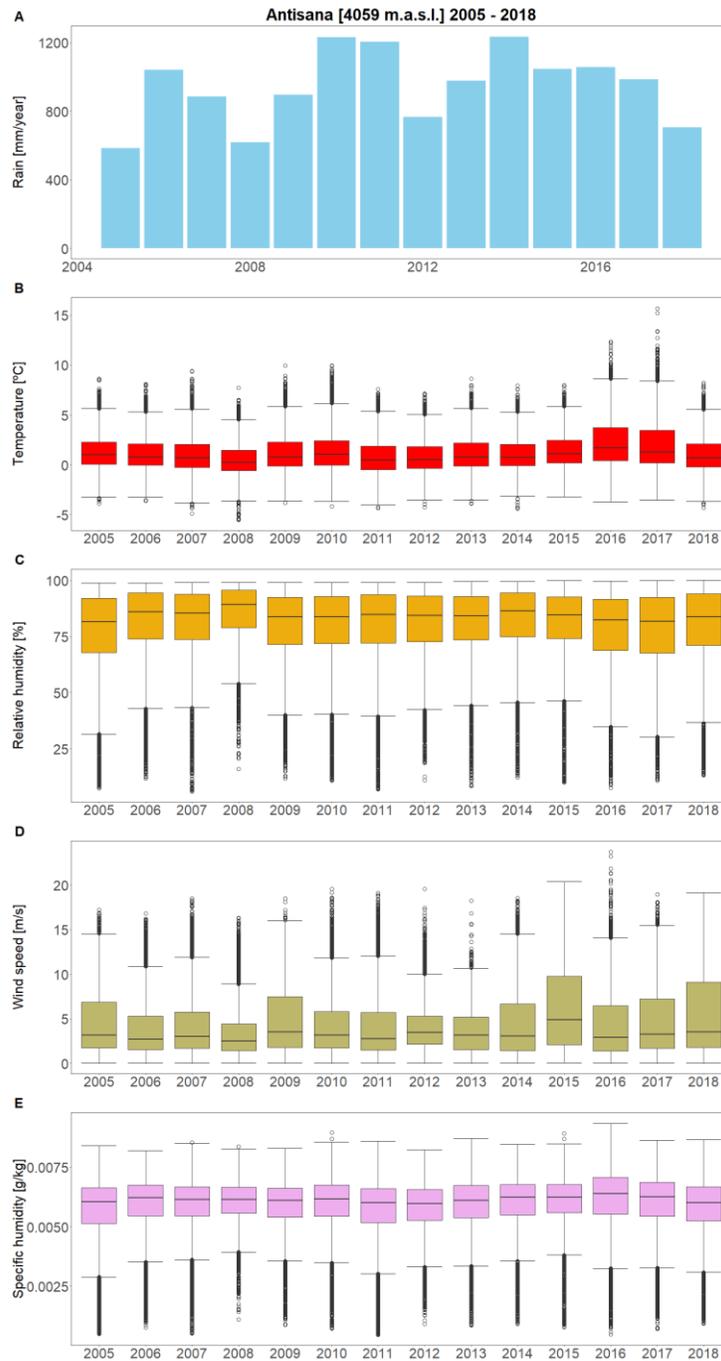
En la figura 14 se presenta el análisis estacional de las variables meteorológicas encontradas en la estación ORE desde el año 2005 al 2018. Los valores de precipitación acumulada estacional se muestran con histogramas, mientras que las demás variables se muestran con boxplots. El comportamiento estacional de la precipitación lluviosa muestra un máximo en el mes de junio correspondiente con el ciclo determinado en la región del Oriente ecuatoriano, es la Zona de Interconvergencia Tropical, ZIT, que llega a su desplazamiento máximo hacia el norte marca un movimiento de los vientos alisios que provocan la precipitación lluviosa. Sin embargo, se presentan también lluvias debido al régimen bimodal de la Sierra, donde se producen lluvias en los meses de marzo, abril y mayo. Se puede concluir que este régimen es una combinación del régimen del oriente con el régimen de la Sierra. (Alvarado,2017; Sandoval, 2016).

Las variaciones de temperatura a nivel estacional son mínimas; sin embargo, se nota un ligero aumento en el mes de mayo y una ligera disminución en el mes de junio, julio y agosto, que corresponde a los meses de menos lluvia que son julio, agosto y septiembre, a la par se presenta una disminución de la humedad relativa, justo cuando disminuye la precipitación lluviosa. De la misma manera, este efecto se ve reflejado también en la disminución de la humedad específica y en un incremento de la velocidad del viento.

5.1.3 Análisis del Ciclo Interanual

Figura 15

Análisis interanual de las variables meteorológicas de la estación ORE



Nota: Elaborado por Guerrero (2021)

La figura 15 presenta un análisis interanual de las variables meteorológicas encontradas en la estación ORE desde el año 2005 al 2018. Los valores de precipitación acumulada anual se muestran con histogramas, mientras que las demás variables se muestran con boxplots.

En el análisis interanual se observa que los años más lluviosos fueron el 2010, 2011 y 2014; a su vez, los años menos lluvioso fueron 2004 y 2008.

Con la temperatura los años más cálidos fueron 2016 y 2017, lo cual se vio reflejado en las tasas de humedad relativamente bajas en esos años; y, la velocidad del viento alcanzó su máximo en el año 2015 y con menor velocidad de viento fue el 2008, que también presentó humedades relativas más altas. Menos viento más humedad relativa.

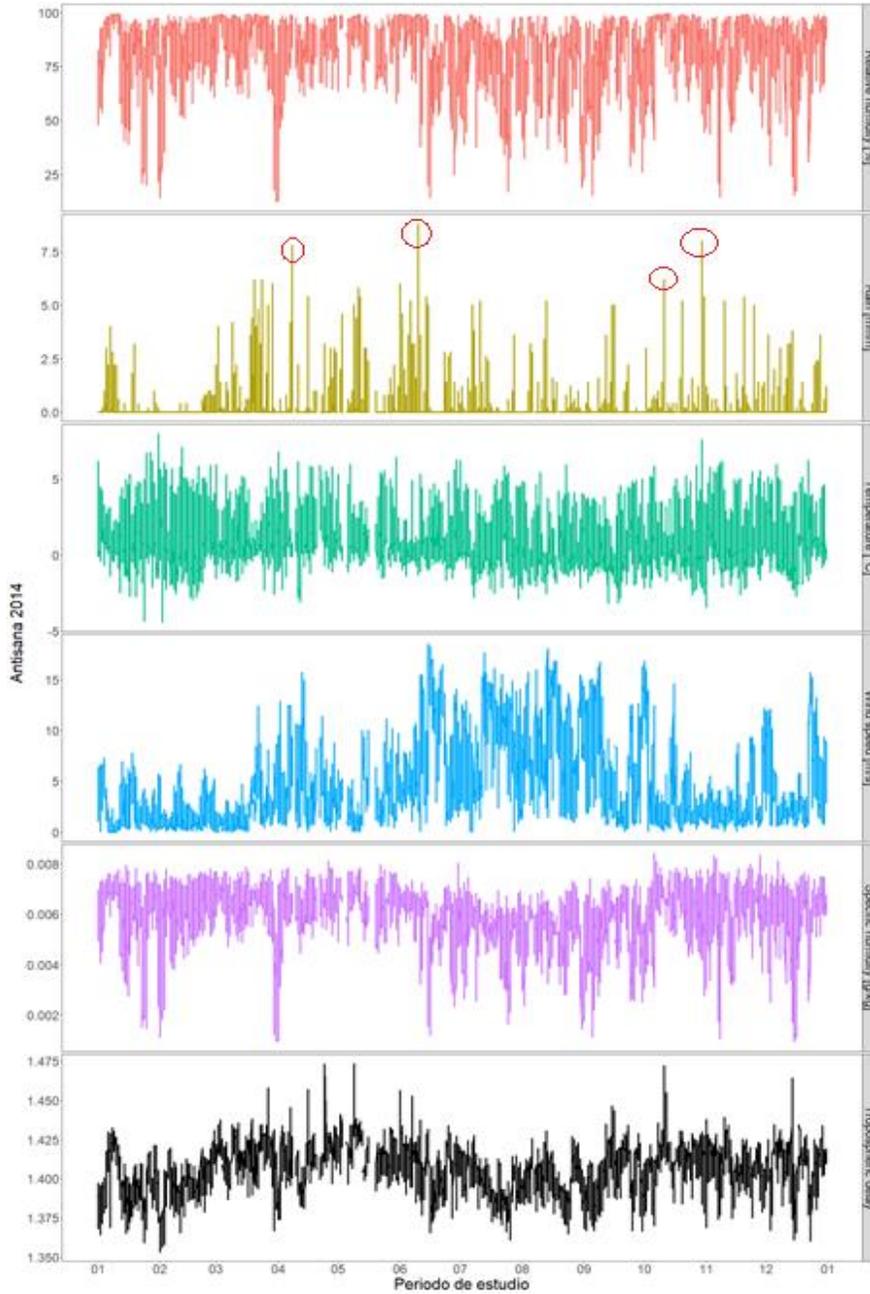
El año con mayor humedad específica fue el 2016, también fue un año cálido. El año con menor humedad específica fue 2008, con menos lluvia, temperatura baja, humedad relativa baja y poco viento.

5.2 Relación Entre las Variables Meteorológicas y ZTD

Para relacionar las variables climáticas con el ZTD, se trabajó únicamente con el año 2014. Ya que es este año el que presentaba los cálculos de ZTD.

En la siguiente gráfica se muestra la completitud de las series de tiempo de las variables meteorológicas y el ZTD, se aprecia que las series de tiempo están completas. Así mismo, se visibilizan los 4 eventos de lluvia más grandes marcados con círculo rojo. (Ver figura 16). Que en la sección 6.2.1 y 6.2.2 se analizará en detalle.

Figura 16
Series de tiempo de las variables meteorológicas y el ZTD.

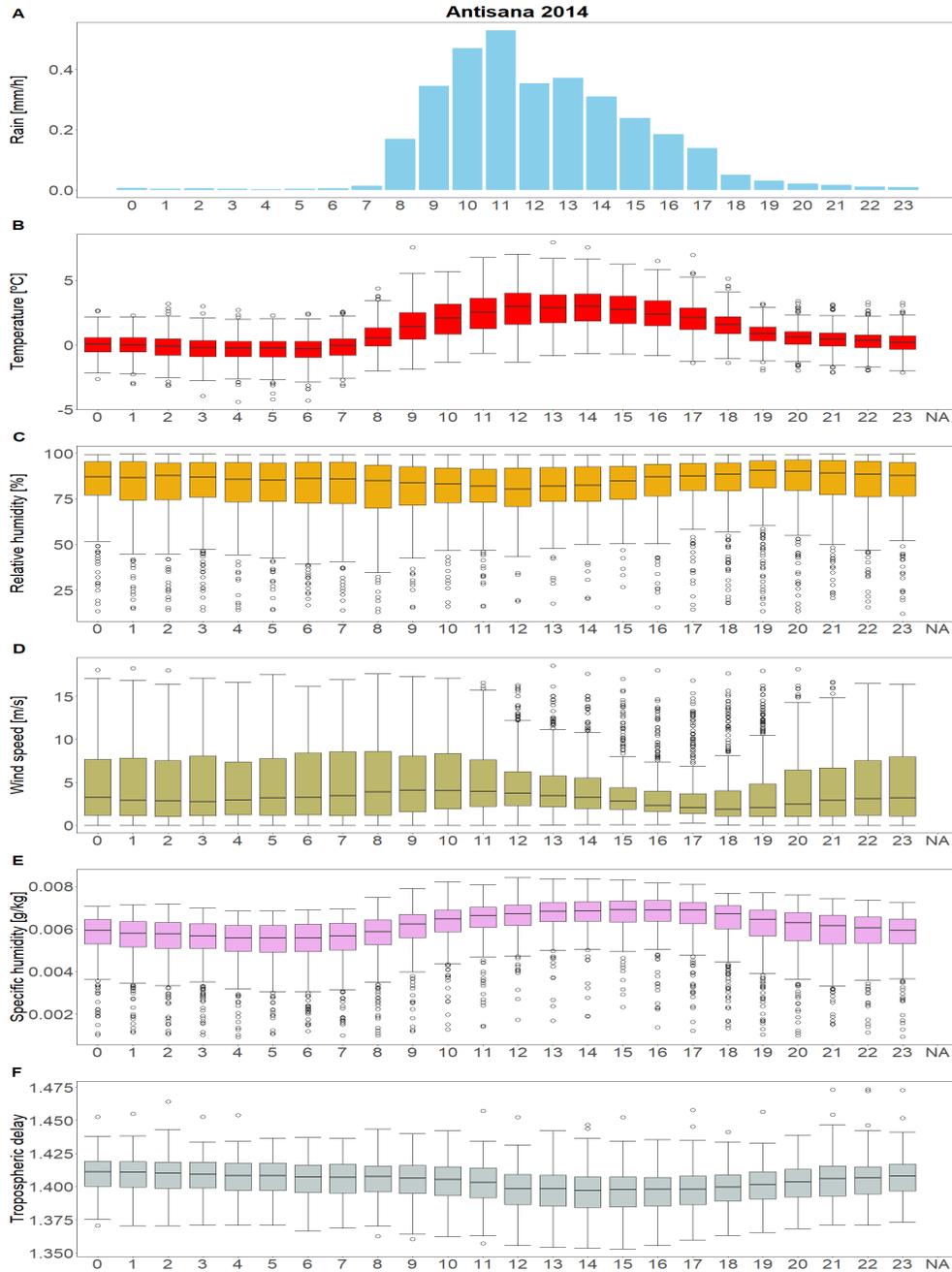


Los Eventos de lluvia más grandes se marcan con círculos rojos, datos sobre el Antisana 2014

Nota: Elaborado por Guerrero (2021)

5.2.1 Análisis del Ciclo Diurno del ZTD

Figura 17
Análisis diario del ZTD de la estación ASEC



Nota: Elaborado por Guerrero (2021)

En la Figura 17, el retraso troposférico presenta una relación respecto a la radiación solar, ya que desde tempranas horas de la mañana se presenta una disminución, llegando a su valor mínimo a las 12:00 horas (medio día), para luego incrementarse paulatinamente.

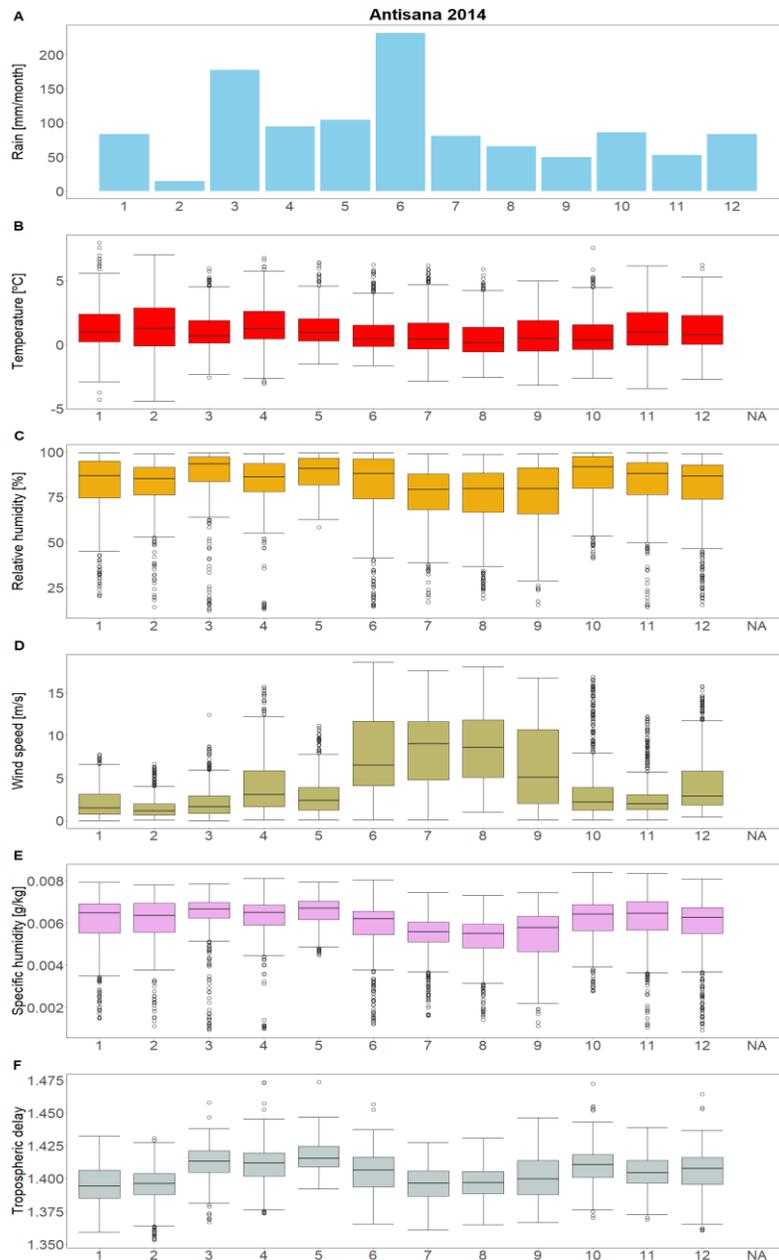
El ZTD tiene un comportamiento inverso al de la temperatura e inverso a la humedad específica (más humedad específica menos retraso troposférico). Se observa una relación no tan directa y evidente con la lluvia, humedad relativa y los vientos.

Según las hipótesis de investigaciones previas de Sapucci (2018) y Benevides (2015), se espera tener un incremento de retraso troposférico antes del evento lluvioso intenso. Aunque no existe consenso entre cuántas horas antes se debe dar este incremento antes de los eventos de precipitación máxima (Sapucci et al., 2018). En la figura 17, se puede ver que los valores de lluvia inician a las 8 de la mañana, logrando su pico máximo a las 11am. Mientras que el pico del retraso troposférico se encuentra desplazado a las 8 am (luego de lo cual, decrece). Este comportamiento podría indicar que sí existe un lag de 3 horas promedio entre el pico de lluvia y el de retraso troposférico

5.2.2 Análisis del Ciclo Estacional del ZTD

Figura 18

Análisis estacional del ZTD de la estación ASEC



Nota: Elaborado por Guerrero (2021)

En la figura 18, se observa una ligera correspondencia entre los meses más lluviosos y un aumento de ZTD; de la misma manera en los meses menos lluviosos disminuye el ZTD.

La humedad específica y precipitación en el 2014 disminuyen en los meses de julio, agosto y septiembre, lo cual se refleja en una disminución de la humedad relativa y específica.

La velocidad del viento presenta incrementos en los meses de junio, julio y agosto. Los incrementos de vientos demarcan una disminución en el ZTD. El retraso troposférico tiene un ligero aumento en el mes de mayo, debido a la disminución de la humedad específica y humedad relativa.

Este comportamiento muestra una escala más gruesa de análisis, como la mensual. El comportamiento de ZTD es sincrónico con el de la humedad relativa y específica. Y no se presentan lags, que sí son visibles en un análisis horario (Bonafoni et al., 2019).

5.3 Análisis de Eventos Extremos y su Relación con ZTD

En las siguientes gráficas se presenta un análisis de los eventos antes y después de los máximos picos de lluvia, y el comportamiento de las variables meteorológicas (la línea roja marca el evento de lluvia).

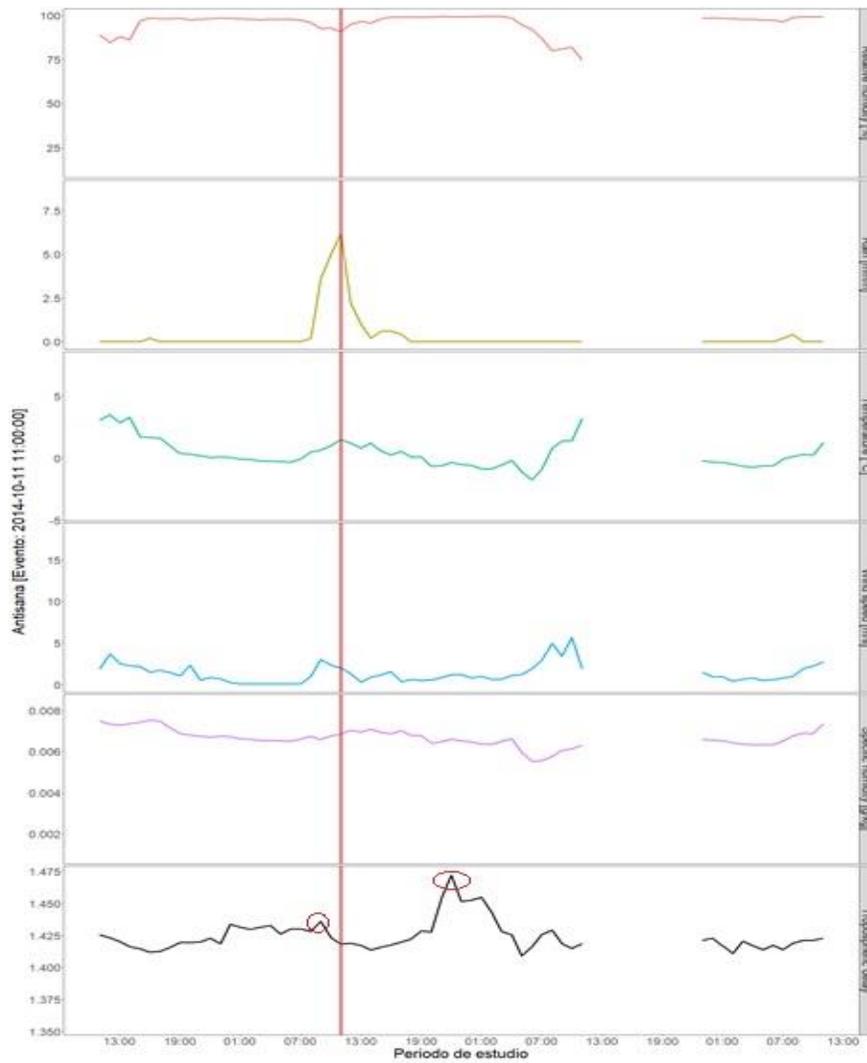
Las gráficas fueron realizadas con el software Rstudio el cual nos proporcionó los picos más altos de lluvia, además de graficar las variables de humedad relativa, precipitación, temperatura, velocidad del viento, humedad específica y retraso troposférico

5.3.1 Evento 1

El la figura 19, el ZTD se presenta 4 horas antes del evento de lluvia producido a las 11 am y 14 horas después del evento de lluvia.

Figura 19

Evento de lluvia, 2014-10-11, las partes vacías indican ausencia de datos



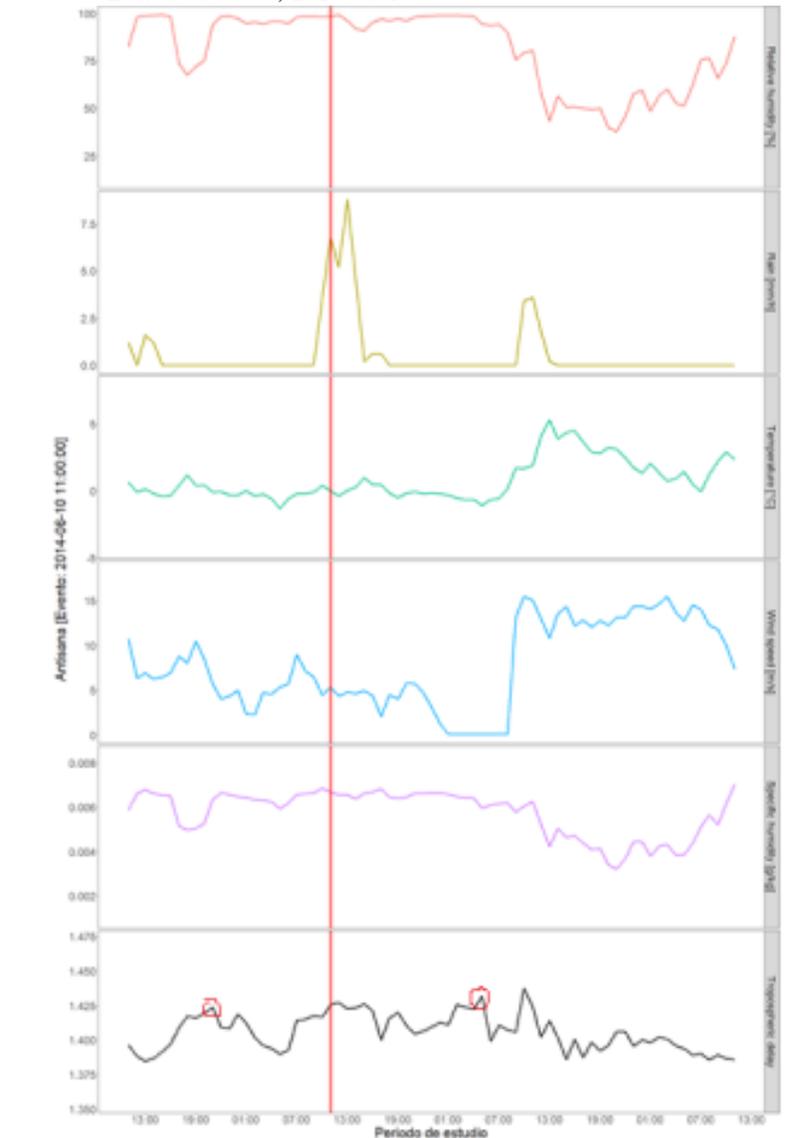
Nota: Elaborado por Guerrero (2021)

5.3.2 Evento 2

En la figura 20, el ZTD se presenta 17 horas antes del evento de lluvia producido a las 11 am y 21 horas después del evento de lluvia.

Figura 20

Evento de lluvia, 2014-06-10



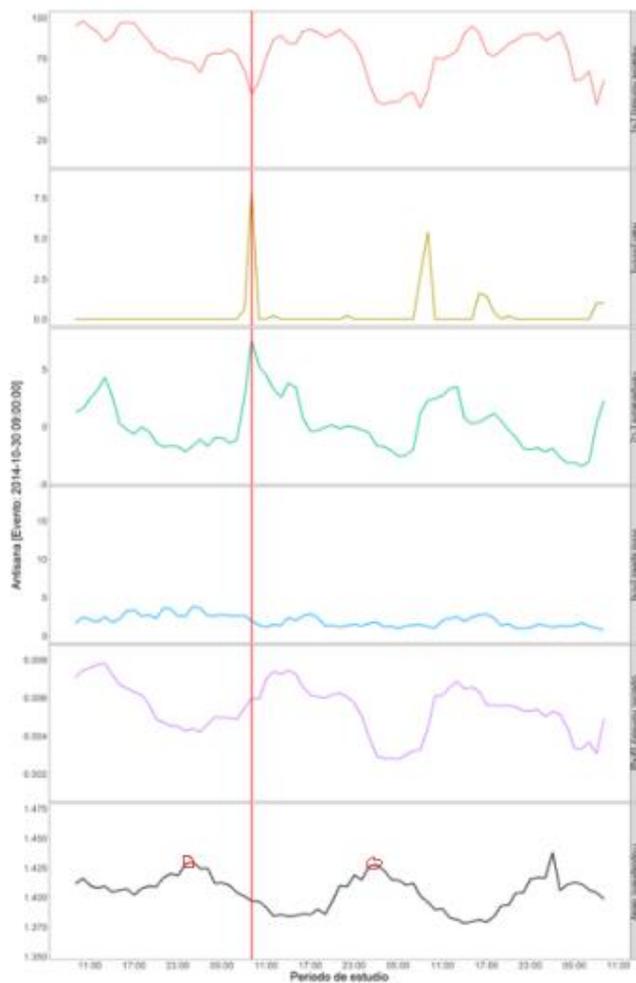
Nota: Elaborado por Guerrero (2021)

5.3.3 Evento 3

En la figura 21, el ZTD se presenta 9 horas antes del evento de lluvia producido alas 9am y 19 horas despúes del evento de lluvia.

Figura 21

Evento de lluvia, 2014-10-30

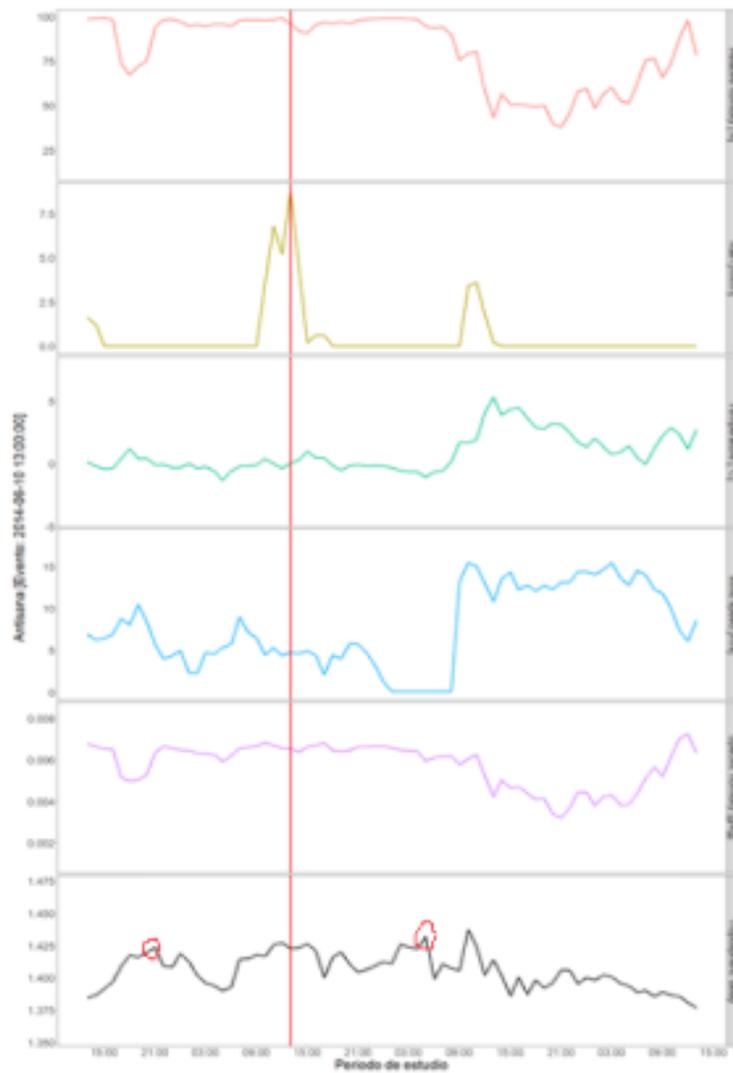


Nota: Elaborado por Guerrero (2021)

5.3.4 Evento 4

En la figura 22, el ZTD se presenta 19 horas antes del evento de lluvia producido a la 1 pm y 18 horas después del evento de lluvia.

Figura 22
Evento de lluvia, 2014-06-10



Nota: Elaborado por Guerrero (2021)

Aunque no se calculó el Vapor de agua troposférico, y se analizó directamente la relación entre el ZTD y la ocurrencia de lluvia intensa, se encontraron picos repartidos entre 04:00 a 17:00 y 09:00 a 19:00 horas antes del evento de lluvia, lo que nos da una causalidad entre el incremento del ZTD de 12.25 horas antes del evento de lluvia.

Lo que representa una dispersión amplia pero que puede ser considerada como significativa para el cálculo del pronóstico de lluvia. Es interesante ver que juntamente con el incremento del ZTD, se aprecia un aumento de los vientos, y un descenso de la humedad relativa y específica; estas dos últimas, posiblemente debido al mismo incremento de los vientos.

En cuanto a los picos de ZTD posteriores al evento de lluvia, estos se encontraron picos repartidos entre 14, 21, 19 y 18 horas. Lo que nos da un promedio de 18 horas posterior al evento de lluvia, que se presenta igualmente con un incremento de los vientos y un descenso de la humedad específica y relativa.

6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1 Conclusiones

6.1.1 *Climatología del Antisana.*

El Antisana presenta una temperatura promedio de 1.02°C, una precipitación promedio de 0.065 mm/h, vientos promedios de 4.42 m/s, humedad relativa del 82.15% y específica del 0.004 g/kg.

Gracias a los 14 años de datos provistos por el IRD y el INAMHI, se pudo determinar una climatología bastante uniforme en donde únicamente el año 2008 se presenta como seco, con una disminución de las precipitaciones y la humedad relativa y específica.

A nivel estacional, y por su posición geográfica, el clima en el Antisana se ve influenciado tanto por la Sierra, como por el oriente, teniendo como resultado un régimen de precipitación característico del oriente (picos en el mes de junio), pero también influenciado por las lluvias de la sierra, que tienen sus picos en abril y octubre.

Es decir que en el Antisana se suman los regímenes unimodales del oriente con el bimodal de la sierra, dando como resultado un régimen de precipitación trimodal. Este escenario dificulta la predicción de los eventos extremos de lluvia.

La estación seca ocurre en los meses de Julio, Agosto y Septiembre y presenta un incremento de la velocidad del viento y un descenso en los valores de humedad relativa y específica.

En cuanto al ciclo diurno, como es de esperarse, es el sol el principal forzante de las variables meteorológicas, incrementando no sólo la temperatura, la cual logra su valor mínimo a las 7am y su máximo a las 13h00.

La salida del sol también incrementa el régimen de lluvia el cual se da de 8am a 5pm, logrando su máximo a las 11am. En cuanto a los vientos éstos logran su mínimo de 13h00 a 20h00 horas.

6.1.2 Relaciones Climáticas con el ZTD

Al analizar la relación con el ZTD, se observa una ligera correspondencia entre los meses más lluviosos y un aumento de ZTD; de la misma manera en los meses menos lluviosos disminuye el ZTD.

La humedad específica y precipitación en el 2014 disminuyen en los meses de julio, agosto y septiembre, lo cual se refleja en una disminución de la humedad relativa y específica. Los incrementos de vientos demarcan una disminución en el ZTD

Además, a nivel de ciclo diurno, el retraso troposférico presenta una relación respecto a la radiación solar, ya que desde tempranas horas de la mañana se presenta una disminución, llegando a su valor mínimo a las 12 pm, para luego incrementarse poco a poco.

Mientras que el ZTD tiene un comportamiento inverso al de la temperatura e inverso a la humedad específica esto quiere decir que a mayor humedad específica menor retraso troposférico.

Respecto a los picos encontrados, al analizar los diagramas de ciclo diurno se ve un ligero desfase de un lag de 3 horas entre el pico de ZTD y el de lluvia, sin embargo, al analizar los eventos uno a uno, se encuentran diferencias mayores, que pueden llegar a las 18 horas. Por lo que se concluye, que existe capacidad predictiva, pero es necesario ampliar la investigación para saber con mayor precisión el valor del lag.

La utilidad práctica del cálculo del retraso troposférico se da cuando, existe picos de vapor de agua antes de la presencia de lluvia intensa, esto podría tener perspectivas en el mejoramiento de la predicción de lluvia intensa y en algún momento se va a utilizar para la creación de alertas temprana de lluvias intensas y sus posibles consecuencias como inundaciones, deslaves, etc. Sin embargo, esta tesis es un antecedente en Ecuador para poder evaluar estos efectos.

6.2 Recomendaciones

El cálculo el vapor de agua troposférico es muy importante ya que es muy útil en la comprensión del balance energético del planeta y además de la interacción entre la tierra, la atmósfera y el océano, también en el seguimiento y modelamiento del calentamiento global y el efecto invernadero, también ayuda al mejoramiento de los modelos para la estimación del clima.

Además, para futuras investigaciones es necesario incrementar el análisis de los eventos de lluvia individuales y el vapor de agua troposférico y las implicaciones meteorológicas relacionada con la presencia de lluvia intensa.

7. BIBLIOGRAFÍA

- Albán, M. (Junio de 2018). *TÉCNICA DE POSICIONAMIENTO PUNTUAL PRECISO (PPP) APLICADA A LA ESTIMACIÓN DE VAPOR DE AGUA PRECIPITABLE (PWV) DE LA ESTACIÓN EPEC*. Obtenido de UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS.
- Andrades, M. (2012). *FUNDAMENTOS DE LA CLIMATOLOGÍA*. Obtenido de UNIVERSIDAD DE LA RIOJA.
- Benavides, H., & León, G. (Diciembre de 2007). *INFORMACIÓN TECNICA SOBRE GASES DE EFECTO INVERNADERO Y EL CAMBIO CLIMÁTICO*. Obtenido de IDEAM:
<http://www.ideam.gov.co/documents/21021/21138/Gases+de+Efecto+Invernadero+y+el+Cambio+Climatico.pdf>
- Benevides, P., Catalao, J., & Miranda, P. (21 de May de 2015). *On the inclusion of GPS precipitable water vapour in the nowcasting of rainfall*. Obtenido de Natural Hazards and Earth System Sciences:
<https://nhess.copernicus.org/preprints/3/3861/2015/nhessd-3-3861-2015.pdf>
- Bevis, M., Businger, S., Herring, T., Rocken, C., Anthes, R., & Ware, R. (1992). Remote Sensing of Atmospheric Water Vapor Using the Global Positioning System. *GPS Meteorology*, 15787-15801. doi:10.1029/92JD01517
- Bonafoni et al., B. (December de 2019). RRadio occultation and ground-based GNSS products for observing, understanding and predicting extreme events: A review. *Atmospheric Research*, 230. doi:<https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2019.104624>
- Brenot, H. (13 de Enero de 2014). Obtenido de
http://www.Informacion/Brenot_amt_2014.pdf
- Camilloni, I., & Vera, C. (2012). *LA ATMÓSFERA*. Obtenido de EXPLORA, LAS CIENCIAS EN EL MUNDO CONTEMPORÁNEO:
<http://www.bnm.me.gov.ar/giga1/documentos/EL002316.pdf>
- Cioce et al., C. (2017). Estimando el retardo troposférico sobre estaciones GNSS de operación continua en Venezuela mediante observaciones satelitales GLONASS. *MAPPING*, 26(183), 36-46. Obtenido de
http://www.sirgas.org/fileadmin/docs/Boletines/Cioce_et_al_2017_Revista-MAPPING-183_A4.pdf
- Díaz, C. (Junio de 2018). *ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DE LAS FRECUENCIAS DE VALORES EXTREMOS DE TEMPERATURA Y PRECIPITACIÓN EN ZONAS*

DE ALTA MONTAÑA: CASO DE ESTUDIO VOLCÁN ANTISANA. Obtenido de ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL:
<https://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/19488/1/CD-8886.pdf>

Ecos del futuro. (13 de Agosto de 2017). *Composición de la atmósfera*. Obtenido de NAUKAS: <https://naukas.com/2017/09/05/ese-insignificante-e-incomprensible-co2/1-descripcion-composicion-de-la-atmosfera-jpg-imagen-jpeg-960-x-720-pixeles/>

Fiallas, J. (22 de Septiembre de 2002). *Laboratorio de Teledetección y Sistemas de Información Geográfica*. Obtenido de https://www.ucipfg.com/Repositorio/MGAP/MGAP-05/BLOQUE-ACADEMICO/Unidad-3/complementarias/Sistemas_de_posicionamiento_global.pdf

Galindo, G. (12 de Enero de 2007). *Análisis de climatología*. Obtenido de <https://freemeteo.ec/eltiempo/vacagalindo/longterm/monthly/?gid=3650319&mn=1&language=spanish&country=ecuador>

Garreaud y Meruane. (2015). *Instrumentos Meteorológicos y Humedad Atmosférica*. Obtenido de UNIVERSIDAD DE CHILE:
http://mct.dgf.uchile.cl/AREAS/meteo_mod1.pdf

GOBIERNO AUTÓNOMO DESCENTRALIZADO PROVINCIAL DE NAPO. (Diciembre de 2018). *Proyecto de Actualización Plan de Desarrollo y Ordenamiento Territorial de la provincia de Napo*. Obtenido de NAPO:
http://www.napo.gob.ec/website/phocadownload/lotaip2018/Anexos/Lit.K/138_actualizacion_pdyot.pdf

Lab-Volt. (Febrero de 2005). *Control de proceso de temperatura*. Obtenido de <http://biblio3.url.edu.gt/Publi/Libros/2013/ManualesIng/ControlProTemp-O.pdf>

Lanzante, J. (7 de Febrero de 2016). Obtenido de <http://www.informacion/calidad.pdf>

Lema, L. (Agosto de 2018). *ANÁLISIS GEOESPACIAL PARA LA DETERMINACIÓN DE VAPOR DE AGUA TROPOSFÉRICO CON DATOS DE GPS EN ECUADOR*. Obtenido de UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA.

León, F. (10 de Mayo de 2011). “Kazando” un radiosonda, 31 marzo 2011. *EL TIEMPO*.

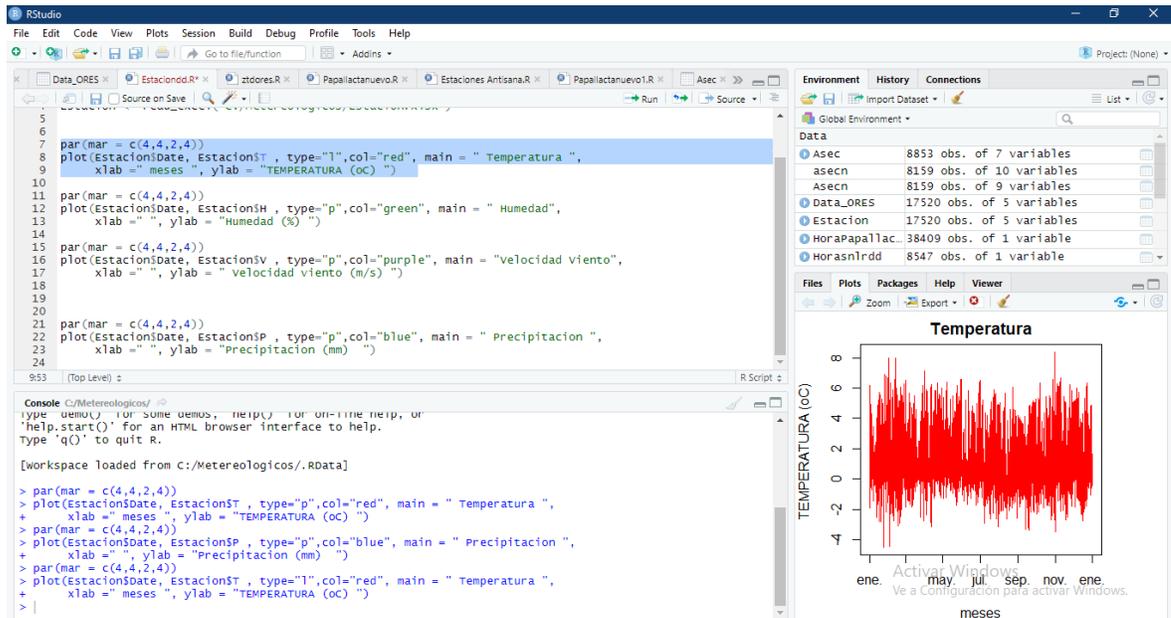
Maisincho, L. (2009). *Reconstrucción y predicción de la evolución del balance de masa y la línea de nieve del glaciar 15a del Antisana usando un modelo Degree-Day*. Obtenido de Universidad de Nice y EPN.

- Manahan, S. (2004). *Primera Comunicación Nacional en Cambio Climático de Venezuela*. Obtenido de Caracas: Ministerio del Ambiente y los Recursos Naturales.
- Mancebo, S. (25 de Mayo de 1999). *Las técnicas GPS como herramienta en la gestion ambiental*. Obtenido de http://oa.upm.es/1572/1/MANCEBO_ART_1999_01.pdf
- Martinez, B. (15 de Enero de 2011). *CÁLCULO DEL VAPOR DE AGUA PRECIPITABLE Y EVALUACIÓN DE SU INCERTIDUMBRE*. Obtenido de <https://www.mendoza-conicet.gob.ar/asades/modulos/averma/trabajos/2011/2011-t011-a010.pdf>
- Meruane y Garreaud, M. (Diciembre de 2015). *Determinación de Humedad en la Atmósfera*. Obtenido de <http://mct.dgf.uchile.cl/AREAS/modHR.pdf>
- Moreno, B. (Mayo de 2015). *INTRODUCCIÓN A LA DETERMINACIÓN DE LA TASA DE SUBSIDENCIA Y DEFORMACIÓN HORIZONTAL EN LA ZONA ORIENTE DEL DISTRITO FEDERAL HACIENDO USO DEL SISTEMA DE POSICIONAMIENTO GLOBAL*. Obtenido de UNAM: <http://www.ptolomeo.unam.mx:8080/jspui/bitstream/132.248.52.100/10429/1/Tesis.pdf>
- Nieto, S. (Abril de 2016). *VARIACIÓN DEL VAPOR DE AGUA EN LAS ESTACIONES BOGA Y TUNA A TRAVÉS DE OBSERVABLE GPS*. Obtenido de UNIVERSIDAD DISTRITAL FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS.
- Ordoñez, J. (2011). "Contribuyendo al desarrollo de una Cultura del Agua y la Gestión Integral de Recurso Hídrico". LIMA, PERÚ.
- Pozo y Sandoval, P. (27 de Abril de 2016). *SISTEMA DE POSICIONAMIENTO GLOBAL (GPS): DESCRIPCIÓN, ANÁLISIS DE ERRORES, APLICACIONES Y FUTURO*. Obtenido de Universidad de Málaga: <https://www.peoplesmatters.com/Archivos/Descargas/GPS.pdf>
- Sapucci et al., S. (23 de September de 2018). *Global Positioning System precipitable water vapour (GPS-PWV) jumps before intense rain events: A potential application to nowcasting*. doi:<https://doi.org/10.1002/met.1735>
- Sapucci y Machado, S. (December de 2006). PREVISÕES DO ATRASO ZENITAL TROPOSFÉRICO PARA A AMÉRICA DO SUL: VARIABILIDADE SAZONAL E AVALIAÇÃO DA QUALIDADE. *Revista Brasileira de Cartografia*.
- Suárez, W. (Octubre de 2009). "GENERACIÓN DE UN MODELO DE RETRASO TROPOSFÉRICO A PARTIR DE MEDIDAS METEOROLÓGICAS SUPERFICIALES Y GPS EN LOS PUNTOS ESPE-CIE-S061". Obtenido de ESCUELA POLITÉCNICA DEL EJÉRCITO.

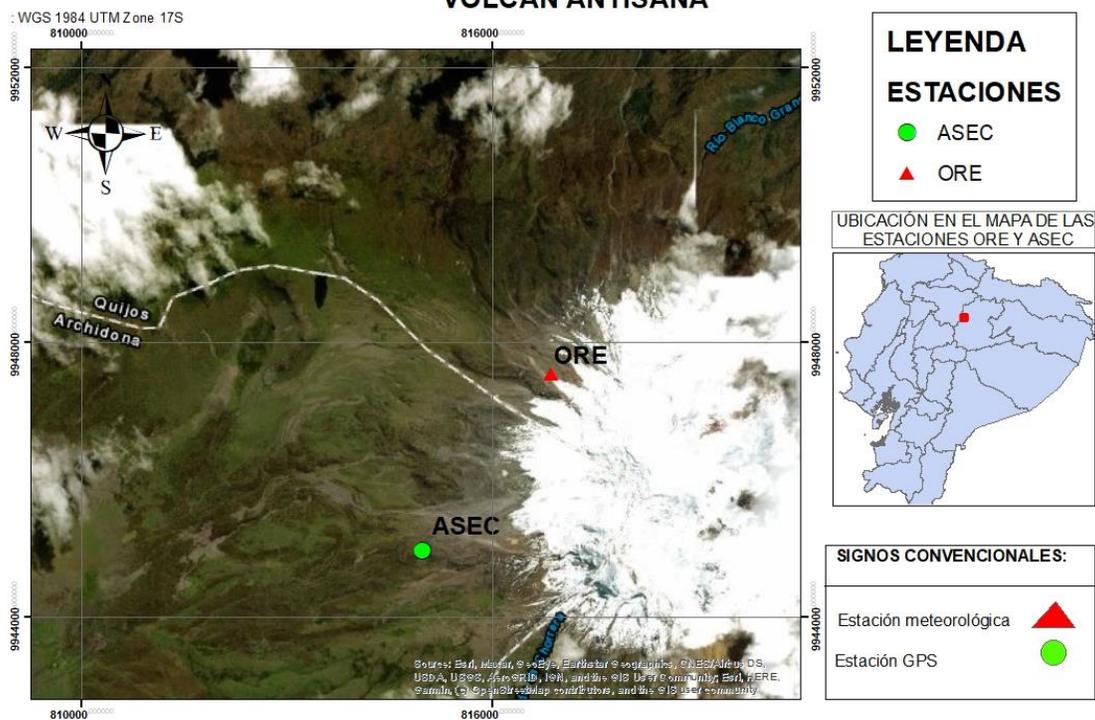
- Tamasi, M., & Martínez, M. (2011). CÁLCULO DEL VAPOR DE AGUA PRECIPITABLE Y EVALUACIÓN DE SU INCERTIDUMBRE. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, 15, 65-70.
- Viteri, A. (Marzo de 2013). "ESTUDIO METODOLÓGICO PARA LA ELABORACIÓN DE UN MODELO MATEMÁTICO DE VAPOR DE AGUA A PARTIR DE ESTACIONES DE MONITOREO CONTINUO GPS". Obtenido de ESPE.
- Walpersdorf, A., Brenot, H., Reverdy, M., Baelen, J. v., Ducrocq, V., Champollion, C., . . . Giroux, P. (2014). A GPS network for tropospheric tomography in the framework of the Mediterranean hydrometeorological observatory Cévennes-Vivarais (southeastern France). *Atmospheric Measurement Techniques*, 7. Obtenido de <https://amt.copernicus.org/articles/7/553/2014/>

8. ANEXOS

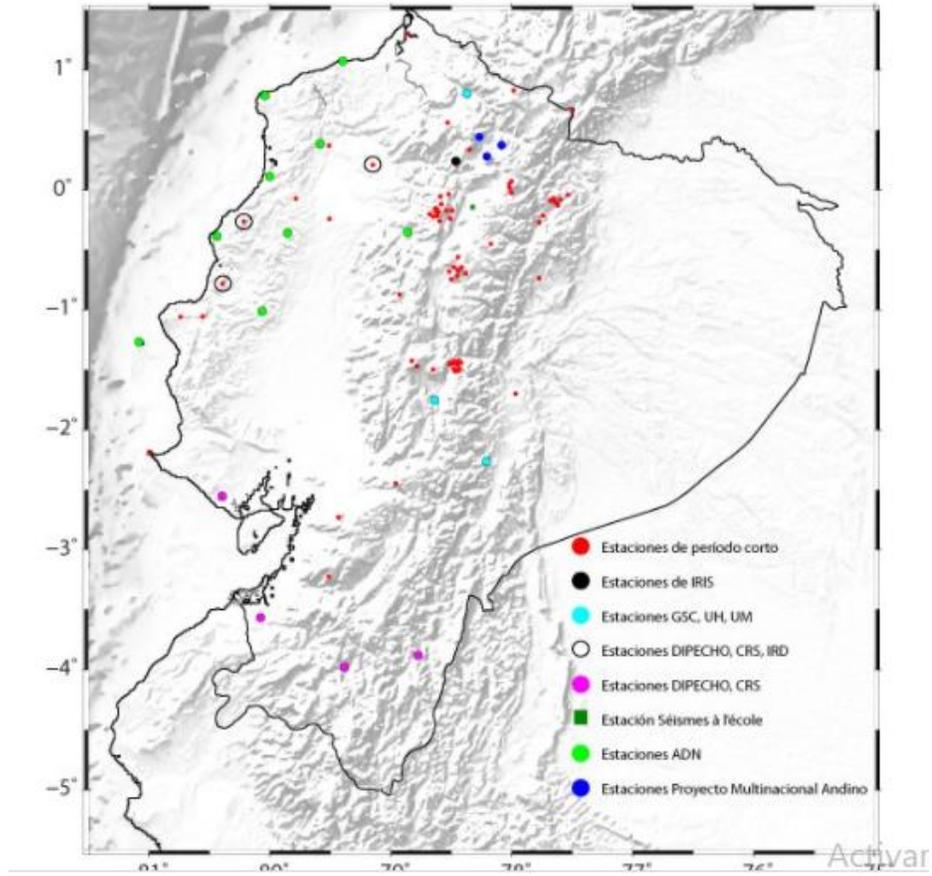
Anexo 1 Software RStudio



UBICACIÓN DE LAS ESTACIONES ASEC Y ORE VOLCÁN ANTISANA



Anexo 4 Red del Instituto Geofísico de la Escuela Politécnica Nacional



Anexo 5 Base de Datos de los Receptores GPS (Plataforma Virtual UNAVCO)

