

UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO DE QUITO

Colegio de Ciencias e Ingenierías

Estación de Mediciones Atmosféricas en la Universidad San Francisco de Quito (EMA): Instalación de instrumentación de meteorología física de la estación terrena y evaluación de los tres primeros meses de datos

Esteban Nicolás Tamayo Pazmiño

María del Carmen Cazorla, Ph.D, Director de Tesis

Tesis de grado presentada como requisito
para la obtención del título de Ingeniero Ambiental

Quito, diciembre de 2014

Universidad San Francisco de Quito

Colegio de Ciencias e Ingenierías

HOJA DE APROBACIÓN DE TESIS

**Estación de Mediciones Atmosféricas en la Universidad San Francisco de Quito
(EMA): Instalación de instrumentación de meteorología física de la estación terrena y
evaluación de los tres primeros meses de datos**

Esteban Nicolás Tamayo Pazmiño

María del Carmen Cazorla, Ph.D
Director de la tesis

René Parra, Ph.D
Miembro del Comité de Tesis

Valeria Ochoa, Ph.D
Miembro del Comité de Tesis

Ximena Córdoba, Ph.D
Decana Escuela de Ciencias
Colegio Ciencias e Ingenierías

Quito, diciembre de 2014

© Derechos de autor

Por medio del presente documento certifico que he leído la Política de Propiedad Intelectual de la Universidad San Francisco de Quito y estoy de acuerdo con su contenido, por lo que los derechos de propiedad intelectual del presente trabajo de investigación quedan sujetos a lo dispuesto en la Política.

Asimismo, autorizo a la USFQ para que realice la digitalización y publicación de este trabajo de investigación en el repositorio virtual, de conformidad a lo dispuesto en el Art. 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior.

Firma: _____

Nombre: Esteban Nicolas Tamayo Pazmiño

C. I.: 1714439252

Lugar: Quito diciembre de 2014

RESUMEN

En esta investigación se presenta el análisis de los patrones de comportamiento diurnos de las variables meteorológicas: radiación solar, temperatura ambiente, humedad relativa, presión atmosférica, y velocidad y dirección del viento durante los meses de junio, julio y agosto de 2014 para el valle de Cumbayá, Ecuador. Este es el primer análisis que se realiza de estas variables en el valle de Cumbayá.

Las observaciones de radiación solar mostraron que existen 12 horas de luz solar en el día. La curva de variación diurna reveló que junio fue un mes nublado durante todo el día con un pico de radiación promedio de 600 W m^{-2} a las 11:30. Julio fue un mes con menor nubosidad y esto se tradujo en picos de radiación promedio de 1000 W m^{-2} alrededor de las 12:30. Agosto también mostró ser un mes con una baja cobertura de nubes en horas de las mañanas y el pico de radiación fue de 1000 W m^{-2} a las 12:00; no obstante, a partir de las 13:00 y durante toda la tarde se evidenció una cobertura de nubes considerable.

El análisis de las curvas de variación diurna de temperatura ambiente tiene una relación directa con la radiación solar, por ello la temperatura aumenta cuando sale el sol y las temperaturas más altas se registran a las 14:00. Los picos de temperatura hallados son de $22.6^{\circ}\text{C} \pm 2.5^{\circ}\text{C}$ en junio, $24^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ en julio, y $23^{\circ}\text{C} \pm 1.5^{\circ}\text{C}$ en agosto. Cielos despejados en julio resultaron en enfriamiento por radiación de la superficie más rápidos. Las temperaturas más bajas se dieron en la madrugada, registrando temperaturas de $13^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ para junio, $12^{\circ}\text{C} \pm 3^{\circ}\text{C}$ para julio y $12^{\circ}\text{C} \pm 2.5^{\circ}\text{C}$ para agosto.

La humedad relativa muestra que existe una anti correlación con la temperatura ambiente. Las curvas de variación diurna muestran que durante las madrugadas (temperaturas bajas) junio alcanza valores tan altos como el 90%, julio varía entre el 60 y 72%, y agosto muestra valores del 80%. Durante las 13:00 y 14:00 se alcanzó los valores mínimos de humedad relativa siendo junio el mes menos seco, con valores del 35%. Julio mostró valores del 29% y agosto presentó valores del 30%. En las noches cuando la temperatura empieza a disminuir, los valores de humedad relativa vuelven a alcanzar sus picos registrando 90% para junio y 78% para agosto. Julio en particular fue un mes con noches secas alcanzando valores máximos del 50%

La variación diurna promedio de la presión atmosférica revela ser una onda cíclica, con un periodo de 12 horas y una amplitud de 1.6 hPa, en la cual los valles se encuentran a las 16:00 y 04:00, mientras que las crestas se ubican a las 09:00 y 22:00.

Las curvas de variación diurna de velocidad del viento muestran un comportamiento general con: velocidades promedio bajas durante horas de la madrugada, máximos en horas de la tarde (15:00 y 16:00), y velocidades que disminuyen en la noche. Las velocidades en horas de la tarde para los meses de junio, julio y agosto varían entre 2 y 8 m s^{-1} , 2 y 13 m s^{-1} y 4 y 10 m s^{-1} respectivamente.

Respecto de la dirección del viento se ha hallado un patrón estacional durante los tres meses de verano, que viene del Sur y Sureste que se atribuye a la cercanía que existe con la Zona de Convergencia Intertropical y los vientos del este alrededor de la línea ecuatorial.

Finalmente hubo ausencia de lluvia durante junio, julio y agosto sin embargo se presenta un evento significativo de precipitación de 40.6 mm que ocurrió el 23 de mayo.

ABSTRACT

This research presents an analysis of behavior patterns of the meteorological variables: solar radiation, temperature, relative humidity, atmospheric pressure and wind speed and direction during the months of June, July and August 2104 for the valley Cumbayá, Ecuador. This is the first analysis done of these variables in the valley of Cumbayá,

Ground observations of solar radiation showed that there are 12 hours of daylight in the day. The curve of diurnal variation revealed that June was a cloudy month throughout the day with a peak radiation of 600 W m^{-2} at 11:30. July was a month with less cloud cover and resulted in a peak of 1000 W m^{-2} at 12:30. August also proved to be a month with a low cloud cover in the early morning and had a peak of 1000 W m^{-2} around 12:00; yet after 13:00, and all the afternoon a considerable cloud cover was evident.

The analysis of the diurnal variation curves for temperature is directly related to solar radiation, so the temperature rises when the sun and the highest temperatures are recorded at 14:00. Temperature peaks are found $22.6^{\circ}\text{C} \pm 2.5^{\circ}\text{C}$ in June, $24^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ in July and $23^{\circ}\text{C} \pm 1.5^{\circ}\text{C}$ in August. Clear skies in July resulted in faster radiative cooling. The lowest temperatures were in the early morning, recording temperatures of $13^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ for June, $12^{\circ}\text{C} \pm 3^{\circ}\text{C}$ in July and $12^{\circ}\text{C} \pm 2.5^{\circ}\text{C}$ in August.

Relative humidity shows that there is an inverse correlation with temperature. Diurnal variation curves show that during the early morning June reaches values as high as 90%, July varies between 60 and 72%, and August reaches values of 80%. During 13:00 and 14:00 minimum values of relative humidity were reached being June the less dry month with values of 35%, July had values of 29% and August presented values of 30%. During nights when temperature started to drop, relative humidity values again reach their peaks recording 90% for June and 78% for August. Particularly July was a month with dry nights reaching a maximum of 50%.

Atmospheric pressure is revealed to be a cyclical wave with a period of 12 hours and amplitude of 1.6 hPa where the valleys occur at 16:00 and 04:00, while the peaks are located at 09:00 and 22:00.

The diurnal variation curves of wind speed show a general behavior with low speeds in the early morning, reaching peaks in the afternoon (15:00 and 16:00) and lowering speeds at night. The speeds in the afternoon for the months of June, July and August vary between 2 and 8 m s^{-1} , 2 and 13 m s^{-1} , 4 and 10 m s^{-1} respectively.

With respect to the wind direction, a significant pattern of movement coming from the South and Southeast caused by the closeness that exists with the Intertropical Convergence Zone and easterlies wind around the equator.

Finally there was no significant precipitation during June, July and August; however a significant rainfall event of 40.6 mm during May 23 is presented.

Tabla de Contenidos

1	Introducción	10
1.1	Antecedentes	13
1.2	Objetivo General	14
1.2.1	Objetivos específicos	14
2	Marco Teórico	15
2.1	Radiación Solar	15
2.1.1	Espectro de emisión.....	15
2.1.2	Dependencia Astronómica.....	17
2.2	Humedad Relativa	23
2.3	Presión Atmosférica	24
2.4	Vector viento	25
2.4.1	Fuerza gradiente de presión	27
2.4.2	Escalas de movimiento atmosférico.....	28
2.4.3	Zona de convergencia intertropical.....	29
2.5	Precipitación.....	31
3	Métodos.....	32
3.1	Instalación de la Estación Meteorológica	32
3.2	Lugar de estudio	33
3.3	Materiales.....	34
3.4	Resolución temporal de adquisición de datos	35
3.5	Tratamiento de Datos	35
4	Resultados y Discusiones	37
4.1	Radiación Solar	37
4.2	Temperatura ambiente	43
4.3	Humedad Relativa	48
4.4	Presión Atmosférica	54
4.5	Velocidad y Dirección del viento	59
4.6	Precipitación.....	70
5	Conclusiones	71
6	Bibliografía	75

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1. EMISIVIDAD DE UN CUERPO NEGRO A 5900 K Y SU COMPARACIÓN CON EL ESPECTRO DE LA ENERGÍA ELECTROMAGNÉTICA EMITIDA POR EL SOL Y EL ESPECTRO SOLAR QUE RECIBE LA TIERRA EN CONDICIONES NORMALES A NIVEL DEL MAR DEBIDO A LA PRESENCIA DE FILTROS ATMOSFÉRICOS. FUENTE: HTTP://COMMONS.WIKIMEDIA.ORG/WIKI/FILE:SOLAR_SPECTRUM.PNG	16
FIGURA 2. POSICIÓN DE LA TIERRA CUANDO SE ENCUENTRA EN LAS POSICIONES DE AFELIO Y PERIHELIO. FUENTE NATIONAL AERONAUTICS AND SPACE ADMINISTRATION: HTTP://SOLARSYSTEM.NASA.GOV/SCITECH/DISPLAY.CFM?ST_ID=2517	18
FIGURA 3. CONSTANTE SOLAR EN EL TOPE DE LA ATMÓSFERA TERRESTRE. R_T REPRESENTA LA DISTANCIA ENTRE LA TIERRA Y EL SOL, Y R_s EL RADIO DEL SOL	18
FIGURA 4. MOVIMIENTO DE LA TIERRA ALREDEDOR DEL SOL, DONDE SE MUESTRA LA INCLINACIÓN DEL PLANETA Y LAS POSICIONES DE LA TIERRA CUANDO OCURREN LOS SOLSTICIOS Y EQUINOCIOS. FUENTE: (AHRENS,2009)	20
FIGURA 5. ESQUEMA DE MEDICIÓN DEL ÁNGULO ZENIT PARA UN OBSERVADOR EN LA SUPERFICIE DE LA TIERRA	21
FIGURA 6. ESQUEMA DE COORDENADAS PARA LA MEDICIÓN DEL ÁNGULO HORA.	22
FIGURA 7. CURVA DE VAPOR DE PRESIÓN DE AGUA CON RESPECTO A LA TEMPERATURA.	24
FIGURA 8. SISTEMA DE COORDENADAS UTILIZADO EN MEDICIONES METEOROLÓGICAS.....	26
FIGURA 9. DIAGRAMA DE LAS ESCALAS A LAS QUE SE PRESENTAN LOS DISTINTOS MOVIMIENTOS DEL VIENTO BASADO EN SU ALCANCE ESPACIAL Y TEMPORAL.FUENTE: AHRENS,2009	29
FIGURA 10. ESQUEMA DE LA ZONA DE CONVERGENCIA INTERTROPICAL	30
FIGURA 11. MAPA DE UBICACIÓN DE LA ESTACIÓN DE MEDICIONES ATMOSFÉRICAS EMA – USFQ, CON RESPECTO A LA CIUDAD DE QUITO, ECUADOR. EL GLOBOAZUL REPRESENTA LA UBICACIÓN DE LA EMA; LAS COORDENAS DE LA ESTACIÓN SON: $0^{\circ}11'47.37''$ S, $78^{\circ}26' 6.56''$ W.	33
FIGURA 12. SERIES DE TIEMPO DE DATOS DE 1 MINUTO DEL FLUX DE RADIACIÓN SOLAR PARA A) JUNIO, B) JULIO Y C) AGOSTO EN EL VALLE DE CUMBAYÁ, ECUADOR.	40
FIGURA 13. PERFILES DIURNOS DEL FLUX DE RADIACIÓN SOLAR PARA A) JUNIO, B) JULIO, C) AGOSTO EN EL VALLE DE CUMBAYÁ. LOS PUNTOS VERDES SON TODOS LOS PUNTOS TOMADOS EN EL MES. LA LÍNEA AZUL REPRESENTA LA VARIACIÓN DIURNA DE MEDIANA (VDM) CADA 30 MINUTOS.	41
FIGURA 14. ANÁLISIS DE RADIACIÓN SOLAR DE UN DÍA PARA CADA MES. EL MES DE JUNIO MUESTRA EL DÍA 13, EL MES DE JULIO MUESTRA EL DÍA 23, Y EL MES DE AGOSTO MUESTRA EL DÍA 2.	42
FIGURA 15. VARIACIONES DIURNAS DEL FLUX DE RADIACIÓN SOLAR, SUPERPUSTAS MENSUALMENTE PARA EL VALLE DE CUMBAYÁ. PARA JUNIO (AZUL), JULIO (NEGRO) Y AGOSTO (VERDE).	42
FIGURA 16. SERIES DE TIEMPO DE DATOS DE 1 MINUTO DE TEMPERATURA AMBIENTE PARA A) JUNIO, B) JULIO Y C) AGOSTO EN EL VALLE DE CUMBAYÁ, ECUADOR.....	45
FIGURA 17. PERFILES DIURNOS DE TEMPERATURA AMBIENTE PARA A) JUNIO, B) JULIO, C) AGOSTO EN EL VALLE DE CUMBAYÁ. LOS PUNTOS NARANJA SON TODOS LOS PUNTOS TOMADOS EN EL MES. LA LÍNEA NEGRA REPRESENTA LA VARIACIÓN DIURNA DE MEDIANA (VDM) CADA 30 MINUTOS.	46
FIGURA 18. VARIACIONES DIURNAS DE TEMPERATURA AMBIENTE, SUPERPUSTAS MENSUALMENTE PARA EL VALLE DE CUMBAYÁ. PARA JUNIO (AZUL), JULIO (NEGRO) Y AGOSTO (VERDE).	47
FIGURA 19. SERIES DE TIEMPO DE DATOS DE 1 MINUTO DE HUMEDAD RELATIVA PARA A) JUNIO, B) JULIO Y C) AGOSTO EN EL VALLE DE CUMBAYÁ, ECUADOR.....	51
FIGURA 20. PERFILES DIURNOS DE HUMEDAD RELATIVA PARA A) JUNIO, B) JULIO, C) AGOSTO EN EL VALLE DE CUMBAYÁ. LOS PUNTOS ROSADOS SON TODOS LOS PUNTOS TOMADOS EN EL MES. LA LÍNEA NEGRA REPRESENTA LA VARIACIÓN DIURNA DE MEDIANA (VDM) CADA 30 MINUTOS.	52
FIGURA 22. RELACIÓN QUE EXISTE ENTRE TEMPERATURA Y HUMEDAD RELATIVA. EL GRÁFICO MUESTRA EL COMPORTAMIENTO DE ESTAS VARIABLES DURANTE EL 5 DE JULIO DE 2014.	53

FIGURA 21. VARIACIONES DIURNAS DE HUMEDAD RELATIVA, SUPERPUESTAS MENSUALMENTE PARA EL VALLE DE CUMBAYÁ. PARA JUNIO (AZUL), JULIO (NEGRO) Y AGOSTO (VERDE).....	53
FIGURA 23. SERIES DE TIEMPO DE DATOS DE 1 MINUTO DE PRESIÓN ATMOSFÉRICA PARA A) JUNIO, B) JULIO Y C) AGOSTO EN EL VALLE DE CUMBAYÁ, ECUADOR.....	56
FIGURA 24. PERFILES DIURNOS DE LA PRESIÓN ATMOSFÉRICA PARA A) JUNIO, B) JULIO, C) AGOSTO EN EL VALLE DE CUMBAYÁ. LOS PUNTOS GRISES SON TODOS LOS PUNTOS TOMADOS EN EL MES. LA LÍNEA NEGRA REPRESENTA LA VARIACIÓN DIURNA DE MEDIANA (VDM) CADA 30 MINUTOS.	57
FIGURA 25. VARIACIONES DIURNAS DE PRESIÓN ATMOSFÉRICA, SUPERPUESTAS MENSUALMENTE PARA EL VALLE DE CUMBAYÁ. PARA JUNIO (AZUL), JULIO (NEGRO) Y AGOSTO (VERDE).....	58
FIGURA 26. SERIES DE TIEMPO DE DATOS DE 1 MINUTO DE DIRECCIÓN DEL VIENTO PARA A) JUNIO, B) JULIO Y C) AGOSTO EN EL VALLE DE CUMBAYÁ, ECUADOR.....	63
FIGURA 27. PERFILES DIURNOS DE DIRECCIÓN DEL VIENTO PARA A) JUNIO, B) JULIO, C) AGOSTO EN EL VALLE DE CUMBAYÁ. LOS PUNTOS AZULES SON TODOS LOS PUNTOS TOMADOS EN EL MES. LA LÍNEA NEGRA REPRESENTA LA VARIACIÓN DIURNA DE MEDIANA (VDM) CADA 30 MINUTOS.	64
FIGURA 28. SERIES DE TIEMPO DE DATOS DE 1 MINUTO DE VELOCIDAD DEL VIENTO PARA A) JUNIO, B) JULIO Y C) AGOSTO EN EL VALLE DE CUMBAYÁ, ECUADOR.....	65
FIGURA 29. PERFILES DIURNOS DE VELOCIDAD DEL VIENTO PARA A) JUNIO, B) JULIO, C) AGOSTO EN EL VALLE DE CUMBAYÁ. LOS PUNTOS VERDES SON TODOS LOS PUNTOS TOMADOS EN EL MES. LA LÍNEA NEGRA REPRESENTA LA VARIACIÓN DIURNA DE MEDIANA (VDM) CADA 30 MINUTOS.	66
FIGURA 30. VARIACIONES DIURNAS DE VELOCIDAD DEL VIENTO, SUPERPUESTAS MENSUALMENTE PARA EL VALLE DE CUMBAYÁ. PARA JUNIO (AZUL), JULIO (NEGRO) Y AGOSTO (VERDE).....	67
FIGURA 31. ROSAS DE VIENTOS PARA LOS MESES DE JUNIO Y JULIO.	68
FIGURA 32. ROSA DE VIENTOS PARA EL MES DE AGOSTO	69
FIGURA 33. PRECIPITACIÓN CON UN VALOR TOTAL DE 40.6 MM REGISTRADA DURANTE EL 23 DE MAYO DEL 2014 EN CUMBAYÁ, ECUADOR.....	71

1 Introducción

El estudio de la meteorología es trascendental puesto que influye directamente en la vida de las personas en aspectos ambientales, económicos y sociales. Ambientalmente la presencia de altas concentraciones de contaminante o la dispersión de los mismos van a estar determinada por condiciones atmosféricas básicas (Steenefeld & Holtslag, 2010). Épocas de siembra y cultivo, fenómenos naturales como tormentas e incluso inundaciones, que suponen un impacto económico serio y riesgos a la vida y salud de las personas se pueden prevenir y evaluar haciendo uso de datos meteorológicos. Finalmente actividades diarias de las personas como viajes, eventos, y actividades recreativas son planificados según las condiciones meteorológicas (WMO, 2014).

Uno de los campos de estudio dentro de la meteorología es la observación de variables meteorológicas en estaciones terrenas. Las observaciones meteorológicas son necesarias para satisfacer necesidades económicas, sociales y ambientales. Las redes de monitoreo meteorológico forman parte de la gestión integral para reducir el riesgo de pérdida de vida y daños a la propiedad (Plummer, Allsop, & Lopez, 2003). Además de que existe una gran demanda por información meteorológica que se usa en una amplia gama de campos como: pronósticos del tiempo, modelos de contaminación atmosférica, estudios de ecología, planes de gestión ambiental y estudios energéticos.

En el campo ambiental conocer la información meteorológica de un sitio es necesaria para llevar a cabo proyectos energéticos, como proyectos de energía renovable que necesitan conocer información como radiación solar y velocidad y dirección del viento para maximizar la eficiencia y obtención de energía (Banta, Pichugina , Kelley, Hardesty , & Brewer , 2013) (Australian renewable energy Agency, 2013).

La información meteorológica es especialmente útil en la aplicación de modelos de calidad del aire, donde el conocimiento de las variables meteorológicas es necesaria para ser utilizada como condiciones de borde en el desarrollo de un modelo (Bultjcs, 2004). Cuando existen casos de contaminación puntuales, la información meteorológica es particularmente valiosa para evaluar de manera acertada la dispersión del contaminante y al mismo tiempo minimizar la incertidumbre del modelo (Arciszewska & McClatchey, 2001) (Pleim, Mathur, & Rrao, 2014).

En Ecuador la institución a cargo del monitoreo de las variables meteorológicas a nivel nacional es el Instituto de Meteorología e Hidrología (INAMHI). Esta institución es responsable por los pronósticos meteorológicos del país, investigación meteorológica y mantenimiento y operación de la red meteorológica (INAMHI, 2014). El INAMHI bajo su obligación de informar al público sobre las condiciones meteorológicas, los recursos hídricos y el clima, ha instalado 378 estaciones convencionales en todo el país (Red de estaciones Meteorológicas, 2014).

La Secretaría de Ambiente del Municipio Metropolitano de Quito también ha hecho esfuerzos y ha establecido su propia red de monitoreo meteorológico en la ciudad de Quito llamado: Red Metropolitana de Monitoreo Atmosférico (REMMAQ). Junto a la red de monitoreo de calidad de aire, la Secretaría de Ambiente busca realizar estudios de calidad del aire con el fin de proteger la salud pública y controlar y evaluar la calidad del aire de la ciudad (Secretaría de Ambiente, 2013).

Dado que las condiciones meteorológicas varían de un lugar a otro, en especial en Ecuador en donde la topología del territorio da lugar a la formación de microclimas, es usual encontrar condiciones meteorológicas distintas en lugares relativamente cercanos. Por ello, es importante que exista una red de monitoreo de una gran extensión de área de una ciudad

como Quito, para que de tal manera se pueda capturar los cambios del clima en forma representativa, en las diferentes localidades. Adicionalmente la comunidad académica y científica del país necesita de datos meteorológicos que son indispensables para llevar a cabo investigaciones de distintas índoles como: estudios de calidad del aire, energías renovables, hidrología, aeronáutica, arquitectura y urbanismo, etc (Almorox, s.f).

Esta investigación presenta el primer análisis que existe para el valle de Cumbayá, Ecuador de observaciones terrenas tomadas durante los meses de junio, julio y agosto en la Estación de Mediciones Atmosféricas (EMA) de la Universidad San Francisco de Quito

1.1 Antecedentes

Aun con los esfuerzos del INAMHI y la Secretaría de Ambiente del DMQ, el valle de Cumbayá, adyacente a la ciudad de Quito, no posee una estación meteorológica que pueda monitorear las condiciones atmosféricas de este lugar. La estación más cercana es aquella instalada por la Secretaría de Ambiente en el valle Tumbaco, ubicada a 2331 metros de altitud, es decir 60 metros por debajo de Cumbayá y a 8 km de distancia. Por lo tanto las redes de monitoreo mencionadas no cuentan con datos meteorológicos y de calidad de aire, para la localidad de Cumbayá.

En el verano de 2014, en la Universidad San Francisco de Quito, se fundó el Instituto de Investigaciones Atmosféricas (IIA - USFQ), bajo la dirección de P.I (Principal Investigator, por sus sigla en inglés), M. Cazorla. El IIA-USFQ se ha establecido con el propósito de contribuir al entendimiento de los fenómenos meteorológicos, y los mecanismos de origen, transporte y destino de los contaminantes del aire (IIA-USFQ, 2014). El IIA-USFQ cuenta con una Estación de Mediciones Atmosféricas (EMA), ubicada en el campus principal de Cumbayá de la USFQ, donde se toman datos de meteorología y calidad del aire continuamente en el tiempo. Los datos meteorológicos están registrando las condiciones atmosféricas del valle de Cumbayá desde el 22 de mayo de 2014.

La presencia de una estación meteorológica que genera datos con una resolución temporal alta, beneficia a la comunidad que vive y trabaja en el valle de Cumbayá, además de que contribuye con información de línea base para ejecutar e interpretar investigaciones científicas de naturaleza diversa que se realizan en la USFQ.

1.2 Objetivo General

Determinar el comportamiento de las variables meteorológicas: radiación solar, temperatura ambiente, humedad relativa, presión atmosférica, velocidad del viento, dirección del viento y precipitación en el valle de Cumbayá, Ecuador durante los meses de junio julio y agosto de 2014 y definir patrones de variación diurnos.

1.2.1 Objetivos específicos

- Generar series de tiempo y perfiles de variación diurna de las condiciones meteorológicas en el valle de Cumbayá para los meses de junio, julio y agosto de 2014.
- Identificar días en los cuales se observaron eventos meteorológicos significativos y proponer una interpretación física de los mismos.
- Establecer las razones físicas por las cuales los fenómenos meteorológicos suceden de la manera observada en la EMA.

:

2 Marco Teórico

El siguiente marco teórico explica los conceptos físicos de radiación solar, temperatura, humedad relativa, presión atmosférica, velocidad del viento, dirección del viento y precipitación que corresponden a las variables meteorológicas que actualmente se están midiendo en la Estación de Mediciones Atmosféricas de la USFQ.

2.1 Radiación Solar

La radiación solar que se experimenta en el planeta Tierra está condicionada por factores como la atenuación de la radiación por filtros atmosféricos y la posición astronómica de la tierra con respecto al sol. A continuación se presenta los conceptos físicos de estas variables y su importancia en las mediciones de radiación solar.

2.1.1 Espectro de emisión.

La energía del sol que llega al planeta es responsable de la mayoría de los ciclos físicos y biológicos de este sistema. Radiación solar es la energía radiante, definida como energía electromagnética que emite el sol y que se propaga en forma de ondas (Giancoli, 2009). Todo cuerpo cuya temperatura esté por encima del cero absoluto, va a emitir radiación, sin importar su forma o tamaño. Entonces, la energía que emite un cuerpo es función de su temperatura. Este fenómeno lo explica la ley de Stefan – Boltzman, descrita en la ecuación 1, donde E es la densidad del flux de radiación, en $[W m^{-2}]$, σ corresponde a la constante de Stefan –Boltzman y tiene un valor de $5.67 \times 10^{-8} [J s^{-1}m^{-2}K^{-4}]$, A es el área superficial del cuerpo en $[m^{-2}]$, y T es su temperatura en $[K]$. Por lo tanto, cuerpos con una mayor temperatura emiten mayor flux de radiación.

$$E = \sigma AT^4 \quad (1)$$

El espectro emitido por el sol es un continuo, compuesto por distintas longitudes de onda. La Figura 1 muestra en línea negra el espectro de emisión de un cuerpo negro con una temperatura de 5900 K. Un cuerpo negro es un emisor perfecto y su curva de emisión está dada por la función de distribución de Planck (Wallace & Hobbs, 2006). Integrando la función de distribución en todas las longitudes de onda se obtiene la densidad del flux de radiación que se calcula mediante la ecuación 1. El espectro de emisión del sol en el tope de la atmósfera se superpone al modelo del cuerpo negro emitiendo a 5900 K que se muestra con línea negra en la Figura 1. Sin embargo la cantidad de radiación que llega a la superficie de la tierra es distinto del que llega al tope de la atmósfera. Esto se debe a que filtros atmosféricos como: moléculas de nitrógeno, oxígeno y la capa de ozono, atenúan la cantidad de energía por absorción o dispersión en el ultravioleta, entonces el espectro de la luz del día a nivel del mar sigue la tendencia que se muestra en color rojo en la Figura 1.

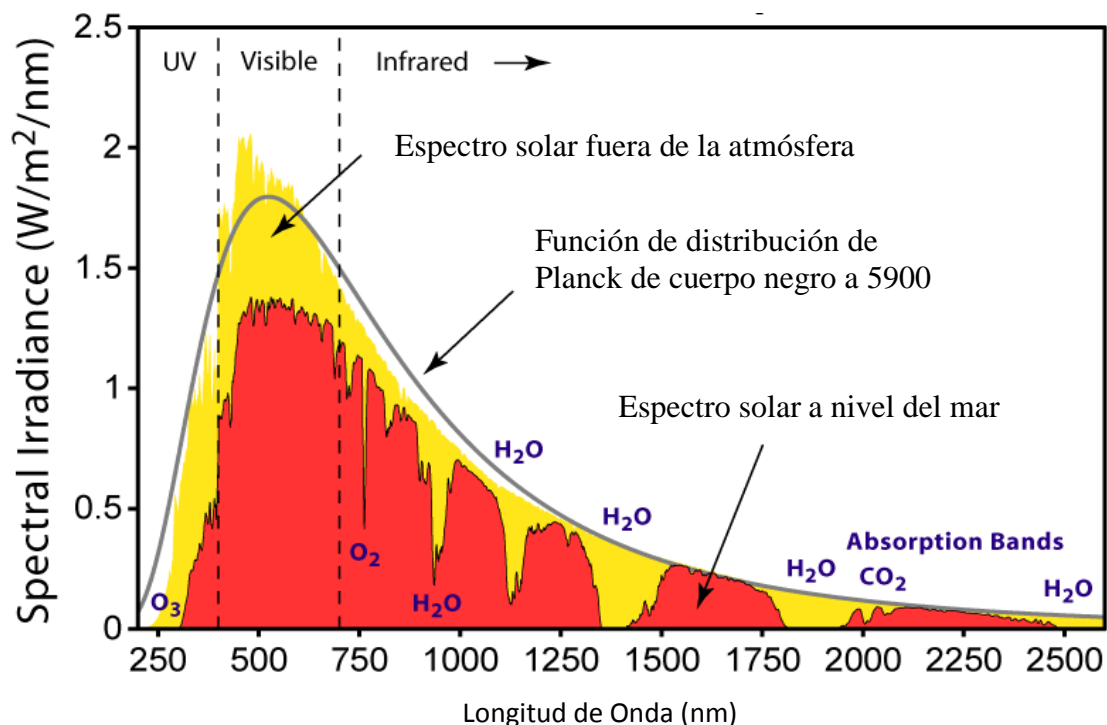


Figura 1. Emisividad de un cuerpo negro a 5900 K y su comparación con el espectro de la energía electromagnética emitida por el sol y el espectro solar que recibe la tierra en condiciones normales a nivel del mar debido a la presencia de filtros atmosféricos.

El pico de longitud de onda de emisión cualquiera se lo puede determinar mediante la ley de desplazamiento de Wien

$$\lambda_{max} = \frac{\text{Constante}}{\text{Temperatura}} \quad (2)$$

Es así que tomando la ecuación 2 se puede determinar que el pico máximo de longitud de onda a la que el sol emite radiación es de 0.5 μm . No obstante el sol emite el 99% de radiación con distintas longitudes de onda extendiéndose desde la radiación ultravioleta hasta el infrarrojo (Godish, 1991), siendo la región visible del espectro electromagnético los picos más altos de emisión. El 44% de toda la radiación que emite el sol se encuentra en la región visible (0.4 – 0.7 μm) mientras que el 11% corresponde a radiación ultravioleta, 37% a radiación infrarroja y 11% a radiación en el infrarrojo lejano (Ahrens, 2009).

2.1.2 Dependencia Astronómica

La radiación solar incidente en la superficie del planeta depende directamente de la posición de la Tierra con respecto al sol. El movimiento del planeta tierra se aproxima a un plano elíptico. Existen épocas cuando la Tierra está más cerca del sol, como enero, y otras cuando está más lejos del sol como, el mes de julio. Estas posiciones se han denominado como perihelio y afelio para denotar cuando la tierra está más cerca y más lejos del sol respectivamente. (NASA, 2014). La figura 2 representa la posición de la tierra cuando se encuentra en los puntos de Afelio y Perihelio.

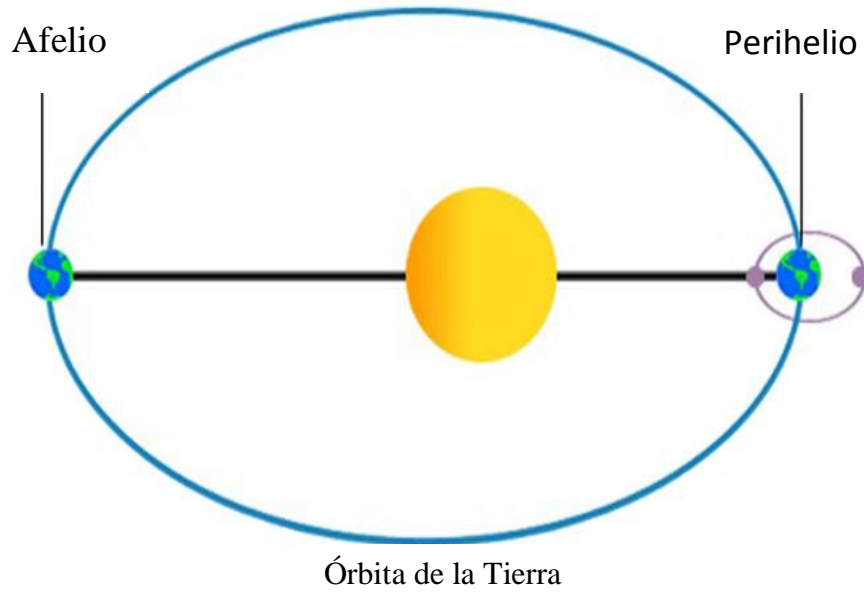


Figura 2. Posición de la tierra cuando se encuentra en las posiciones de Afelio y Perihelio. Fuente National Aeronautics and Space Administration: http://solarsystem.nasa.gov/scitech/display.cfm?ST_ID=2517

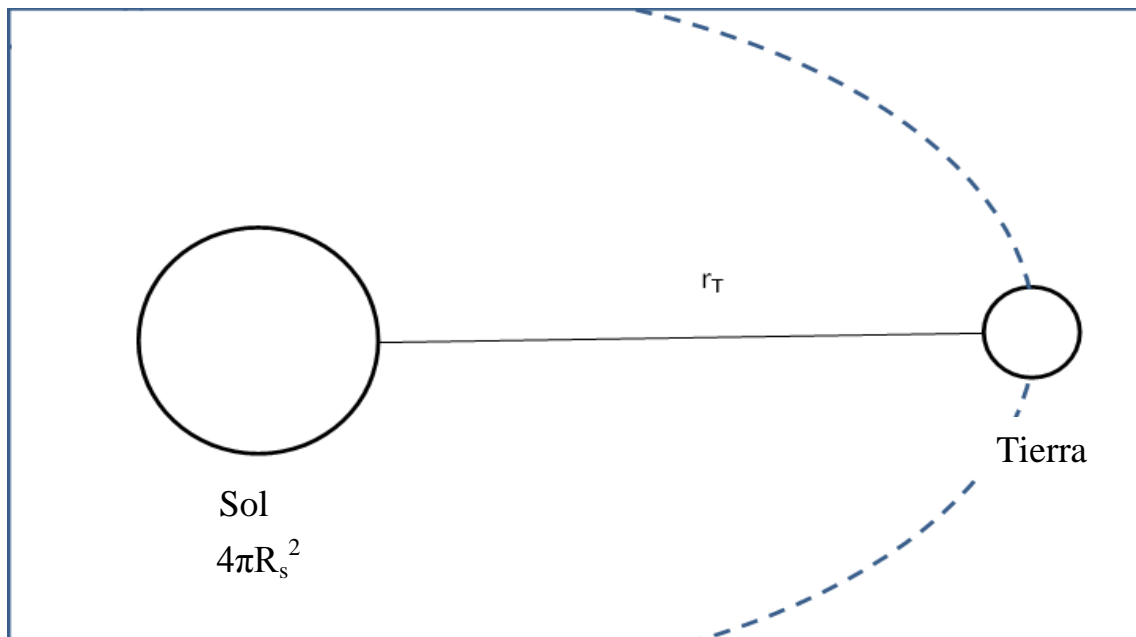


Figura 3. Constante solar en el tope de la atmósfera terrestre. r_T representa la distancia entre la tierra y el sol, y R_s el radio del sol

La Figura 3 es una representación del sol y la tierra que permite realizar el cálculo de la cantidad de energía solar que llega al tope de la atmósfera. Para ello, hay que considerar la energía que emite el sol, que se calcula mediante la ecuación 1. Además, se debe tomar en cuenta que el sol es una esfera y emite energía en toda su área superficial. Por lo tanto la energía que emite el sol (P_s) en un segundo se expresa según la ecuación 3:

$$P_s = \sigma T_s^4 (4\pi R_s^2) \quad (3)$$

Donde R_s es el radio del sol y tiene un valor de $6.7 \times 10^8 \text{ m}$, T_s es la temperatura del sol que se modela a una temperatura de 5900 K.

La energía liberada por el sol recae en la tierra, una esfera que se mueve alrededor del sol con un radio de movimiento r_T con un valor de $1.5 \times 10^{11} \text{ m}$, por lo tanto la energía recibida (S) por unidad de área se describe de acuerdo a la ecuación 4

$$S = \frac{\sigma T_s^4 (4\pi R_s^2)}{4\pi r_T^2} \quad (4)$$

A partir de la ecuación 4 y con los datos antedichos se puede determinar que el valor de la constante solar es de $1354 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$.

La inclinación del eje de la tierra con respecto al plano elíptico de la tierra alrededor del sol, se denomina ángulo de declinación solar, y es un factor determinante que define la cantidad de radiación que alcanza la superficie. El ángulo de declinación solar va de -23.5° hasta 23.5° . Una declinación de 23.5° marca el solsticio de verano y el inicio del verano en el hemisferio norte e invierno en el hemisferio sur. Cuando la declinación es de -23.5° se da el solsticio de

invierno y con ello el inicio del verano en el hemisferio sur y el invierno en el hemisferio norte. Asimismo cuando la declinación es de 0° se experimenta los equinoccios de primavera y otoño. La Figura 4 presenta la posición de la tierra con respecto al sol en los momentos de los equinoccios, y de los solsticios que ocurren durante un año. Por lo tanto el ángulo de declinación de la tierra es una de las razones por la cual se experimenta estaciones climáticas en distintas latitudes. (Ahrens, 2009).

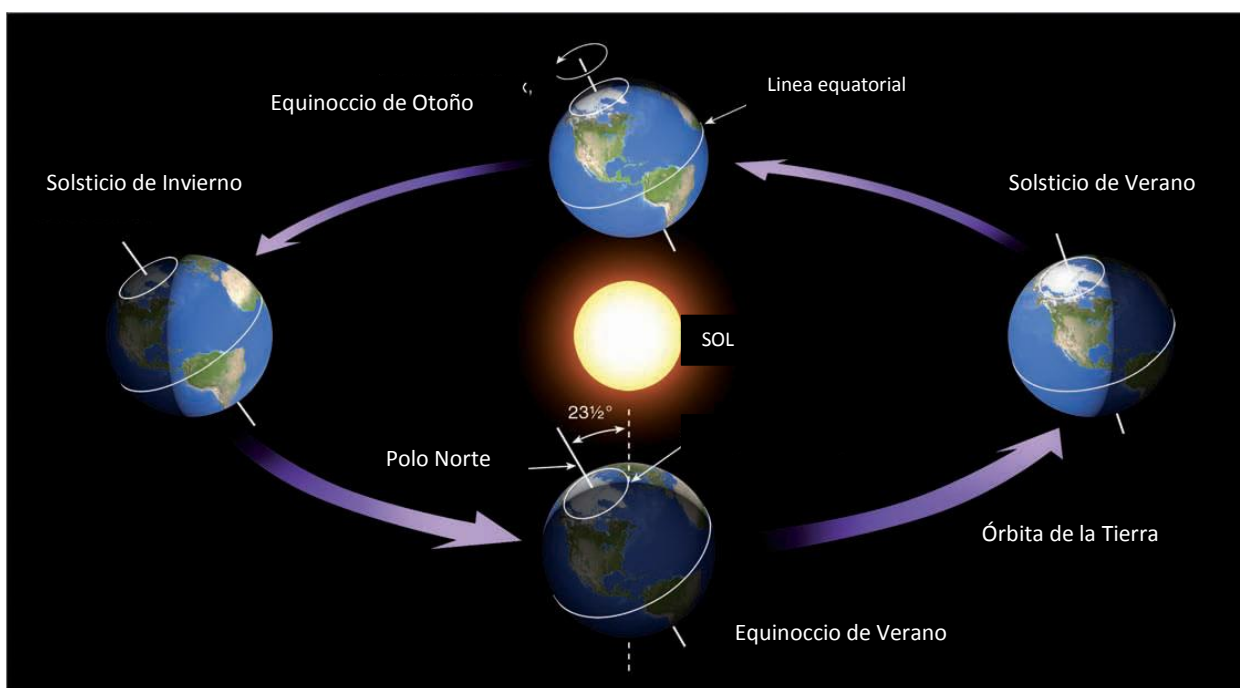


Figura 4. Movimiento de la tierra alrededor del sol, donde se muestra la inclinación del planeta y las posiciones de la Tierra cuando ocurren los solsticios y equinoccios. Fuente: (Ahrens,2009)

La disponibilidad de energía solar en la superficie es el de es el ángulo solar zenit (ASZ). El zenit es el ángulo que forma la vertical del observador y la posición del sol a un cierto tiempo. La ecuación 5 permite calcular el ángulo zenit a cualquier latitud y a cualquier tiempo y estación.

$$\cos(\theta_z) = \sin(\varphi) \sin(\delta) + \cos(\varphi)\cos(\delta) \cos(h) \quad (5)$$

En la ecuación 5 θ_z es el ángulo zenit, φ es la latitud de un sitio, δ es la declinación del sol y h hace referencia al ángulo hora. La Figura 5 muestra una representación de cómo se mide el ángulo zenit para un punto en la superficie de la tierra. Mientras que la Figura 6 es una representación de cómo se mide el ángulo hora antes de las 12:00 y después de las 12:00.

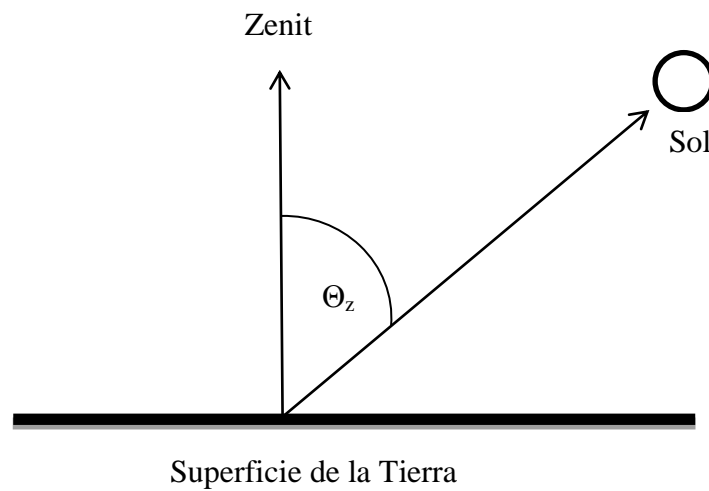


Figura 5. Esquema de medición del ángulo zenit para un observador en la superficie de la Tierra.

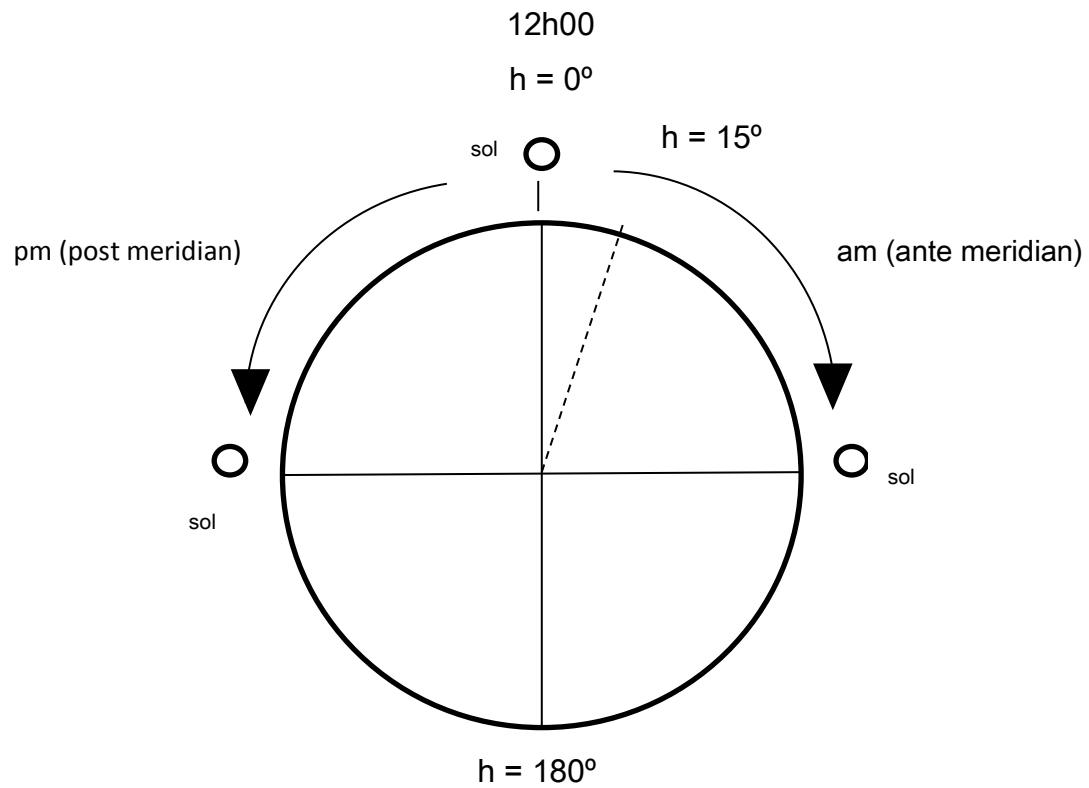


Figura 6. Esquema de coordenadas para la medición del ángulo hora.

Es así que a partir de la ecuación 5 se puede calcular el hecho que en Ecuador el ángulo zenit es igual al ángulo de declinación del planeta tierra.

$$\cos(\theta_z) = \sin(23.5) \sin(0) + \cos(23.5) \cos(0) \cos(0) \quad (6)$$

$$\cos(\theta_z) = 0 + \cos(23.5) \cos(0) \cos(0) \quad (7)$$

$$\theta_z = 23.5^\circ \quad (8)$$

2.2 Humedad Relativa

Humedad relativa se define como la razón que existe entre la presión parcial del vapor de agua en el aire ambiente con respecto de la presión de saturación a la temperatura del aire ambiente. Por lo tanto la humedad relativa es función de la temperatura y el contenido de humedad (NOAA, 2014) (Ahrens, 2009). La presión parcial del vapor de agua está asociada a la concentración de agua presente en la atmósfera por la ley de Dalton. La humedad relativa se expresa según la ecuación 9. Donde HR es el porcentaje de humedad relativa, p es la presión parcial del vapor de agua, y p_{sat} es la presión de saturación a cierta temperatura dada.

$$HR = \frac{p}{p_{sat}} * 100\% \quad (9)$$

La humedad relativa en el aire varía durante el día y esto, según la ecuación 9, se da por dos razones: un cambio en el contenido de vapor de agua o un cambio en la temperatura. Cuando hay más abundancia de vapor de agua, la presión parcial aumenta y según la ecuación 9, la humedad relativa también incrementa. Por lo tanto procesos como evaporación y movimientos convectivos o advectivos de viento que traen masas de aire con un contenido de vapor de agua influyen en el porcentaje de humedad relativa.

La influencia de la temperatura en la humedad relativa se puede explicar usando la curva de equilibrio líquido-vapor del agua que se muestra en la Figura 7. Esta figura muestra la dependencia de la presión del vapor de agua con la temperatura. Por lo tanto, cuando existe un

aumento de temperatura la presión de saturación aumenta y, en la ecuación 9, si la presión de saturación es mayor, entonces la humedad relativa disminuye.

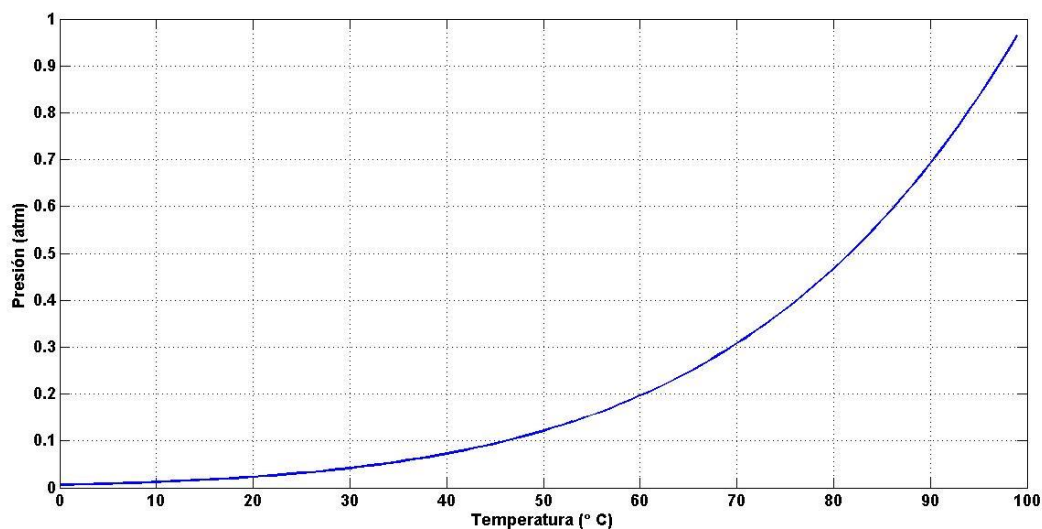


Figura 7. Curva de vapor de presión de agua con respecto a la temperatura.

2.3 Presión Atmosférica

La presión atmosférica en cualquier punto está dada por la fuerza por unidad de área que ejerce la masa de la atmósfera en la superficie subyacente por la atracción gravitacional de la tierra (Wallace & Hobbs, 2006). La presión atmosférica va a estar sujeta al tamaño de la columna de aire que se encuentre en la atmósfera, es así que a mayor altitud la presión atmosférica disminuye porque la columna de aire disminuye. El fenómeno de variación de la presión atmosférica con la altitud se describe según un balance hidrostático (ecuación 10) que toma en cuenta el balance que existe entre la fuerza de gravedad y de presión.

$$\frac{dp}{dz} = -\rho g \quad (10)$$

En la (ecuación 10) se puede expresar la densidad como se muestra en la ecuación 11 donde PM es el peso molecular, p es la presión, R la constante universal de los gases y T la temperatura ambiente. Es así que se puede separar las variables en el balance hidrostático, de la cual después de integrar se obtiene la ecuación 12 que es una expresión que muestra la variación de la presión atmosférica según la altitud

$$\rho = \frac{PMp}{RT} \quad (11)$$

$$p = p_0 \exp\left(-\frac{PMg}{RT} z\right) \quad (12)$$

Usando la ecuación 12 se puede calcular la presión atmosférica como función de la altitud. Por ejemplo a una temperatura de 25 °C a nivel del mar se esperaría una presión de 1 atm, en ciudades como Guayaquil que se encuentra a 47 msnm, se esperaría una presión de 0.99 atm y para el valle de Cumbayá a 2391 msnm se esperaría una presión atmosférica de 0.76 atm. No obstante, estos valores sufren variaciones, y esto se debe al calentamiento e enfriamiento de las masas de aire que provocan oscilaciones en la densidad llamadas olas atmosféricas o termales (Ahrens, 2009).

2.4 Vector viento

Para comprender el movimiento de los vientos es necesario explicar el sistema de coordenadas en el cual se mide esta variable meteorológica. En meteorología la dirección se mide empezando en el Norte geográfico que representa 0° y se mueve en dirección de las manecillas del reloj, donde 90° es Este, 180° es Sur, 270° es Oeste, y 360° representa también al Norte. Este sistema se puede visualizar en la

Figura 8, en donde el viento se mueve en cualquier dirección como un vector en el plano. El viento entonces se mide desde la dirección en la que sopla, esto quiere decir que un viento de 45° viene del Noreste, un viento de 135° viene del Sureste y un viento de 315° viene del Noroeste.

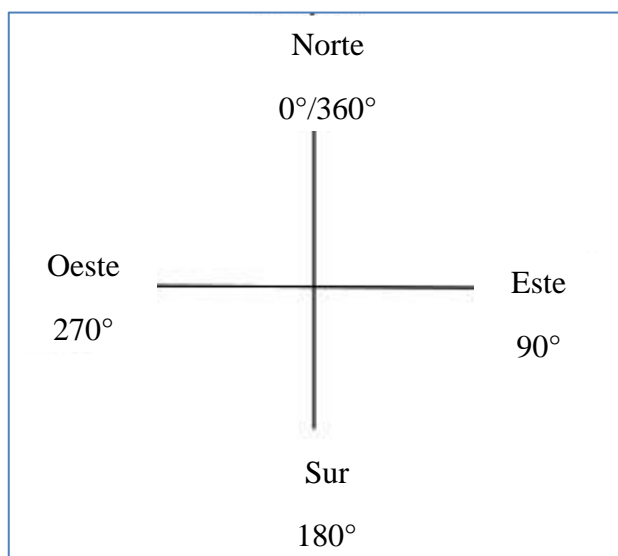


Figura 8. Sistema de Coordenadas utilizado en mediciones meteorológicas

El viento es un desplazamiento de las masas de aire provocado por las diferencias de presión y temperatura entre regiones (Calvo, 2002). El viento es una cantidad vectorial puesto que está constituida por velocidad y dirección. Es así que el vector viento es resultante de una

componente zonal y una componente meridional. Los movimientos del viento horizontales de Oeste a Este o de Este a Oeste se denomina componente zonal (u) del viento y todo movimiento que ocurra de Norte a Sur o de Sur a Norte se denomina como componente meridional (v) del viento (Wallace & Hobbs, 2006) . Estas componentes están descritas por la ecuación 13 donde u es la componente zonal y v es la componente meridional El viento, al ser un vector, también posee una tercera componente (w) que corresponde a la turbulencia del viento. En este trabajo no se realiza un análisis sobre esta componente.

$$u = \frac{dx}{dt}; v = \frac{dy}{dt}; w = \frac{dz}{dt} \quad (13)$$

Al ser una magnitud vectorial el vector viento se conforma según esta descrito en la ecuación 14:

$$V = \vec{u}\mathbf{i} + \vec{v}\mathbf{j} \quad (14)$$

Donde \mathbf{i} es el vector unitario de la componente zonal y \mathbf{j} el vector unitario de la componente meridional. Es así que para realizar mediciones de viento se utiliza un anemómetro, con la finalidad de obtener mediciones independientes de velocidad y de dirección del viento en grados.

2.4.1 Fuerza gradiente de presión

El movimiento del viento sucede por la fuerza de gradiente de presión (FGP). La razón por la cual existe esta diferencia de presiones, que genera movimiento es la diferencia en las masas de aire, que a su vez está relacionada con cambios en la temperatura. Cuando la temperatura del aire aumenta el aire se vuelve menos denso y se eleva, mientras que si la temperatura es más baja, el aire es más denso. La diferencia de presiones entre dos masas de aire hace que el

aire fluya de mayor a menor presión, puesto que se genera movimiento, se genera aceleración y por lo tanto fuerza (Ahrens, 2009).

2.4.2 Escalas de movimiento atmosférico.

Desde el punto de vista de circulación global, la jerarquía de los movimientos atmosféricos desde pequeñas ráfagas hasta movimientos planetarios de la atmósfera se categorizan en lo que se denomina escala de movimiento (Ahrens, 2009). Entender el concepto de escala es fundamental para conocer el movimiento de los vientos, y a que escala se realizan las mediciones.

El movimiento de los vientos se dividen en tres escalas: microescala, mesoescala y macroescala como se ilustra en la Figura 9. Los vientos que se encuentran dentro de una microescala se refieren a remolinos y turbulencias de pocos metros en diámetro, que dispersan el humo y levantan polvo, tienen tiempos de duración muy cortos de segundos hasta unos pocos minutos y por lo general son los vientos que se forman en la capa límite atmosférica (Ahrens, 2009) . Vientos que ocurren a nivel de toda una ciudad, constituyen una mesoescala. Los vientos a este nivel se subdividen en Meso – γ , Meso – β y Meso – α . Según su dimensión. Meso – γ hace referencia a viento mayores a 2 km, Meso – β a vientos mayores a los 20 km y Meso – α ha viento mayores a 200 km de diámetro (Wallace & Hobbs, 2006) y tienen lapsos de duración que van desde varios minutos, horas y hasta todo el día, por ejemplo, tormentas locales y tornados. Finalmente la macroescala se divide en: escala sinóptica y escala planetaria. La escala planetaria muestra los vientos que circulan a nivel global (Oke, 2004) (Wallace & Hobbs, 2006), mientras que la escala óptica muestra los vientos a nivel regional, que se extienden a cientos de kilómetros cuadrados, como por ejemplo ciclones y anticiclones.

Por lo general los pronósticos del tiempo se realizan a una escala sinóptica ya que a esta escala se logra mostrar la influencia de distintas variables meteorológicas en un mapa y la interdependencia que existe (Knievel, 2005).

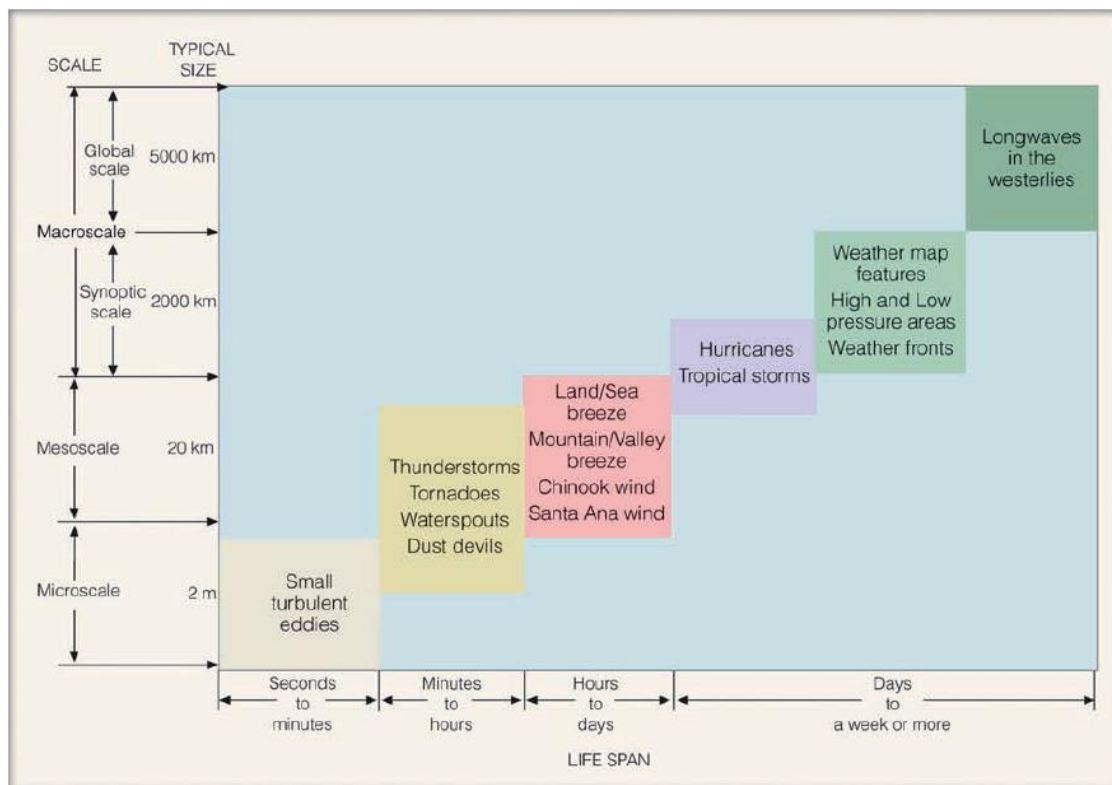


Figura 9. Diagrama de las escalas a las que se presentan los distintos movimientos del viento basado en su alcance espacial y temporal. Fuente: Ahrens, 2009

2.4.3 Zona de convergencia intertropical

La zona de convergencia intertropical, ITCZ por sus siglas en Inglés, es un patrón de circulación global que corresponde a la banda en donde se juntan los vientos provenientes del hemisferio norte y los vientos del hemisferio sur en el trópico, alrededor de la línea ecuatorial. Este fenómeno energético de circulación de las masas de aire se muestra en la Figura 10. Esta figura ilustra cómo los vientos llegan a esta banda, convergen y provoca un movimiento convectivo ascendente, ocasionado primordialmente porque existe mayor calentamiento del globo sobre la línea ecuatorial. Cuando el aire asciende se enfría y da lugar a la saturación de

vapor de agua que se desplazó con las masas de aire (NASA, 2000), el vapor condensa y se forman nubes cumulonimbos, por lo tanto esta es una región de alta nubosidad. Este patrón de circulación global es especialmente importante ya que explica las razones por las cuales los vientos se mueven como lo hacen, además de la presencia de nubes en la atmósfera que influye directamente en la cantidad de radiación solar que llega a la superficie. Durante el verano en el hemisferio norte en especial durante el mes de julio, la zona de convergencia intertropical tiene un movimiento hacia al norte (Walise, 1993) provocando así que exista una fuerte componente meridional del sur y un componente zonal del este que dan lugar a los vientos que se experimentan en los trópicos.

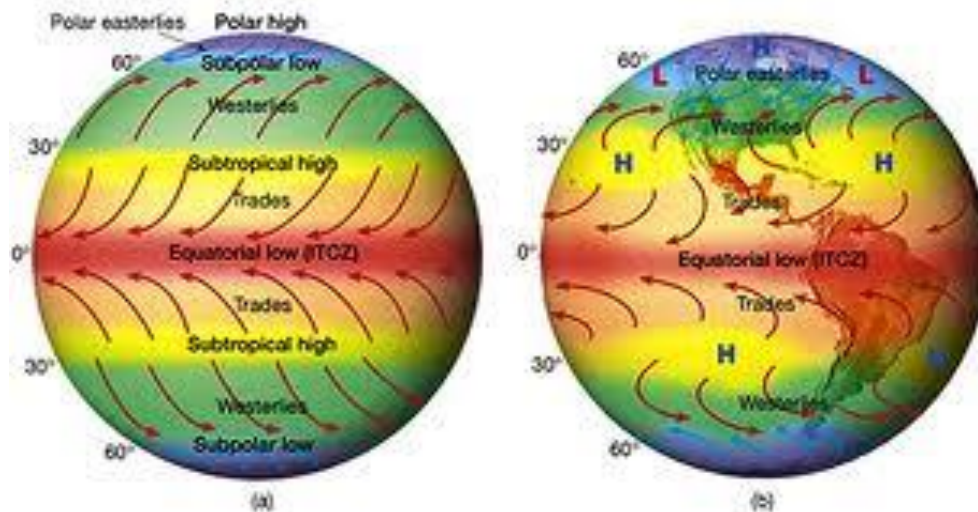


Figura 10. Esquema de la zona de convergencia intertropical

2.5 Precipitación

La lluvia ocurre principalmente por movimiento convectivo de masas de aire con vapor de agua hacia las capas altas de la atmósfera donde la temperatura es baja, se llega a un estado de saturación de vapor de agua, y esta se condensa. El vapor de agua se empieza a condensar cuando este se adhiere a un núcleo de condensación como lo son aerosoles, y partículas finas suspendidas en el aire. Es solo cuando el diámetro de la gota de lluvia es lo suficientemente grande (2000 μm) que el agua cae como lluvia (Ahrens, 2009). La medición de la precipitación se expresa en milímetros de profundidad de agua líquida que ha caído en un lugar en específico. La precipitación se mide en pluviómetros, que miden rocío, escarcha, lluvia y precipitación en estado sólido (American Meteorological Society, 2012).

3 Métodos

3.1 Instalación de la Estación Meteorológica

El trabajo de investigación empezó con la instalación de la estación meteorológica el 22 de mayo de 2014. El trabajo de montar la estación meteorológica comenzó a las 08:30 y terminó a las 19:30. Para la instalación de la estación se consideró la presencia de un pararrayo en el techo, por lo tanto se modificó la estación para que esta se ubique 1 metro por debajo de la altura del pararrayo. La estación meteorológica es un poste de metal con una longitud de 9 metros en el cual la veleta y el anemómetro de copa se ubican en el tope de la estación. Para la instalación de los instrumentos de viento es importante resaltar que se establece el norte magnético como marco referencial en el cual las mediciones de viento están basadas. La estación se construyó en el piso para luego ser erguida manualmente. Este trabajo se lo hizo entre tres personas hasta poder ajustar la estación de una manera segura.

Durante este proceso se verificó el estado y el funcionamiento de los instrumentos, se revisó los certificados de calibración y el funcionamiento de la tarjeta de adquisición de datos. En adición se realizaron las conexiones, se instaló el software de adquisición de datos y finalmente se verificó la obtención de datos crudos con la estación Vaisala.

Después de instalar la estación, se verificó los datos durante dos semanas para verificar el funcionamiento de la misma y asegurar la calidad de los datos. Durante este periodo de prueba se corrigió un error de ubicación del sensor de radiación solar que tenía la influencia de sombra de la estación y presentó datos no válidos. Gracias a este periodo se pudo asegurar la calidad de los datos para junio, julio y agosto.

3.2 Lugar de estudio

La recopilación de observaciones meteorológicas se realizó en la Estación de Mediciones Atmosféricas del campus principal de la USFQ, ubicado en el valle de Cumbayá, Ecuador. Las coordenadas de la EMA son: Lat: $0^{\circ}11'47.37''$ S, Lon: $78^{\circ}26' 6.56''$ W, Alt: 2391 m. La estación meteorológica se encuentra ubicada en la terraza del edificio Maxwell a 11.5 m sobre el nivel de la superficie. Los instrumentos para medir velocidad y dirección del viento están situados a 9 metros del nivel de la terraza y 20 m sobre el nivel del suelo, mientras que los sensores de temperatura, humedad, precipitación y radiación se encuentran en promedio a 2 metros sobre el nivel de la terraza y 12 metros desde la superficie.



Figura 11. Mapa de ubicación de la Estación de Mediciones Atmosféricas EMA – USFQ, con respecto a la ciudad de Quito, Ecuador. El globo azul representa la ubicación de la EMA; las coordenadas de la estación son: $0^{\circ}11'47.37''$ S, $78^{\circ}26' 6.56''$ W.

3.3 Materiales

Los instrumentos usados para la recolección de datos y que están instalados en la estación meteorológica son los siguientes:

Temperatura & Humedad relativa: Sonda de humedad y temperatura Vaisal HUMICAP® modelo HMP 155, calibrado el 2 de Abril del 2014, con una incertidumbre de $\pm 0.2^{\circ}\text{C}$ para la medición de temperatura. Las mediciones de Humedad tienen una incertidumbre de $\pm 0.6\%HR$ cuando los valores están entre 0 y 40% HR y de $\pm 1.0HR$ si los valores están entre 40 y 97% HR.

Radiación Solar: Piranómetro Kipp & Zonen modelo CMP 3, calibrado Julio 24 de 2013 con una sensibilidad de $9.94 \mu\text{V}/\text{W}/\text{m}^2$, un rango espectral de 300 a 2800 nm y una irradiación solar máxima de $2000 \text{ W}/\text{m}^2$.

Precipitación: Texas Electronic Inc. Pluviómetro modelo TR-525M, calibrado Febrero 20 de 2014 con un volumen de 473mL en un periodo de 1 hora y una exactitud de lluvia promedio y una desviación estándar de lluvia dentro del 1%.

Velocidad y dirección del viento: Durante el primer periodo de medición hasta el 15 de julio Se utilizó un anemómetro de copa y veleta modelo Vaisala WM30 diseñado para producir promedios de 1 segundo en datos a 10 Hz. El equipo tienen una precisión de $\pm 2^{\circ}$ para dirección del viento y $\pm 2\%$ para velocidad del viento.

Se utiliza durante el segundo periodo de mediciones un anemómetro ultrasónico, marca: Young modelo 81000. El equipo tiene una resolución de 0.01 m/s, con una exactitud de ± 0.05 m/s hasta medidas de 30 m/s. En cuanto a dirección del viento, el equipo tienen una resolución

de 0.1 grados con una exactitud de $\pm 2^\circ$ hasta vientos de 30 m/s y de $\pm 5^\circ$ hasta vientos de 40 m/s.

Data logger: Se utilizó un equipo de adquisición de datos marca Vaisala Oyj, modelo QML201C, calibrado el 6 de Enero del 2014.

3.4 Resolución temporal de adquisición de datos

La estación meteorológica del IIA-USFQ se instaló el 22 de mayo de 2014 y muestra datos a partir de las 18h56. La estación registra los valores mínimos, máximos y promedios de todas las variables meteorológicas tomados 30 segundos durante las 24 horas del día y se guardan en un archivo de texto. Los datos que se usan son las medidas promedio que la estación registra cada 30 segundos y los puntos que se grafican y se usan para el análisis es una media de cada minuto.

Los datos de viento se registran en dos periodos de tiempo, el primero desde Mayo 22 a Julio 14 donde se usó un anemómetro de copa y veleta, para registrar velocidad y dirección del viento respectivamente. Mientras que el segundo intervalo fue desde Julio 15 hasta Agosto 31 donde se usó un anemómetro ultrasónico. Durante el primer periodo se registran datos con una resolución temporal de 30 segundos, para todas las variables ambientales, mientras que en el segundo periodo de recolección de datos de vientos estos tienen una resolución temporal de 1 segundo.

3.5 Tratamiento de Datos

El trabajo inicial consiste en la depuración de archivos de texto de datos crudos, donde se verifica la estructura de los datos para su uso, y la presencia de ruido en las mediciones

hechas. Inmediatamente se crean matrices que luego se utilizan para realizar el análisis de las variables meteorológicas. Este proceso se lo hizo continuamente todos los días durante junio julio y agosto.

El análisis de las variables meteorológicas se lo hizo para los meses de junio, julio y agosto de 2014 utilizando juegos completos de datos diarios comprendidos de 1440 puntos, a excepción de los días 10 y 16 de junio, 1, 2, 15 y 17 de julio donde las matrices de datos son más pequeñas cuando, por razones operativas, la estación meteorológica estuvo fuera de línea.

Los datos crudos son los valores registrados por la estación cada 30 segundos y que están en un archivo de texto. El análisis de datos consistió en la elaboración de matrices en formato de MATLAB tomando los datos de 30 segundos y obteniendo la media de cada 60. Así se obtuvo matrices mensuales de datos de 1 minuto para todas las variables meteorológicas.

Para las observaciones de velocidad y dirección de los vientos obtenidos con el anemómetro sónico desde el 15 de julio de 2014, las matrices de 1 minuto se construyeron generando la mediana de cada 60 segundos de la serie.

Durante el segundo periodo de medición el anemómetro sónico obtiene mediciones para los componentes zonales, meridionales y de turbulencia del viento además de la dirección del viento en grados, por lo tanto para verificar el funcionamiento del instrumento se realizó un análisis vectorial para verificar la calidad de los datos que el equipo registra.

La construcción de matrices de datos se elaboró con el objetivo de poder crear gráficos de series de tiempo, donde se pueda visualizar las observaciones meteorológicas con respecto a los días de cada mes. Así mismo se obtienen perfiles diurnos horarios donde se grafican los

datos mensuales en un tiempo de 24 horas. Adicionalmente se realiza un filtro de mediana de un set de datos cada 30 minutos durante las 24 horas del día para construir una línea de variación de mediana (VDM) que muestra un comportamiento central de las variables meteorológicas. Complementario a estos gráficos también se construyó graficas polares de rosa de viento que se encuentran en la sección 4.5.

4 Resultados y Discusiones

4.1 Radiación Solar

La Figura 12 muestra la serie de tiempo de flux de radiación solar con datos de cada minuto del día para los tres meses estudiados. Esta figura muestra las condiciones de radiación solar reales que se ha experimentado en el valle de Cumbayá, es gracias a estos gráficos que se puede identificar días con la presencia de nubes y días despejados. El análisis sobre el cambio de la radiación solar durante 24 horas se lo presenta en la Figura 13. La importancia de la Figura 13 radica en tres aspectos, la visualización del comportamiento real de la radiación solar, la identificación de la estructura de las nubes y la visualización de la resolución temporal con la que se toman los datos. Durante junio se puede identificar, una aglomeración de puntos que registran datos de entre 200 y 500 $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$, cuando se esperaría valores de radiación altos ya que se están registrando datos durante el verano y en fechas cercanas al solsticio de verano que ocurre el 21 de junio. La razón por la cual se puede ver este comportamiento es principalmente debido a la nubosidad presente en el valle de Cumbayá. La alta presencia de nubes durante este mes reduce la cantidad de radiación que llega a la superficie.

En la Figura 13 se puede ver los perfiles diurnos horarios donde se ha colocado una línea de variación diurna de mediana (VDM) que representa la mediana de un set de puntos cada media hora de medición para los tres meses. La VDM para el mes de junio muestra cómo la presencia de las nubes ha influenciado en el flux de radiación solar que llega a la superficie. Un análisis detallado muestra que la radiación solar en el mes de junio ha sido bajo incluso en horas del mediodía cuando se registra una mediana de $600 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$. De hecho el análisis diario muestra que el 16 de junio fue el único día despejado en el mes. Los días 18, 20 y 22 de junio fueron los otros días que se pudo apreciar días parcialmente despejados, sin embargo hubo eventos de nubosidad por varias horas.

El mes de julio es especialmente particular ya que se pudo observar la curva diurna del flux de radiación solar sin perturbaciones durante varios días. Esto significa que el mes de julio tuvo poca presencia de cobertura de nubes. A diferencia de junio, durante julio no se ve esta alta densidad de datos aglomerados en valores de 200 y $500 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$. El mayor porcentaje de los datos se encuentran dentro del flux de radiación solar sin interferencias, incluso la VDM ejemplifica esta situación para este mes donde se puede observar el flux de radiación solar esperado sin la presencia de nubes. Se puede identificar, entonces, un claro patrón de radiación solar esperada en este mes, donde hay 12 horas de luz solar, y cuyos valores máximos de radiación ocurren entre 12:00 y 13:00 registrando un valor de mediana de $1000 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$.

Dado que el mes de julio presentó menos nubosidad que junio se logró identificar varios días donde el flux de radiación solar no es alterado por las nubes. Los días 1, 9, 16, 17, 18, 19, 22, 23, 24, 25, 29 son 11 días representativos donde se muestra la menor interferencia de las nubes, y por lo tanto son días donde se puede apreciar el flux de radiación solar completo.

Ciertamente las curvas obtenidas durante estos días son la razón de que la línea de VDM sea la que se presenta en la Figura 13 - b). Un ejemplo claro de flux de radiación solar sin cobertura de nubes se presenta en la Figura 14 donde se aprecia la diferencia entre el mes de junio y julio.

El flux de radiación solar en el mes de agosto se asemeja al flux visto en julio, no obstante durante este mes la presencia de nubes ha disminuido la radiación solar incidente en la superficie y por ello la VDM no se ajusta de manera exacta a una curva diurna de flux de radiación solar sin cobertura de nubes. Este mes se caracteriza por tener tardes nubladas la Figura 13 muestra una gran densidad de puntos en horas de la tarde y por tal razón después de las 13:00 la VDM muestra valores bajos.

La Figura 14 muestra tres ejemplos de días de cada mes que han sido representativos, en ellas se puede ver cómo junio fue un mes con eventos de nubosidad intermitentes, julio fue un mes despejado y agosto fue un mes con presencia de nubes en horas de la tarde.

Por último las VDM de los tres meses se encuentran superpuestas en la Figura 15, donde se aprecia la diferencia que ha existido durante los tres meses, y se establece que julio ha sido el mes con el mayor flux de radiación solar.

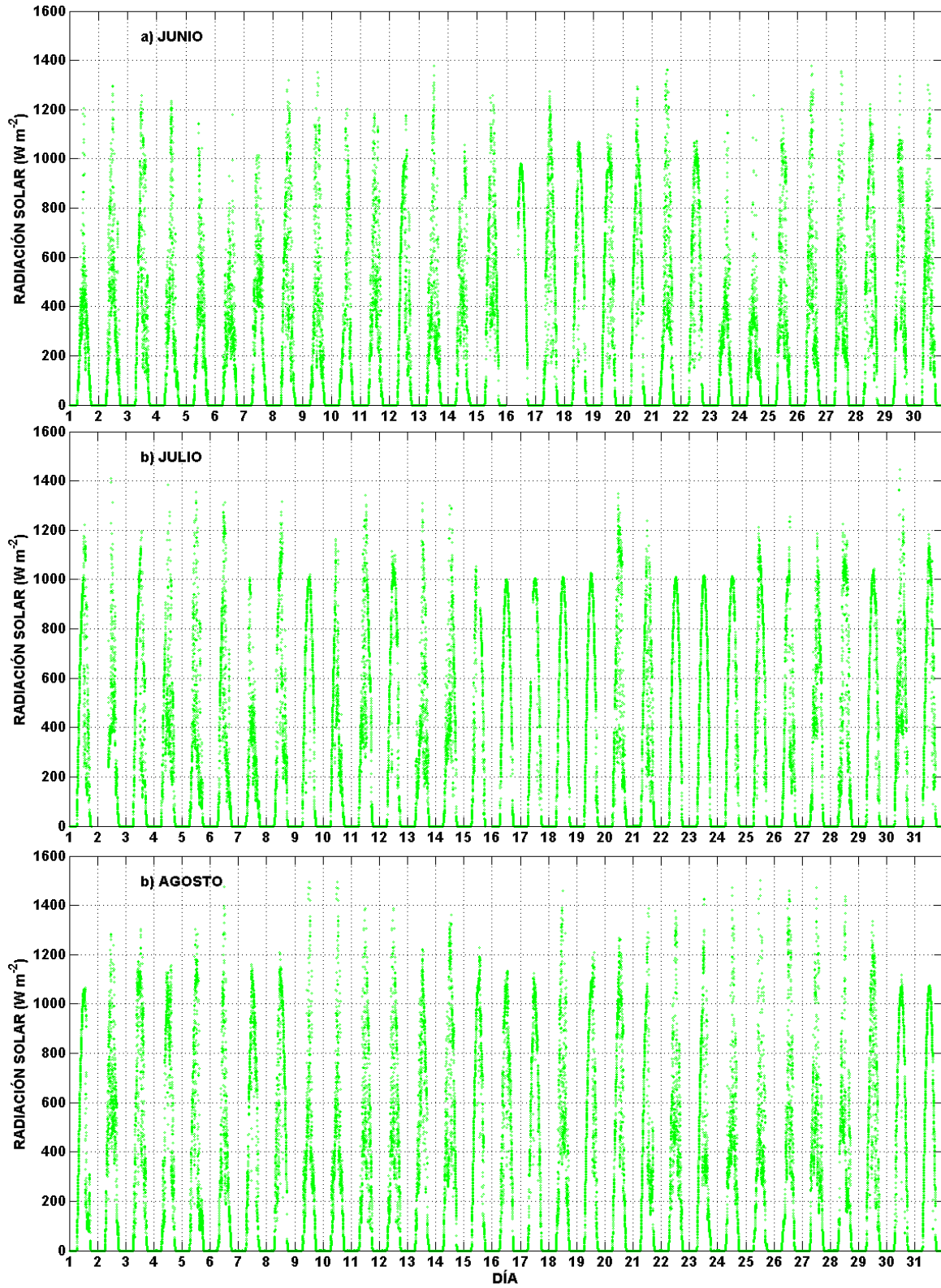


Figura 12. Series de tiempo de datos de 1 minuto del flux de radiación solar para a) junio, b) julio y c) agosto en el valle de Cumbayá, Ecuador.

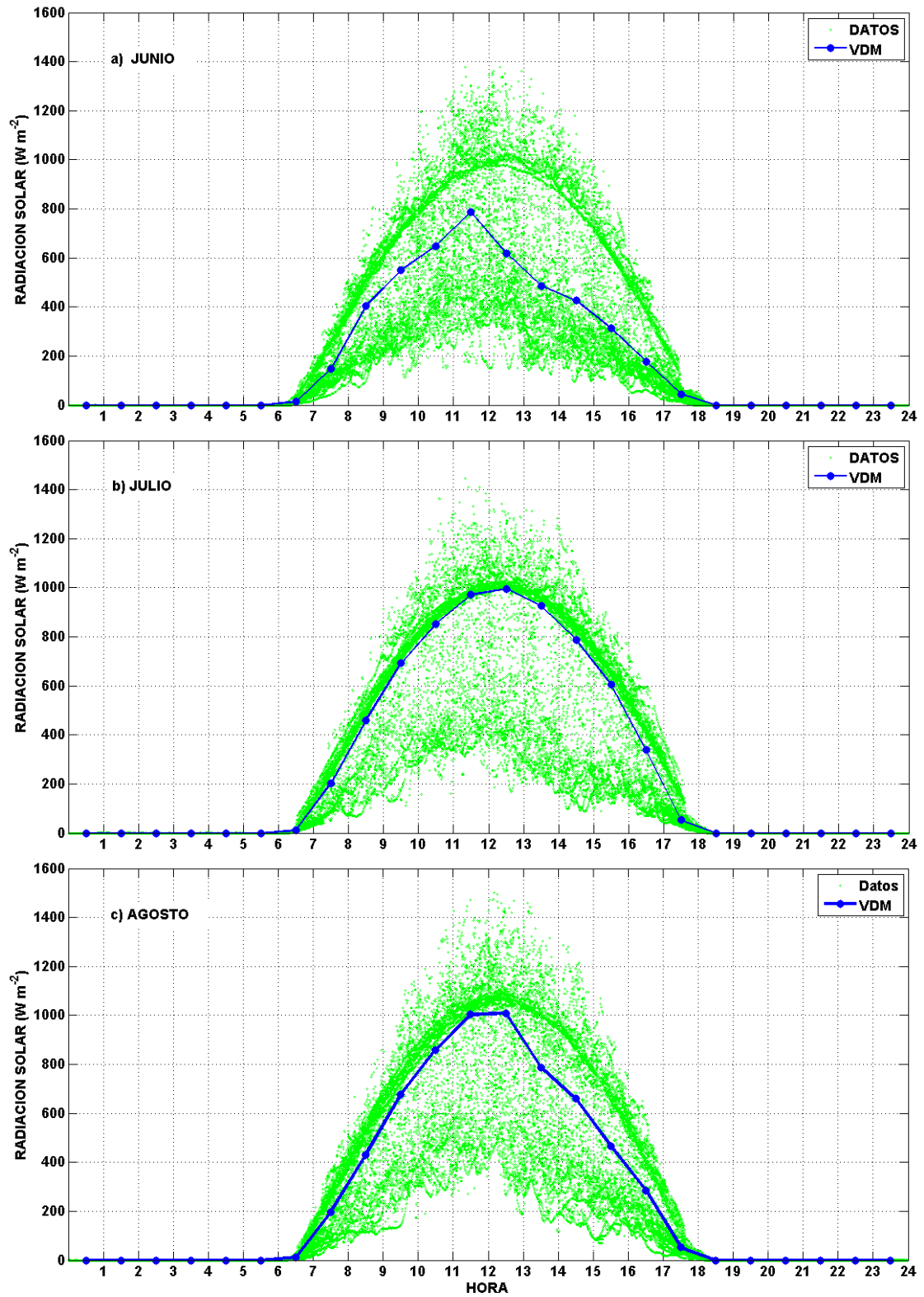


Figura 13. Perfiles diarios del flujo de radiación solar para a) junio, b) julio, c) agosto en el valle de Cumbayá. Los puntos verdes son todos los puntos tomados en el mes. La línea azul representa la variación diaria de mediana (VDM) cada 30 minutos.

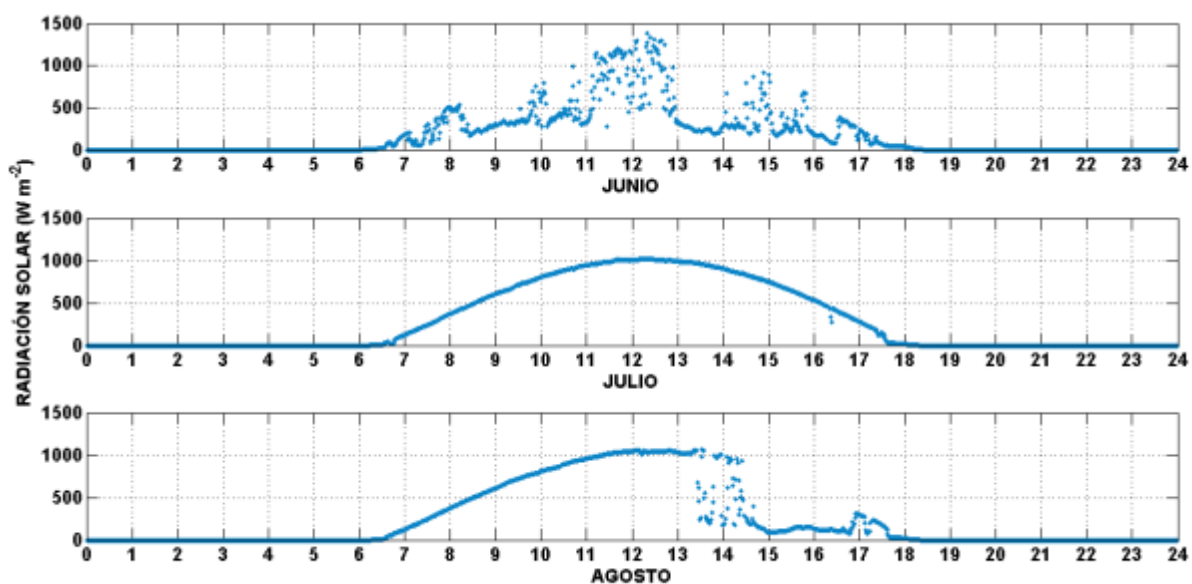


Figura 14. Análisis de radiación solar de un día para cada mes. El mes de junio muestra el día 13, el mes de julio muestra el día 23, y el mes de agosto muestra el día 2.

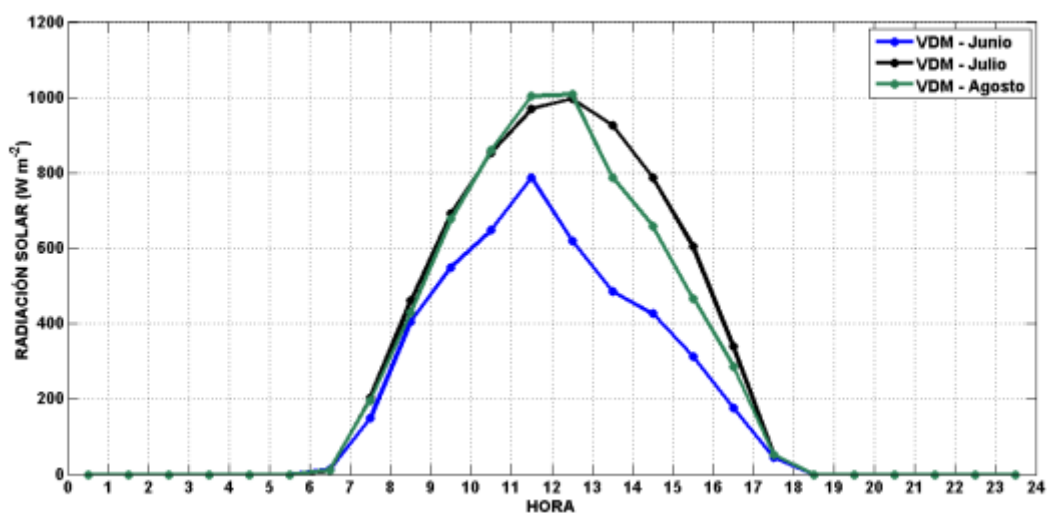


Figura 15. Variaciones diurnas del flux de radiación solar, superpuestas mensualmente para el valle de Cumbayá. Para junio (azul), julio (negro) y agosto (verde).

4.2 Temperatura ambiente

La serie de tiempo para las observación de temperatura del aire ambiente se ilustran en la Figura 16, en dónde se puede visualizar la fluctuación de la temperatura con el transcurrir de los días del mes. En este gráfico se pueden identificar los días en los cuales se registraron temperaturas elevadas durante el día o bajas durante noches y madrugadas. Este gráfico permite ver que el mes de julio presenta una mayor cantidad de picos con temperaturas altas sobre los 24 °C durante el mediodía, dando así una primera visión en conjunto sobre las diferencias que han existido entre los tres meses. Los perfiles diurnos junto a las líneas de mediana de variación diurna representados en la Figura 17 permiten evaluar las diferencias de temperatura para los tres meses.

La temperatura durante los tres meses tiene un comportamiento similar: hay temperaturas bajas en las madrugadas, un incremento después de las 06:30 hasta llegar a un pico entre 13:00 y 14:00 y un descenso de temperatura durante las noches. Si bien este es el comportamiento general visto en los tres meses, durante cada trayecto de variación de la temperatura se ha identificado ciertas diferencias que hay que distinguir. Las temperaturas más bajas se registran en horas de la madrugada, junio presenta una mediana de 13°C +/- 2°C, julio 12°C +/- 3°C y agosto 12°C +/- 2.5°C, siempre siendo las 6:00 la hora en que se registran las temperaturas más bajas. Ahora bien a partir de las 6:30 la temperatura empieza a aumentar y esto es porque la radiación solar empieza a incrementarse como se detalló en la sección anterior. Entonces si se observa la Figura 18 se puede ver que el cambio de temperatura para el mes de julio a esta hora es mucho más pronunciado que el de los otros dos meses. Esto se debe principalmente a que el flux de radiación solar, como ya se explicó anteriormente, fue mayor durante el día con una cobertura de nubes menor.

Las temperaturas más altas se registraron a partir del mediodía, y es durante estas horas que se puede ver que el mes de julio fue más caluroso que los otros meses. La mediana durante estas horas para julio fue de $24^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$, para junio fue de $22.6^{\circ}\text{C} \pm 2.5^{\circ}\text{C}$ y para agosto fue de $23^{\circ}\text{C} \pm 1.5^{\circ}\text{C}$. Un análisis diario utilizando la Figura 16. Series de tiempo de datos de 1 minuto de temperatura ambiente para a) junio, b) julio y c) agosto en el valle de Cumbayá, Ecuador. Figura 16 indica que en el mes de junio solo hubo 4 días en los que se alcanzó pico de 26°C al medio día. En julio hubo 8 días en los que se alcanzó temperaturas sobre los 26°C al medio día, y en todo el mes solo hubo 5 días donde la temperatura estuvo por debajo de los 24°C a la misma hora. En agosto tan solo hubo un día cuando se alcanzó un pico de 26°C , sin embargo todos los días del mes a excepción del 18 de agosto se alcanzó temperaturas sobre los 24°C . Es importante notar que las temperaturas máximas registradas permanecen en ese rango de medida hasta 2 o 3 horas después de que el sol llega a su zenit, es decir que a partir de las 15:00 la temperatura disminuye y lo hace a lo largo de toda la noche y llega a su mínimo hasta antes de que salga el sol que como ya se estableció, es antes de las 06:30. Julio en particular fue el mes que también presentó los registros de temperatura más bajos puesto a que durante este mes, la cobertura de nubes fue menor y esto dio lugar a un enfriamiento por radiación de la superficie más rápido.

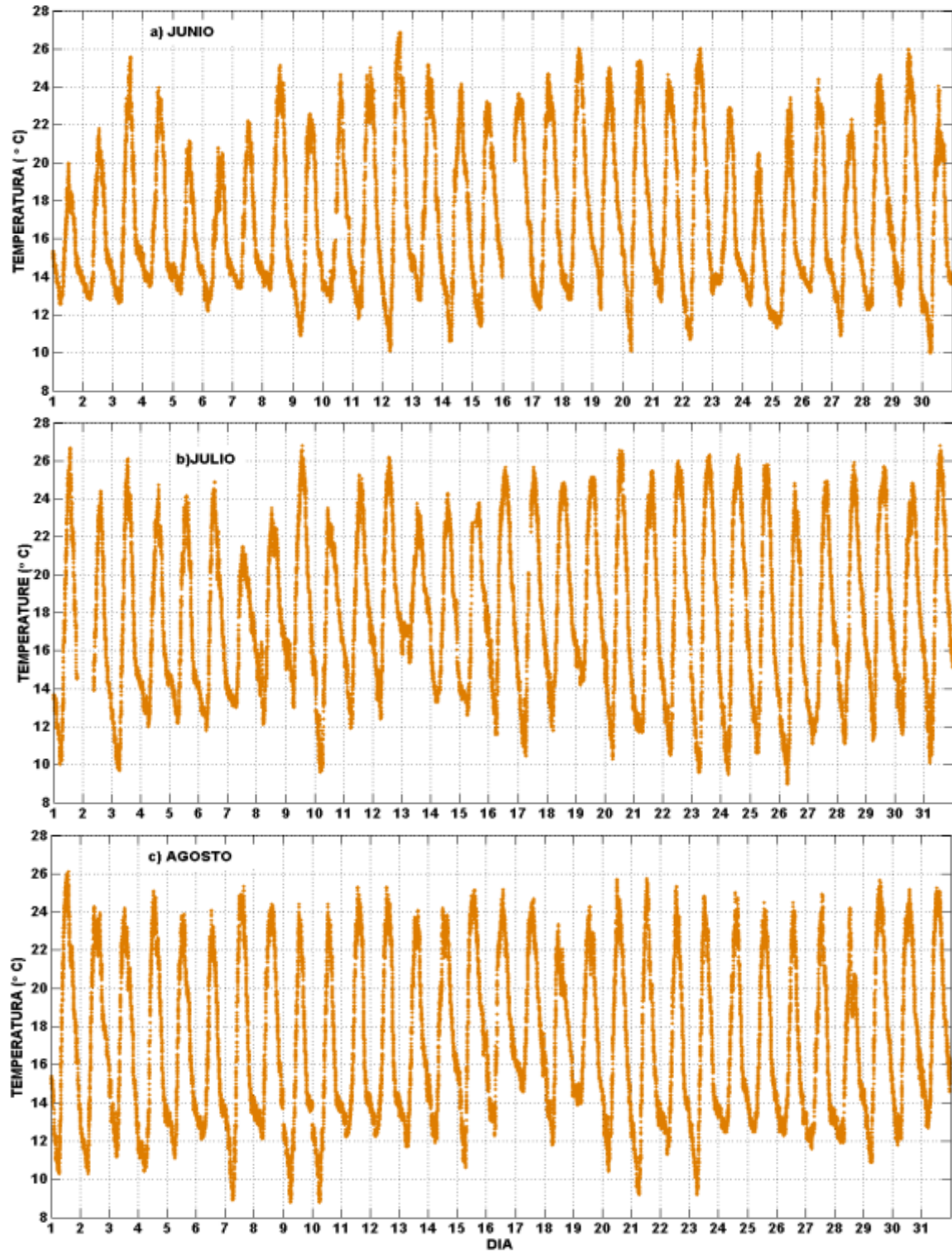


Figura 16. Series de tiempo de datos de 1 minuto de temperatura ambiente para a) junio, b) julio y c) agosto en el valle de Cumbayá, Ecuador.

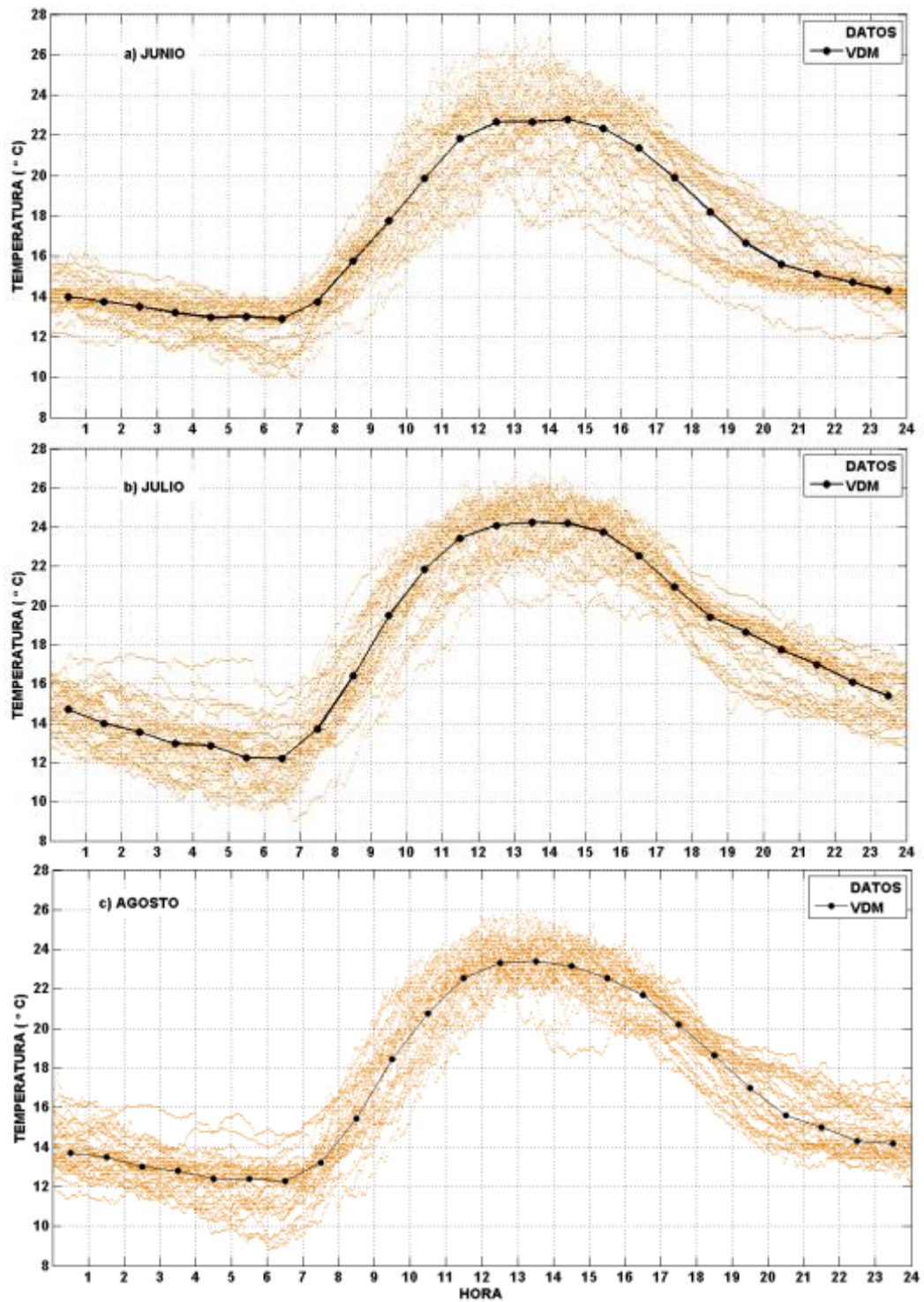


Figura 17. Perfiles diarios de temperatura ambiente para a) junio, b) julio, c) agosto en el valle de Cumbayá. Los puntos naranja son todos los puntos tomados en el mes. La línea negra representa la variación diaria de mediana (VDM) cada 30 minutos.

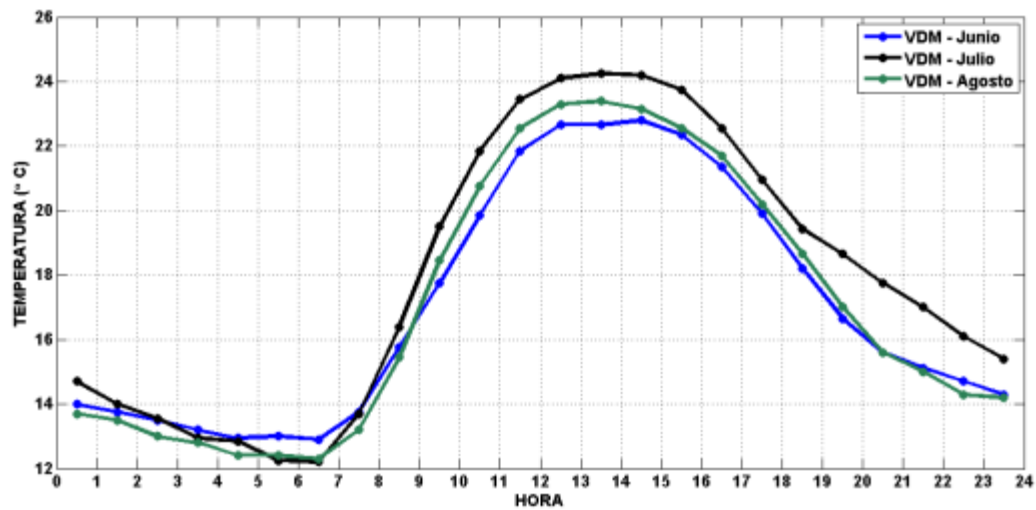


Figura 18. Variaciones diurnas de temperatura ambiente, superpuestas mensualmente para el valle de Cumbayá. Para junio (azul), julio (negro) y agosto (verde).

4.3 Humedad Relativa

La humedad relativa guarda un estrecha relación con la temperatura ambiente, (Manabe & Wetherald, 1967). La Figura 19 muestra la serie de tiempo completa de la humedad relativa durante los tres meses. Esta figura muestra de manera cuantitativa el comportamiento de la humedad relativa y permite identificar eventos significativos durante los tres meses.

La variación mensual de la humedad relativa en el ambiente, se ilustra observando los perfiles diurnos horarios de la Figura 20. Los perfiles muestran que durante las madrugadas junio alcanza valores tan altos como el 90%, julio varía entre el 60% y 72%, y agosto muestra valores del 80%. Durante las 13:00 y 14:00 se alcanzó los valores mínimos de humedad relativa siendo junio el mes menos seco, con valores del 35%, julio mostró valores del 29% y agosto presentó valores del 30%. En las noches cuando la temperatura empieza a disminuir, los valores de humedad relativa vuelven a alcanzar sus picos registrando 90% en junio y 78% en agosto y 50% en Julio.

Los perfiles muestran cierta dispersión de los datos que varía en un 50% en hora de la madrugada (24:00 - 07:00) y en horas de la noche (18:00 – 24:00), que son las horas cuando se identifican los porcentajes más altos de humedad. Esta dispersión de los datos puede ser explicada por la temperatura y la cobertura de nubes. Como ya se ha establecido junio ha sido el mes más nublado, y también el que presenta la mayor dispersión de puntos de humedad. Según Walcek (1993) existe una relación entre cobertura de nubes y la humedad relativa donde mayores porcentajes de humedad relativa, están relacionados con una mayor cobertura de nubes, que otorga una explicación por la cual la humedad relativa en junio es mayor.

La dependencia que existe entre humedad relativa y temperatura se puede observar en la Figura 21, donde se muestra una superposición de las líneas de variación diurnas de mediana que

pone en evidencia que en horas de la tarde (12:00 – 14:00) los meses de julio y agosto fueron los meses más secos con una mediana del 29% y 30% respectivamente. Mientras que el mes de junio a las mismas horas mostró una mediana del 40% de humedad relativa. La razón por la cual sucede este fenómeno atmosférico se puede explicar mediante el uso de la ecuación 4, donde la presión de saturación del vapor de agua, es dependiente de la temperatura. Cuando la temperatura aumenta la presión de saturación del vapor de agua también aumenta y dentro de la ecuación 4 si el denominador es mayor, la humedad relativa disminuye. En horas de la noche y madrugada ocurre el proceso inverso ya que la temperatura disminuye, y la humedad relativa aumenta.

La anti correlación que existe entre temperatura y humedad relativa se observa en la, Figura 21 donde se evidencia que los meses más calientes de julio y agosto también han sido los meses más secos. En estos meses desde las 12:00 hasta las 16:00 cuando la temperatura ambiente esta es su pico la humedad relativa está en su mínimo, por ello en julio la curva de variación diurna de mediana muestra un valor del 29% y en agosto un valor de 30%, ambos siendo valores muy bajos y por lo tanto estableciendo que han sido meses secos. La Figura 22 ejemplifica la relación que existe entre temperatura y humedad relativa en el cual se puede identificar que a mayores temperaturas la humedad relativa es menor.

Un aspecto significativo en el comportamiento de la humedad relativa se evidencia durante las noches. Es de esperarse que la humedad relativa durante las noches sea alta puesto que la temperatura ambiente es baja, sin embargo julio muestra una mediana de humedad relativa de menos del 50%, cuando agosto mostró humedades relativas tan altas como el 78% y junio valores del 90 %. Esto puede explicarse porque el mes de julio ha sido el mes menos nublado,

y con un mayor flux de radiación solar que se tradujo en aire caliente y seco en las noches de este mes.

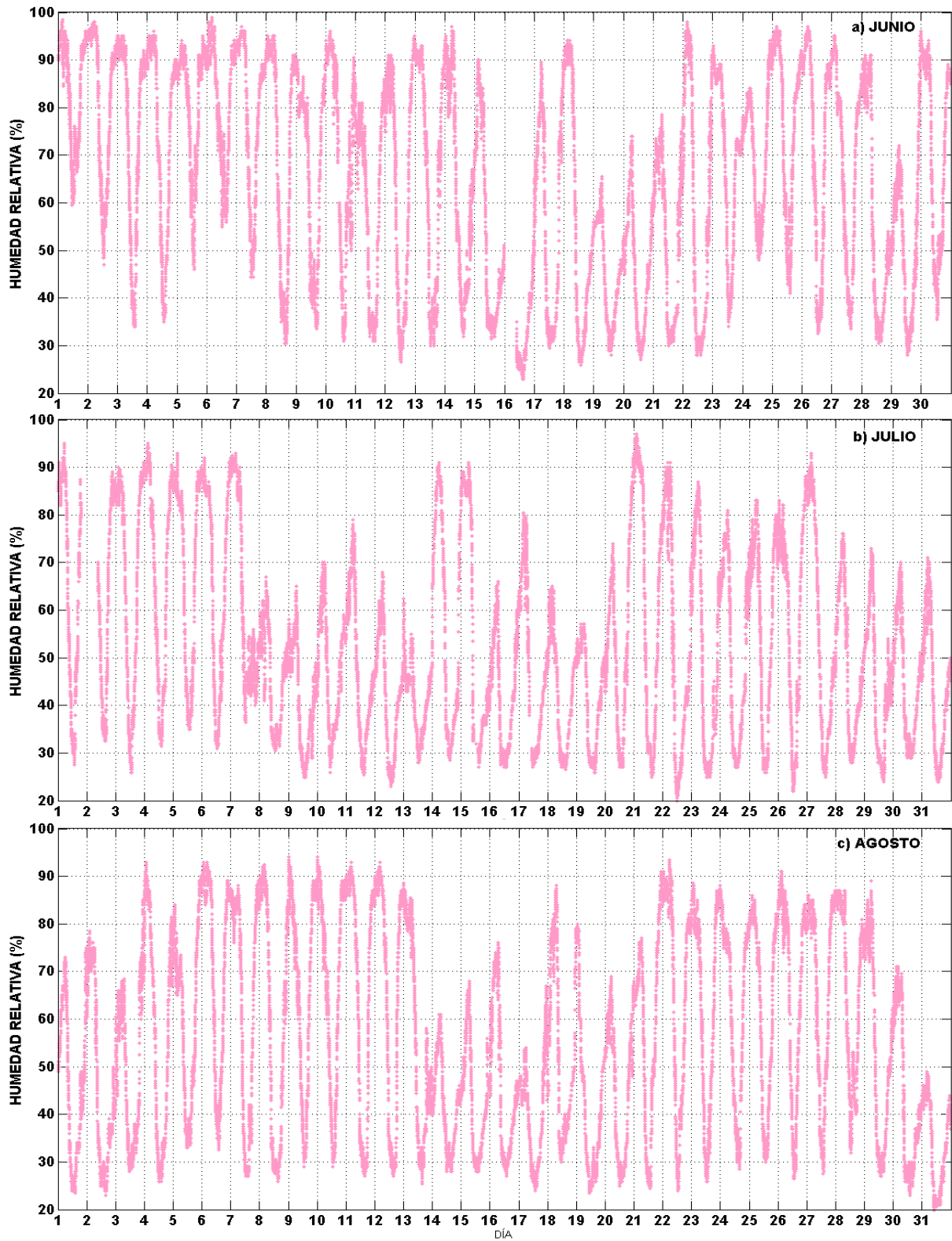


Figura 19. Series de tiempo de datos de 1 minuto de humedad relativa para a) junio, b) julio y c) agosto en el valle de Cumbayá, Ecuador.

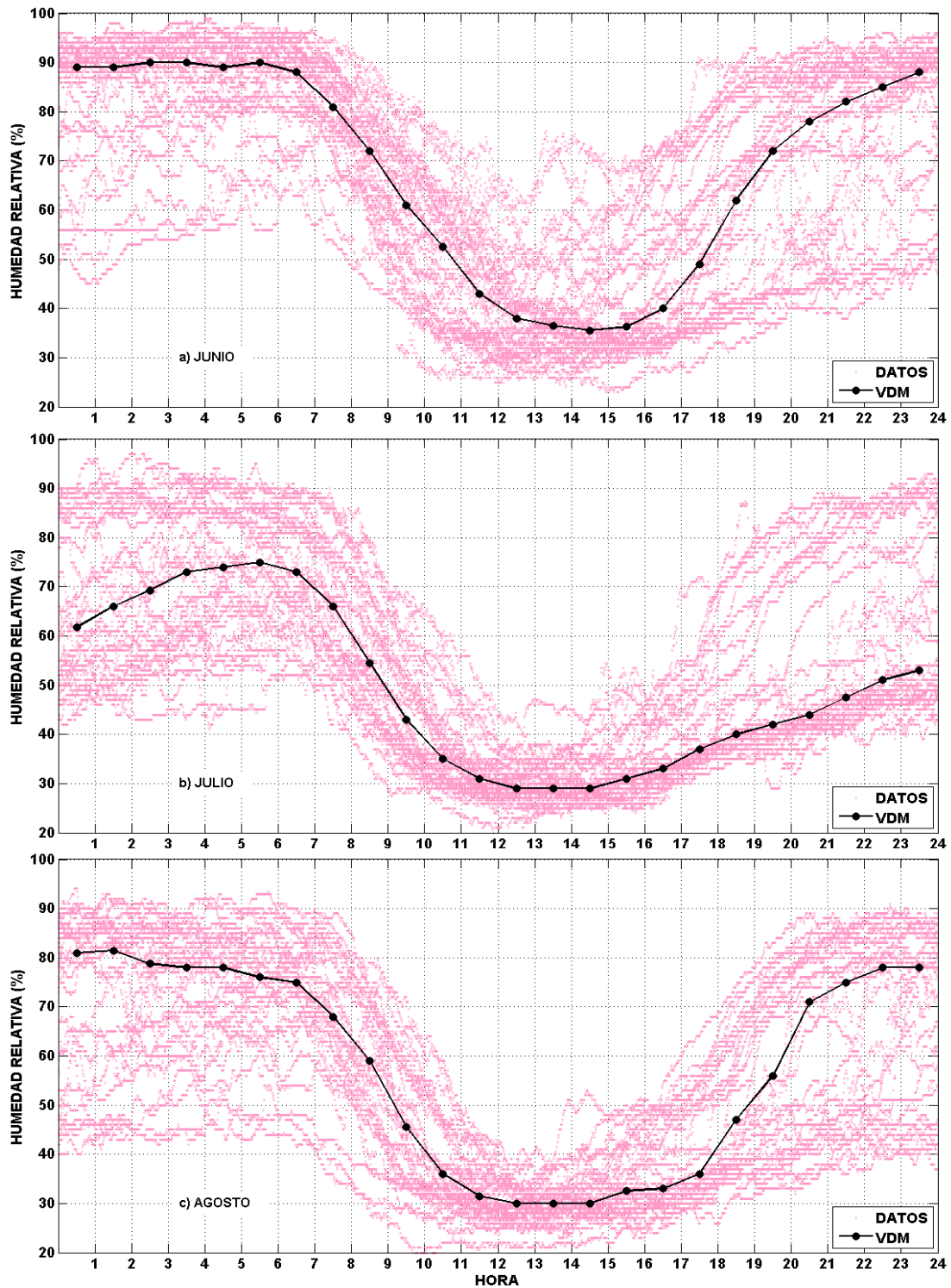


Figura 20. Perfiles diarios de humedad relativa para a) junio, b) julio, c) agosto en el valle de Cumbayá. Los puntos rosados son todos los puntos tomados en el mes. La línea negra representa la variación diaria de mediana (VDM) cada 30 minutos.

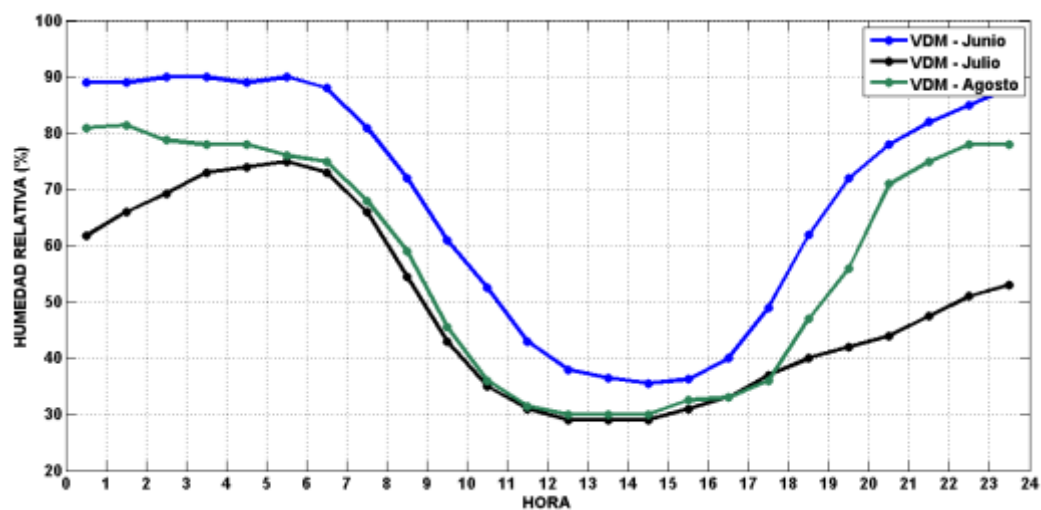


Figura 21. Variaciones diurnas de humedad relativa, superpuestas mensualmente para el valle de Cumbayá. Para junio (azul), julio (negro) y agosto (verde).

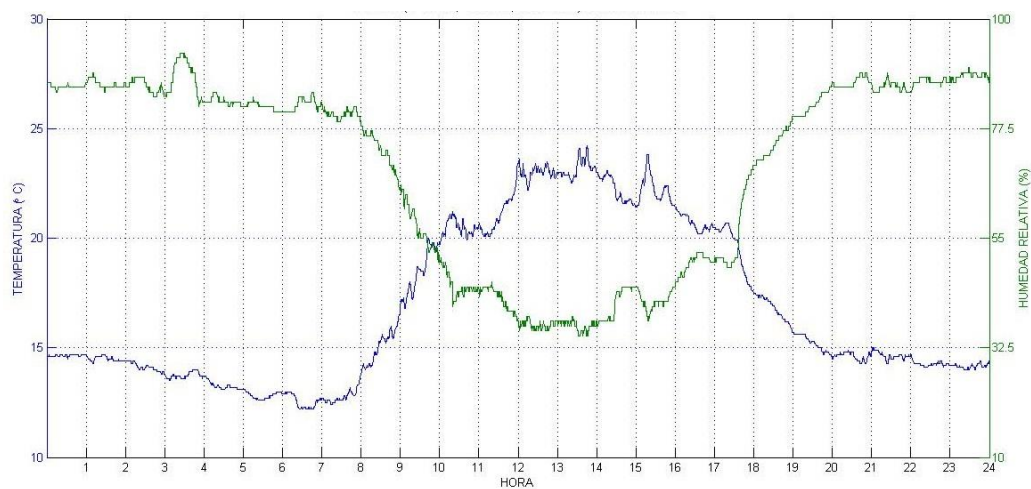


Figura 22. Relación que existe entre temperatura y humedad relativa. El gráfico muestra el comportamiento de estas variables durante el 5 de julio de 2014.

4.4 Presión Atmosférica

La variación de la presión atmosférica durante los tres meses estudiados se muestran en las series de tiempo que se presenta en la Figura 23, donde se puede identificar días particulares como el 24 de junio, donde se registró una presión de 768 hPa, la presión más alta durante los tres meses. Sin embargo para visualizar el comportamiento general de esta variable meteorológica en Cumbayá se observa los perfiles diurnos horarios que se presentan en la Figura 24. En esta figura se puede apreciar que durante los meses de junio, julio y agosto el comportamiento de la presión tiene un forma ondulatoria prácticamente idéntico en los tres meses, donde la dispersión entre los datos es mínima. En esta figura se puede ver que la presión atmosférica oscila durante todo el día, en los cuales los puntos de presiones atmosféricas máximos o crestas están entre 8:00 y 10:00, y en las horas de la noche entre 22:00 y 24:00, y sus puntos más bajos o valles, se hallan en horas de la madrugada entre 04:00 y 05:00 y en horas de la tarde entre 15:00 y 17:00. La razón por la cual los valores de presión atmosférica se encuentran en el rango de 760 a 768 hPa puede ser explicado mediante el uso de la ecuación 18 que muestra exactamente que a la altura de Cumbayá se espera valores de presión atmosférica mayores a los 760 hPa.

Ahora bien la oscilación de la presión atmosférica durante el día, es un comportamiento esperado especialmente en la zona de los trópicos. Este fenómeno ocurre primordialmente por la absorción de la radiación solar por el ozono en la parte alta de la atmósfera, y la absorción del vapor de agua en las partes bajas de la atmósfera. Esto provoca cambio de densidad en el aire que genera olas termales que se puede medir por las pequeñas variación de presión que ocurren en la superficie de la tierra (Ahrens, 2009).

La Figura 25 muestra en perspectiva las líneas de variación diurna de mediana de la presión atmosférica para los tres meses. En este gráfico se puede visualizar, en efecto que la presión atmosférica se comporta como una onda, donde las horas de entre 8:00 y 10:00, y entre 22:00 y 24:00, son las crestas y el valle se encuentra entre 15:00 y 17:00 donde se identifica una amplitud de 1.6 hPa. Ya que la amplitud de la onda observa es tan solo de 1.6 hPa, se puede afirmar que la diferencia de presiones es mínima durante el día. Finalmente el periodo de esta onda de presión atmosférica es de 12 horas, demostrando que se experimenta casi un mismo rango de presiones cada 12 horas.

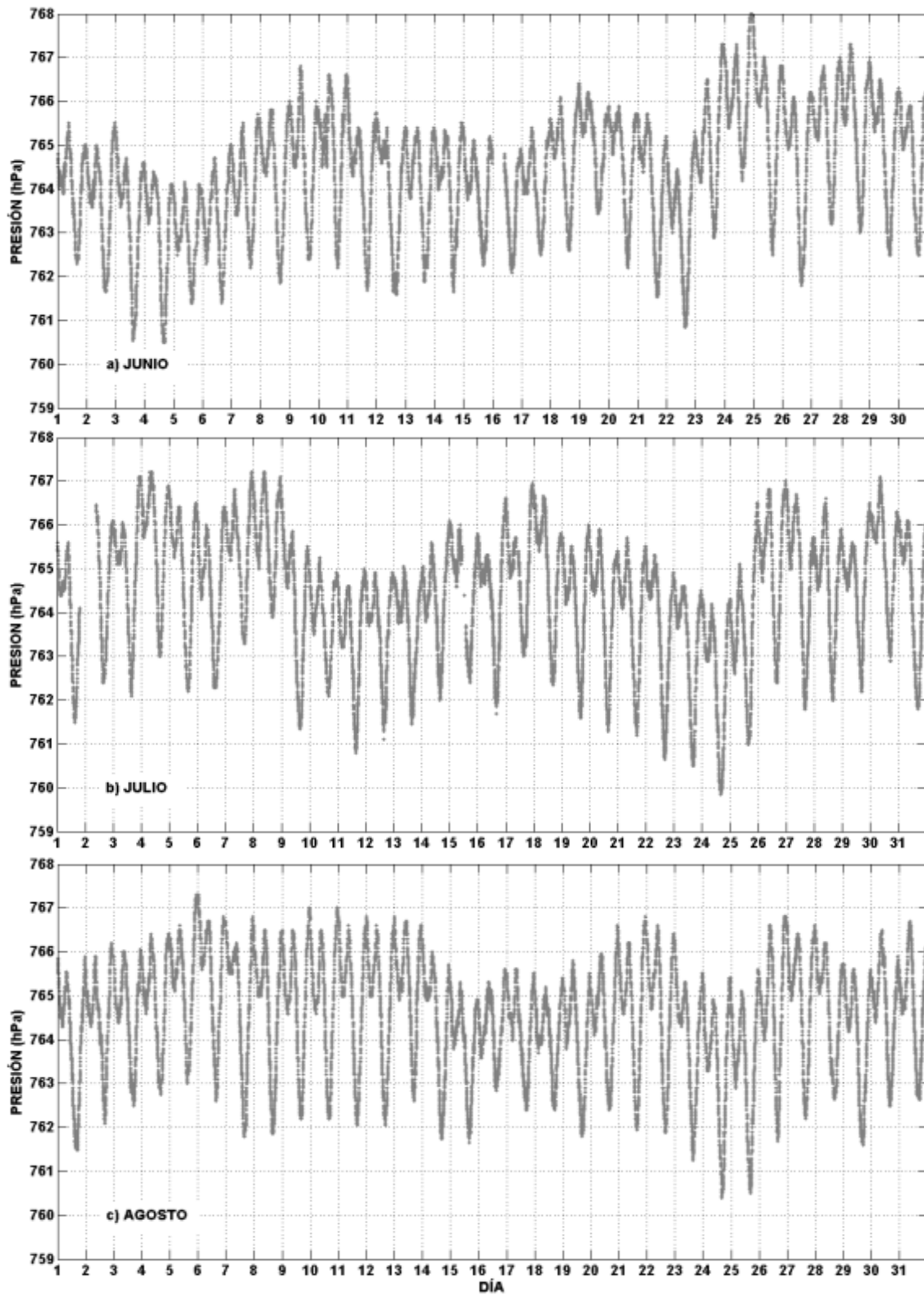


Figura 23. Series de tiempo de datos de 1 minuto de presión atmosférica para a) junio, b) julio y c) agosto en el valle de Cumbayá, Ecuador.

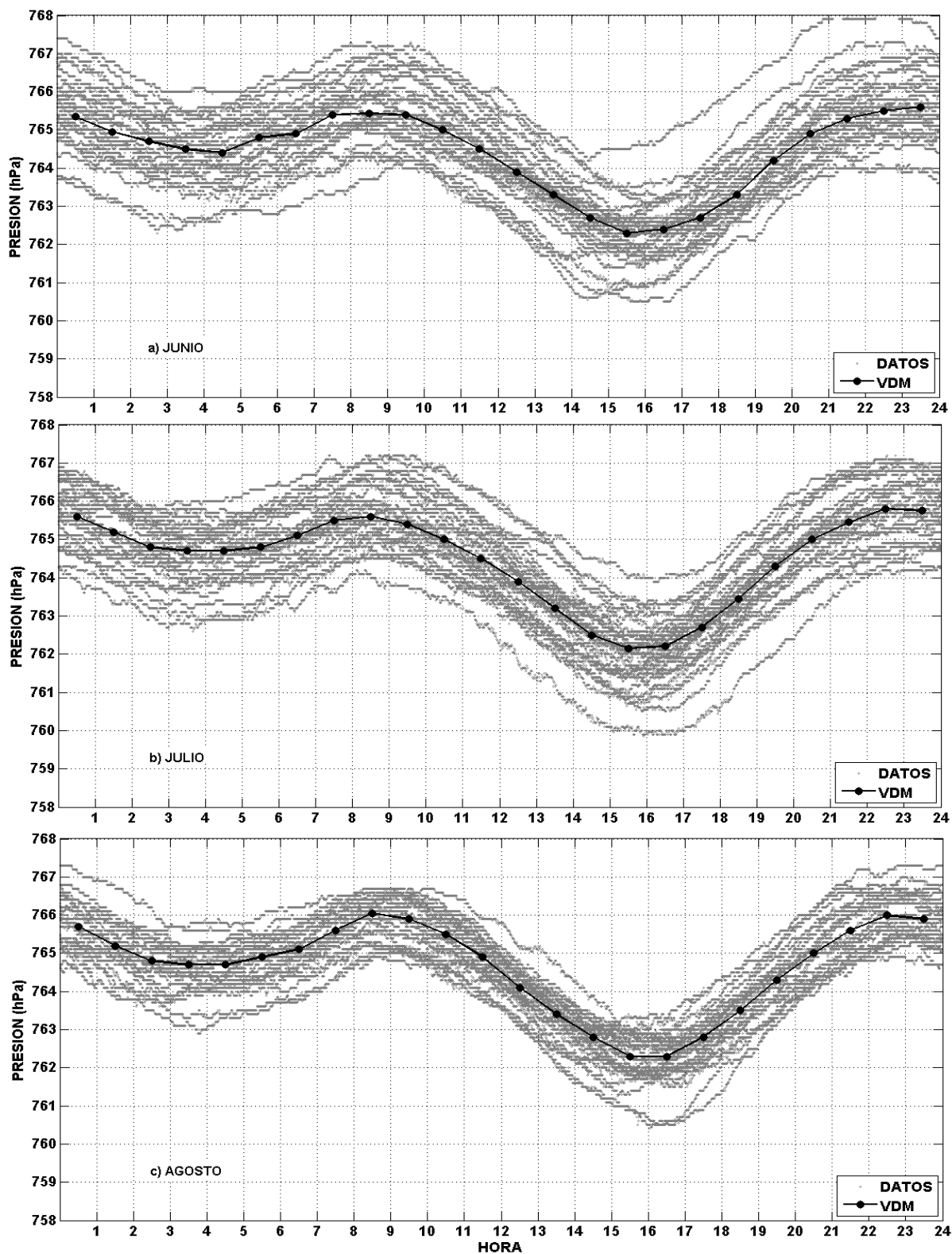


Figura 24. Perfiles diarios de la presión atmosférica para a) junio, b) julio, c) agosto en el valle de Cumbayá. Los puntos grises son todos los puntos tomados en el mes. La línea negra representa la variación diaria de mediana (VDM) cada 30 minutos.

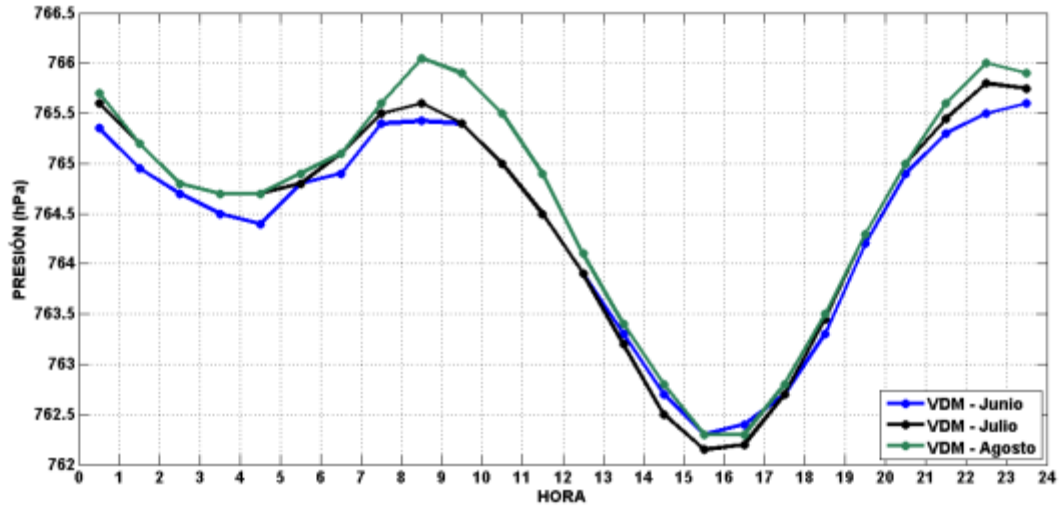


Figura 25. Variaciones diurnas de presión atmosférica, superpuestas mensualmente para el valle de Cumbayá. Para junio (azul), julio (negro) y agosto (verde).

4.5 Velocidad y Dirección del viento

Las series de tiempo de dirección y velocidad del viento que se presentan en las Figura 26 y Figura 28 respectivamente, muestran la variación de estas variables durante junio, julio y agosto. En estas figuras se puede ver el comportamiento diario de estas variables en las cuales se puede identificar eventos significativos como rangos de dirección del viento, y comportamiento general de la velocidad del viento. Sin embargo para encontrar patrones de comportamiento en cuanto a velocidad y dirección se obtuvo perfiles diurnos horarios que se muestran en la Figura 27 y Figura 29 donde se colocó también una línea de variación diurna de mediana. Es importante resaltar el hecho que existe variabilidad horaria de los datos en ambas figuras. Por lo tanto la VDM puede mostrar una tendencia general de comportamiento para velocidad del viento, mas no se puede decir lo mismo para dirección del viento donde existe una gran dispersión de datos entre los 360°. Este movimiento aleatorio del viento es de esperarse en viento a nivel de superficie en donde el rozamiento causado por construcción y presencia de follaje, además de la presencia de eventos meteorológicos de micro escala, van a influenciar los patrones de movimiento del aire y por lo tanto va a existir variaciones permanentes de velocidad y dirección durante todo el día.

Los datos obtenidos de junio que se presentan en la Figura 27 literal a, muestran que existen distintos patrones de comportamiento con el transcurrir del día. Antes de las 9:00 el viento se mueve en todas las direcciones, a partir de esta hora hasta las 20:00 se puede visualizar una tendencia de dirección del viento. La línea de variación diurna de mediana demuestra que existe un patrón de movimiento ubicado entre los 150° y 180° para el rango de horas 09:00 y 20:00 que significa que el viento proviene desde la dirección Sur(S) y Sureste (SE). Aunque la línea de variación diurna de mediana presenta un patrón de comportamiento, esta línea no es

representativa para los periodos de tiempo antes de las 09:00 y después de las 20:00 ya que los valores de dirección del viento durante estos periodos se encuentran muy dispersos y no sería correcto atribuir una dirección media.

Los datos de velocidad de viento para el mes de junio muestran que antes de las 09:00 los vientos tienen velocidades de hasta 2 m s^{-1} , llegando ocasionalmente a superar los 6 m s^{-1} y por lo tanto la mediana tiene un valor de 1 m s^{-1} . Después de las 9:00 la velocidad del viento incrementa progresivamente, siendo las 15:00 y 16:00 los períodos donde se alcanzan las velocidades máximas durante el día. Existe un rango de velocidades entre 2 y 8 m s^{-1} , llegando ocasionalmente a superar los 12 m s^{-1} . Inmediatamente después de las 16:00 la velocidad disminuye hasta alcanzar un rango de velocidades de entre 2 m s^{-1} y 6 m s^{-1} .

Durante el mes de Julio se puede evidenciar resultados significativos, ya que existe una tendencia clara en cuanto a la dirección del viento. El perfil diurno horario que se encuentra en la Figura 27 literal b muestra que durante horas de la madrugada (01:00 – 05:00) el viento no presenta una dirección definida. Después de las 05:00 se aprecia una tendencia donde la dirección oscila entre los 210° y 150° , y a partir de las 10:00 el viento se mueve predominantemente entre los 110° y 150° hasta las 20:00, cuando el viento nuevamente se mueve en todas las direcciones, con una ligera tendencia de estar direccionado a los 210° .

El comportamiento de la velocidad del viento durante julio muestra un rango de velocidades entre 1 m s^{-1} y 4 m s^{-1} , llegando a alcanzar los 7 m s^{-1} en horas de la mañana hasta las 09:00. Luego existe un aumento de velocidad con una variabilidad de entre 2 y 13 m s^{-1} . Finalmente hay descenso de velocidad a partir de las 17:00 hasta alcanzar un rango de velocidades de 1 m s^{-1} a 4 m s^{-1} .

De acuerdo a la información de dirección antedicha, se puede apreciar que existe una relación entre velocidad del viento y dirección. Esto es puesto a que el rango de dirección establecido que se encontró entre las 09:00 y las 20:00, ocurre cuando la velocidad del viento empieza a aumentar. Aunque no se puede establecer causalidad entre estas dos variables, puesto que no hay una correlación directa, sí es una primera observación de la relación de comportamiento que existe entre velocidad y dirección del viento en este mes.

Durante el mes de agosto se puede observar un comportamiento parecido al ocurrido en julio. En las madrugadas el viento se encuentra disperso y se mueve en todas las direcciones, es a partir de las 06:00 que el viento empieza a tomar una dirección definida, y varía desde los 180° hasta los 120° . A partir de las 10:00 el viento muestra una tendencia entre los 110° y 150° hasta las 19:00.

Durante este mes también se evidencia un movimiento particular de los vientos entre las 14:00 y las 18:00 donde se evidencia una alta densidad de puntos en la dirección norte. Esta misma tendencia ya se la evidenció durante el mes de julio, pero no es tan marcada como ha ocurrido durante este mes. Las noches durante el mes tampoco exhiben una dirección marcada, a excepción de una ligera tendencia entre 30° y 60° desde las 18:00 hasta las 21:00, después de esta hora el viento se mueve en todas las direcciones.

De manera general la velocidad del viento durante este mes sigue el mismo comportamiento que el mes de Agosto. Velocidades bajas menores a los 2 m s^{-1} . Luego picos en la tarde entre 4 y 10 m s^{-1} y finalmente velocidades bajas en las noches con valores menores a los 2 m s^{-1} .

Los datos de velocidad para este mes, muestran de la misma manera como en julio una aparente causalidad entre velocidad y dirección, donde a mayor velocidad el viento también

adquiere una dirección definida. Sin embargo los vientos durante este mes han sido menos veloces y la dispersión de los datos de dirección del viento en especial después de las 10:00 no ha sido alta, consecuentemente se soporta la idea inicial de que existe una relación entre estas variables mas no hay causalidad entre las dos.

La Figura 30 establece una comparación entre los tres meses en cuanto a velocidad donde se puede ver el comportamiento de la velocidad del viento y permite identificar, las diferencias que han existido entre junio, julio y agosto. En esta figura se identifica al mes de junio como aquel mes con velocidades del viento más bajas, julio como el mes con las velocidades del viento más altas y agosto con velocidades similares a julio, no obstante con valores de velocidad menores.

Finalmente los gráficos de rosas de viento es una manera simplificada de mostrar los componente de velocidad y dirección del viento en un solo gráfico el largo de la barra indica la cantidad de viento que se han registrado a esa hora, mientras que el color representa la velocidad a la que se han registrado los vientos.

El análisis de la rosa de vientos muestra que durante junio 20% de los vientos vienen desde el Sur, Sureste (SE) y Sursureste (SSE), en julio el 22% de las direcciones que se han registrado vienen desde el Sureste, y en agosto 25% de los vientos mantienen la dirección Sureste. Una de las principales razones por la cual se identifica que el viento está viniendo principalmente de la dirección sur y sur este puede ser atribuida a la zona de convergencia intertropical por la cual se esperaría que en ecuador se hallen vientos que vienen desde el este y en dirección hacia el norte.

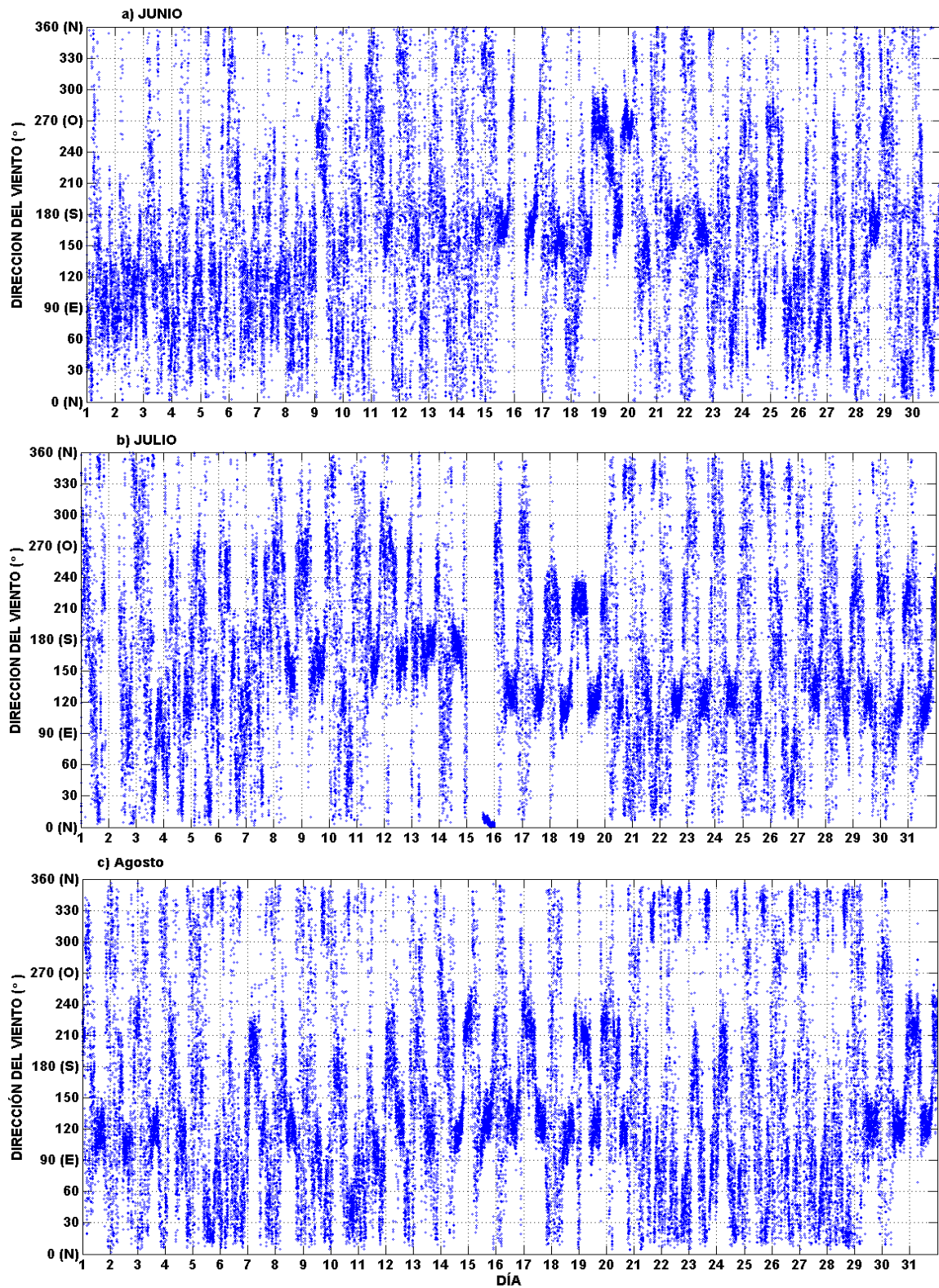


Figura 26. Series de tiempo de datos de 1 minuto de dirección del viento para a) junio, b) julio y c) agosto en el valle de Cumbayá, Ecuador.

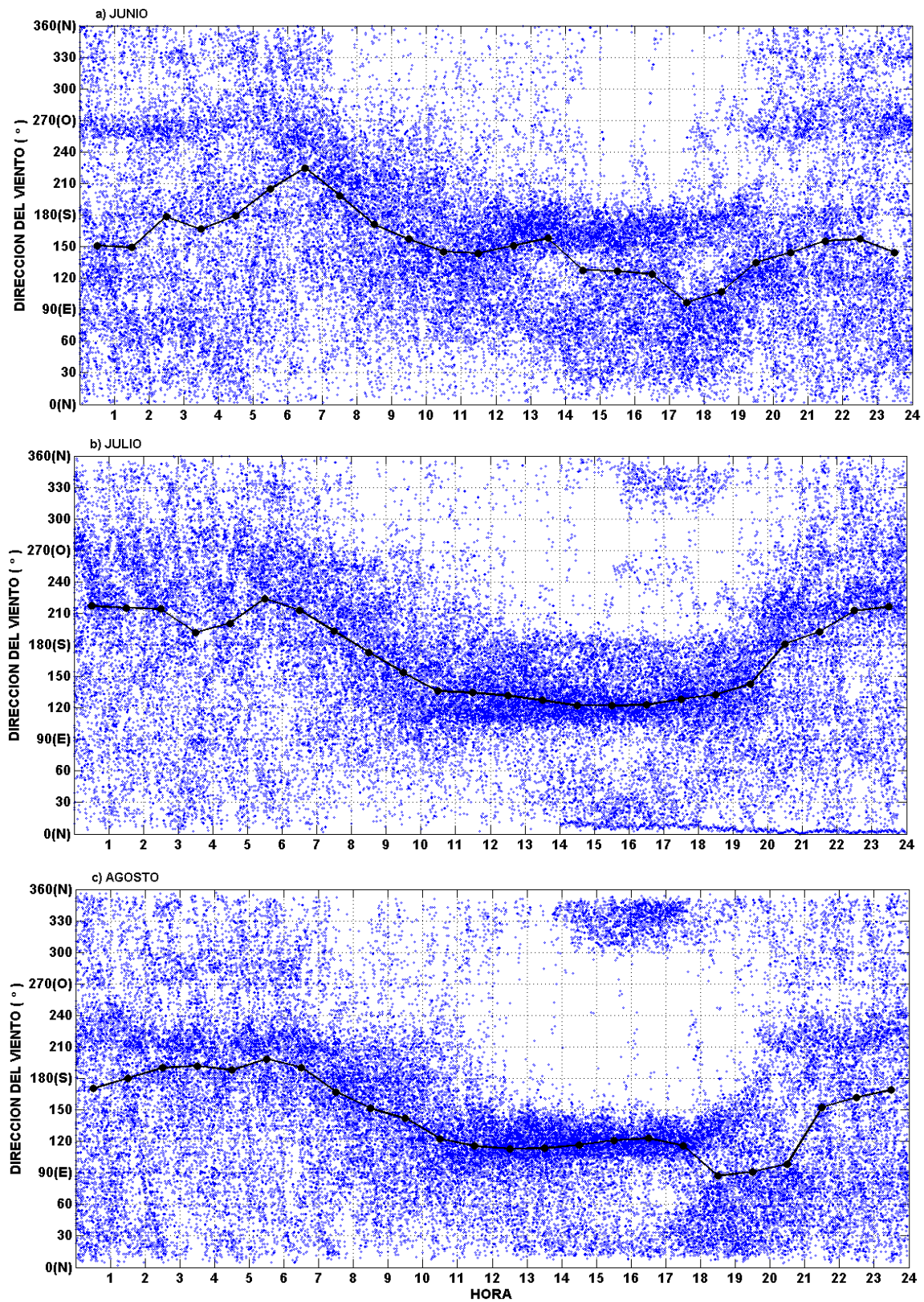


Figura 27. Perfiles diarios de dirección del viento para a) junio, b) julio, c) agosto en el valle de Cumbayá. Los puntos azules son todos los puntos tomados en el mes. La línea negra representa la variación diaria de mediana (VDM) cada 30 minutos.

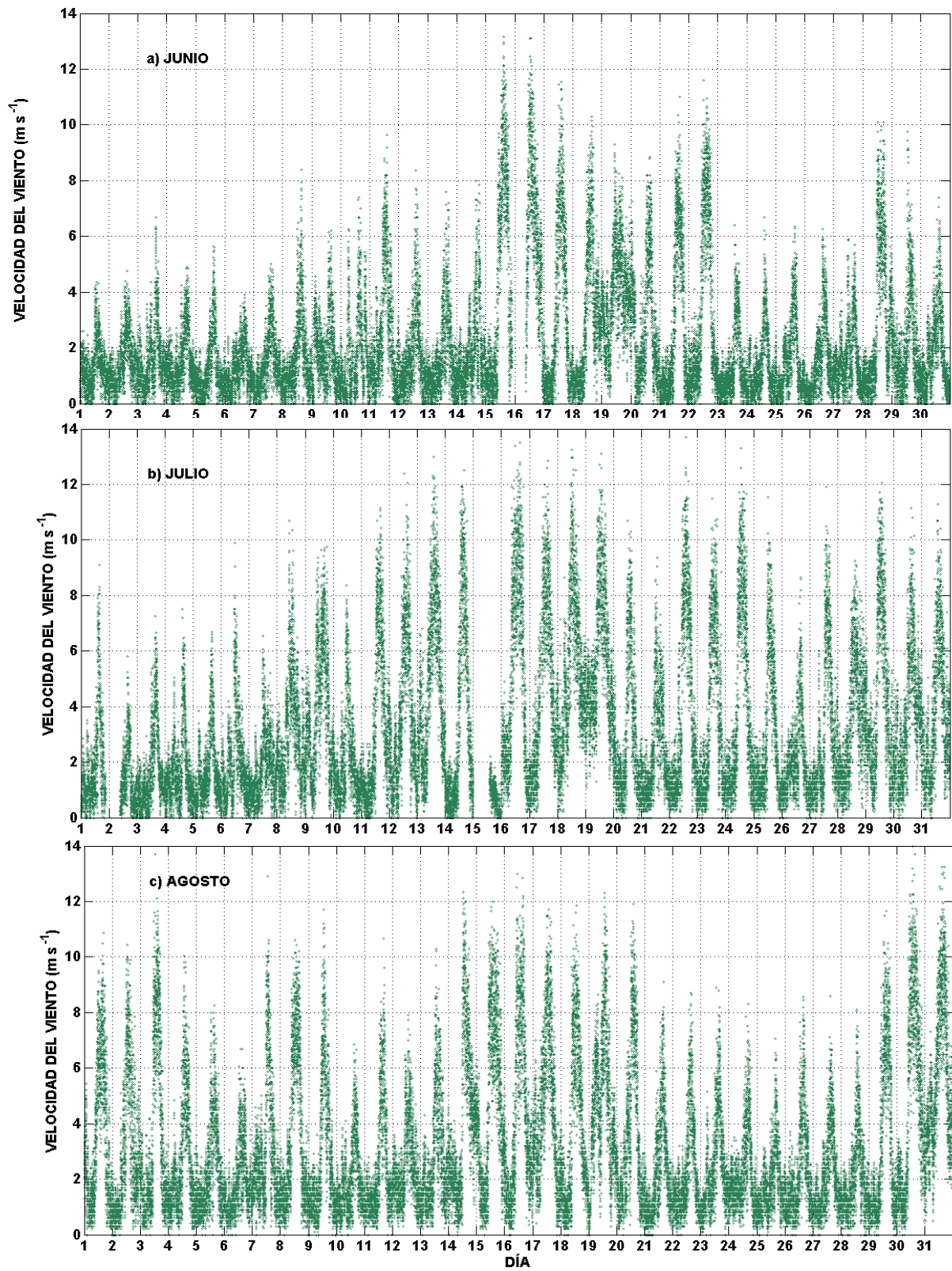


Figura 28. Series de tiempo de datos de 1 minuto de velocidad del viento para a) junio, b) julio y c) agosto en el valle de Cumbayá, Ecuador.

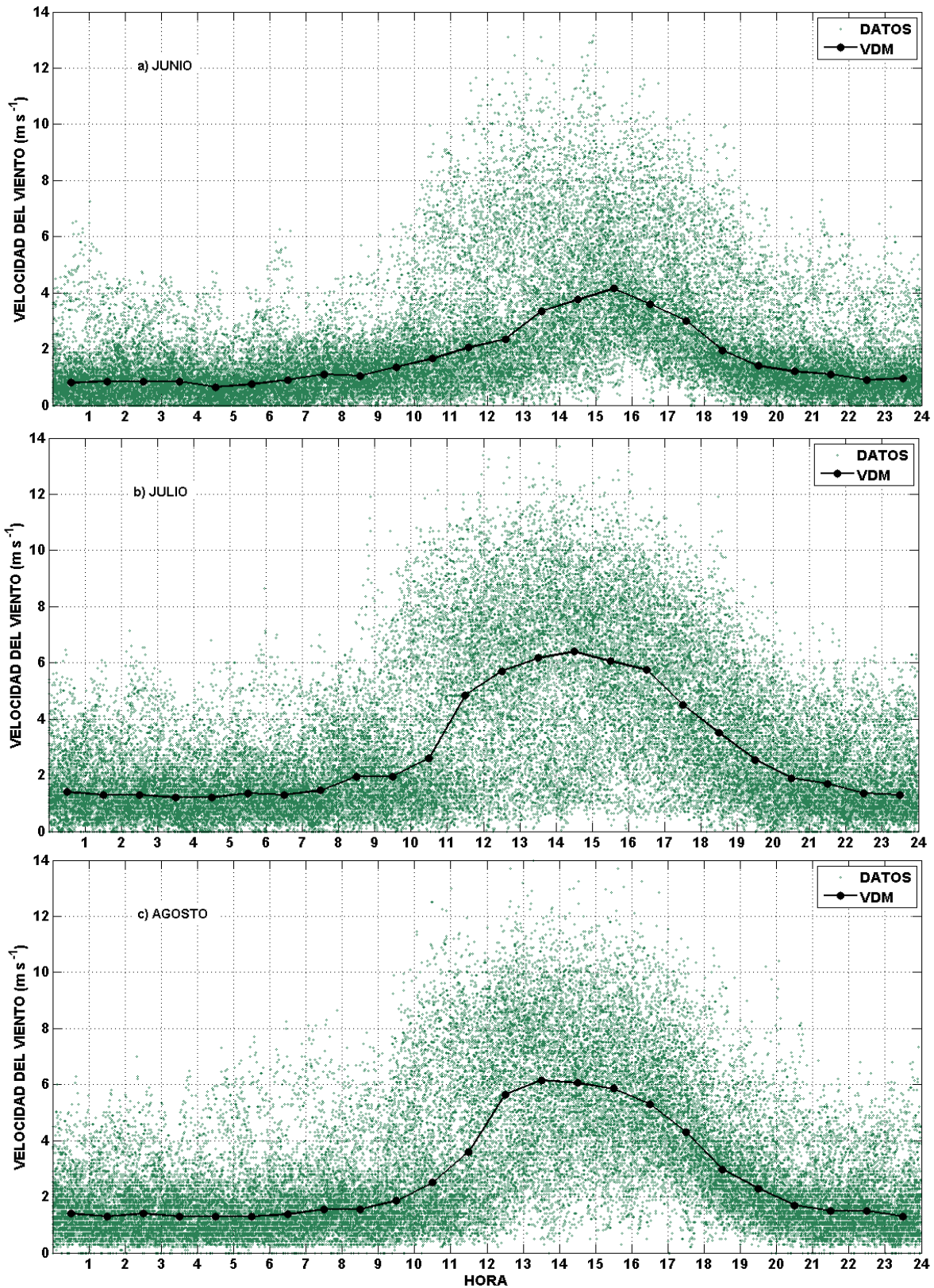


Figura 29. Perfiles diarios de velocidad del viento para a) junio, b) julio, c) agosto en el valle de Cumbayá. Los puntos verdes son todos los puntos tomados en el mes. La línea negra representa la variación diaria de mediana (VDM) cada 30 minutos.

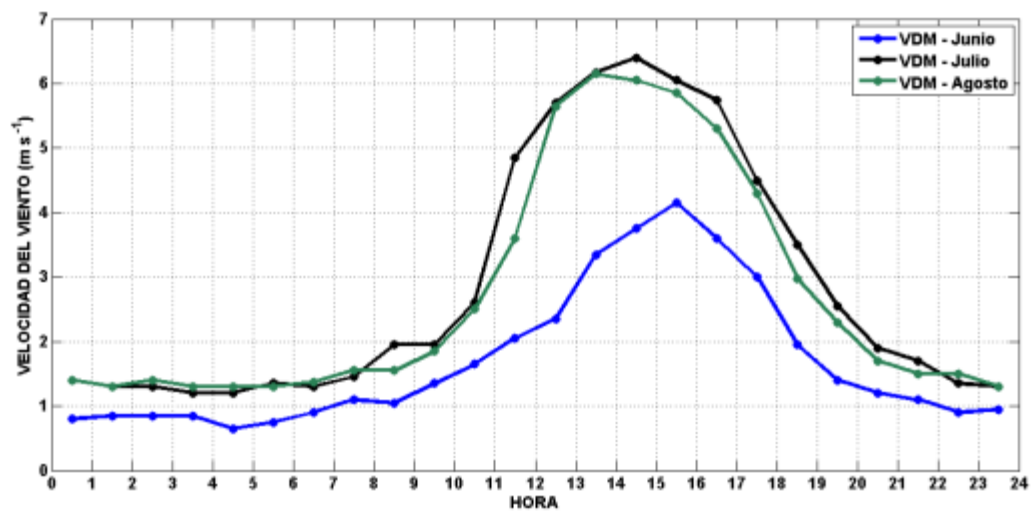


Figura 30. Variaciones diurnas de velocidad del viento, superpuestas mensualmente para el valle de Cumbayá. Para junio (azul), julio (negro) y agosto (verde).

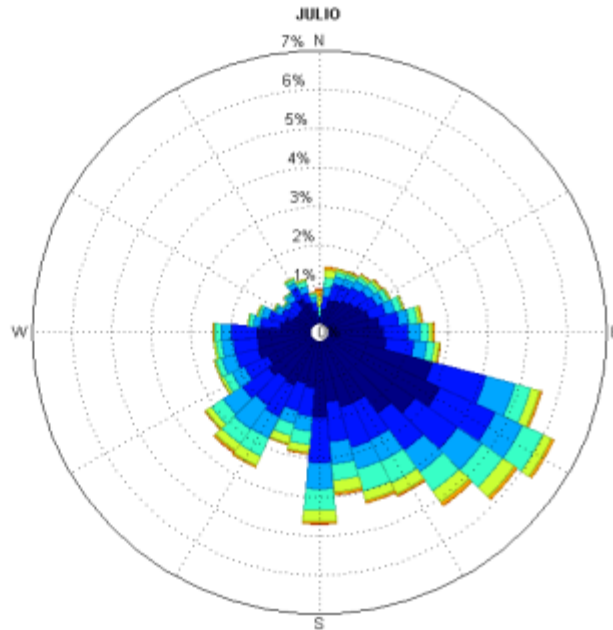
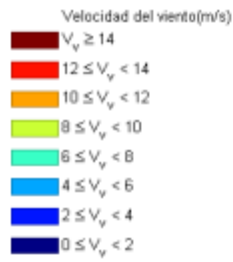
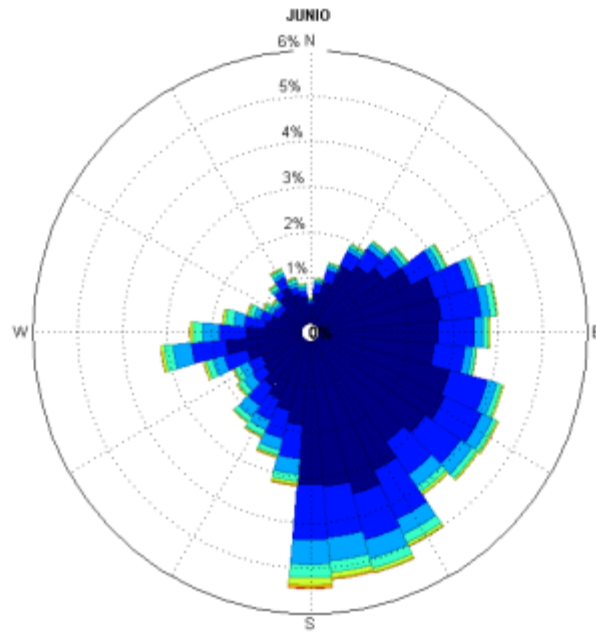
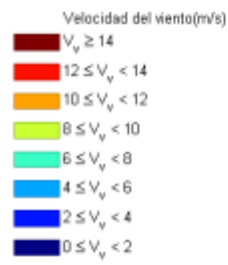


Figura 31. Rosas de vientos para los meses de junio y julio.

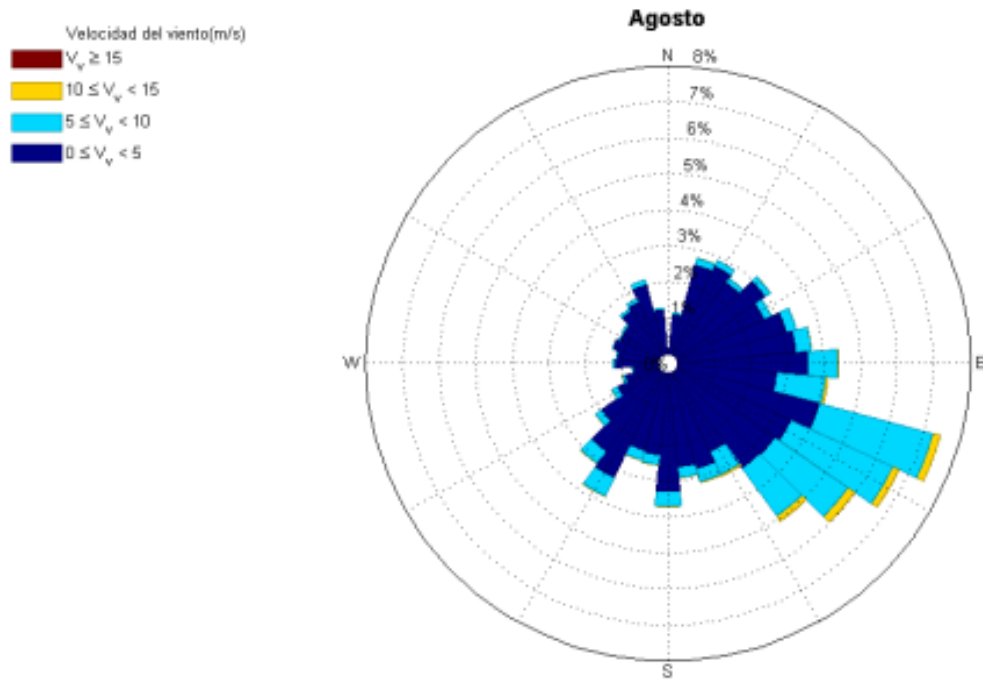


Figura 32. Rosa de vientos para el mes de agosto

4.6 Precipitación

Los meses de junio, julio y agosto no fueron meses significativos en cuanto a lluvia, tan solo se registró 6 mm durante junio, y 0 mm/m² el resto de los meses. Es importante resaltar que el equipo no registro lluvia durante estos meses sin embargo esto no indica la posibilidad de que hayan existido eventos de rocío o escarcha que estarían por debajo del límite de detección del pluviómetro

El mes de mayo registró un evento significativo de precipitación que debe ser mencionado por su alta cantidad de lluvia. El 23 de mayo se registró 40.6 mm de lluvia de las cuales 33.2 mm se registró entre las 02:00 y las 04:00. En el resto del mes se registró en total 49.9 mm de lluvia por lo tanto tan solo en 23 de mayo representó el 81% de la lluvia total en este mes.

El informe de calidad de aire 2013 de la Secretaría de ambiente muestra que la precipitación máxima de un día en todo el año en la estación de Tumbaco fue de 38.3 mm pero que ocurrió durante el mes de marzo. El hecho que se haya registrado un evento como el actual pero en otra estación demuestra la significancia de las mediciones que actualmente se están realizando en la EMA-USFQ, que a futuro serán necesarios para la inter comparación de datos con los obtenidos por la Secretaría de Ambiente del DMQ.

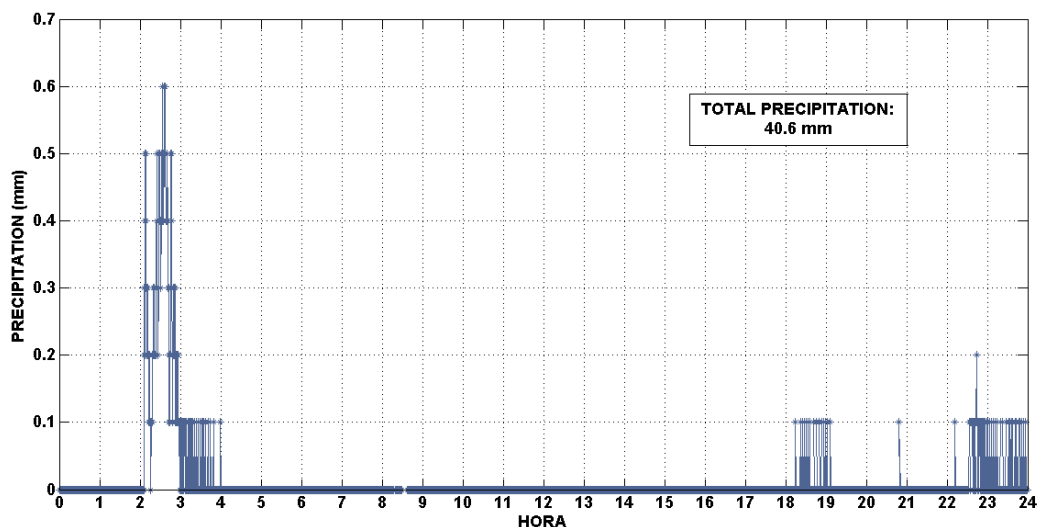


Figura 33. Precipitación con un valor total de 40.6 mm registrada durante el 23 de mayo del 2014 en Cumbayá, Ecuador.

5 Conclusiones

El análisis presentado en esta investigación de las observaciones meteorológicas de radiación solar, temperatura ambiente, humedad relativa, presión atmosférica y precipitación durante los meses de junio, julio y agosto de 2014 en la Estación de Mediciones Atmosféricas de la USFQ es el primero que se presenta para el valle de Cumbayá, Ecuador.

El análisis del flux de radiación solar muestra que en el valle de Cumbayá se tiene 12 horas de luz solar desde las 06:30 hasta las 18:30. Durante este tiempo se ha determinado que la presencia de nubes influye directamente en la cantidad de radiación solar que llega a la superficie. Por lo tanto el pico de la curva de variación diurna del flux de radiación solar en junio ocurre a las 11:30 y tiene un valor de 600 W m^{-2} , y la curva muestra una estructura de nubosidad considerable durante todo el día. Julio en contraste fue un mes despejado por ello registró valores pico de la curva de perfil diurno de 1000 W m^{-2} , entre las 12:00 y 13:00. Finalmente, agosto también fue un mes despejado en horas de la mañana alcanzando, de la

misma manera, un pico de la curva de perfil diurno de 1000 W m^{-2} entre 11:30 y 12:30. Sin embargo, también mostró ser un mes con una estructura de nubes significativa que inició a partir de las 13:00 y continua durante el resto del día.

En cuanto a temperatura, se ha establecido que las temperaturas más bajas se dan en la madrugada, registrando temperaturas de $13^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ para junio, $12^{\circ}\text{C} \pm 3^{\circ}\text{C}$ para julio y $12^{\circ}\text{C} \pm 2.5^{\circ}\text{C}$ para agosto. La temperatura aumenta con la salida del sol, llegando a sus picos de 2 horas después del pico del flux de radiación solar. Por ello las temperatura más altas se registran a las 14:00 con valores de $22.6^{\circ}\text{C} \pm 2.5^{\circ}\text{C}$ para junio, $24^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ para julio, y $23^{\circ}\text{C} \pm 1.5^{\circ}\text{C}$ para agosto. Ciertamente los meses más calurosos se experimentaron en julio y agosto donde julio presento en 8 ocasiones temperaturas sobre los 26°C al medio día, y agosto tan solo mostró en una ocasión temperatura menores a 24°C al medio día. Julio y agosto al ser meses con menos cobertura de nubes, también experimentaron un proceso de enfriamiento radiativo más rápido que se tradujo en temperaturas bajas durante las madrugadas.

Las observaciones de humedad relativa muestran dos aspectos importantes: la relación que existe entre temperatura y humedad, y la relación que existe entre cobertura de nubes y humedad. Existe una relación inversa entre temperatura y humedad, en la cual a mayor temperatura se evidencia menor humedad, esto es porque a una mayor temperatura ambiente existe un desplazamiento del equilibrio termodinámico. Por lo tanto la curva de variación diurna en junio mostró valores de humedad relativa de 90% en las madrugadas, valores bajos del 35% en horas de la tarde y valores altos del 90%. Julio mostró ser un mes más seco, por ello la curva de variación diurna muestra valores bajos de humedad relativa de hasta 75% en la madrugada, luego durante la tarde existen valores bajos del 30%, y las noches fueron secas

con valores de hasta 50%. Por último la curva de variación diurna media del mes de agosto presentó humedades relativas del 80% en las madrugadas, luego valores bajos del 30% en las tardes y noches con registros de hasta el 80% de humedad relativa.

A partir de los perfiles de variación diurna obtenidos se revela que la presión atmosférica en Cumbayá se comporta como una onda atmosférica cuyas crestas ocurren a las 09:00 y 21:00, y sus valles ocurren a las 04:00 y 16:00 mostrando una variación de la presión entre 762 hPa y 765 hPa. Por lo tanto el periodo de la onda de presión atmosférica es de 12 horas y su amplitud es de 1.6 hPa.

Respecto de la velocidad del viento la curva de variación diurna muestra hasta las 09:00, existen velocidades del viento bajas menores a 2 m s^{-1} en junio, entre 1 y 4 m s^{-1} para julio y velocidades menores a 2 m s^{-1} en agosto. Después de las 09:00 existe un incremento en la velocidad del viento hasta llegar a unos picos que para los meses de junio, julio y agosto varían entre 2 y 8 m s^{-1} , 2 y 13 m s^{-1} y 4 y 10 m s^{-1} respectivamente. Finalmente durante la noche, la velocidad disminuye hasta valores menores a los 2 m s^{-1} en junio, valores entre 1 y 4 m s^{-1} en julio y valores menores a los 2 m s^{-1} en agosto.

En cuanto a dirección del viento, se ha encontrado un rango de movimiento durante los tres meses que se localiza en la dirección Sur y Sureste que se atribuye a la cercanía con la zona de convergencia intertropical que provoca que existan vientos que poseen una componente meridional del sur y una componente zonal del este.

No hubo eventos significativos de lluvias durante junio, julio y agosto. Hubo un evento importante de precipitación que se registró el 23 de mayo en el cual durante la madrugada y en

horas de la noche, se registró en total 40.6 mm, de los cuales 33.2 mm ocurrieron en el lapso de 2 horas entre 02:00 y 04:00.

Por primera vez se realiza un trabajo académico que va mas allá a la de un usuario de datos, en el cual se realizó un trabajo completo que constituyó en la instalación de la estación meteorológica, el manejo y depuración de los datos crudos, y el análisis de los datos generados. El trabajo de instalación de la estación meteorológica es el primero que se realiza en una universidad en todo el país.

Esta investigación muestra que el análisis de los datos meteorológicos de 1 - minuto son confiables para ser usados en el desarrollo de nuevas investigaciones. Dentro de esta primera evaluación de las variables meteorológicas la información recopilada por la Estación de Mediciones Atmosféricas de la Universidad San Francisco de Quito, muestra tener una alta resolución temporal, generando datos de buena calidad que pueden utilizarse como información de línea base para aplicarse en el desarrollo de modelos atmosféricos que contribuyan al entendimiento de las condiciones meteorológicas y de calidad del aire en el valle de Cumbayá.

Finalmente se recomienda realizar estudios de intercomparación con otras estaciones automáticas de monitoreo atmosférico. Específicamente se recomendaría hacer el trabajo de intercomparación de los datos con la estación de Tumbaco de la Secretaría del Ambiente del Distrito Metropolitano de Quito, por ser la estación más cercana a la EMA-USFQ. Adicionalmente ya que la EMA esta generando datos valiosos de concentración de ozono en el valle de Cumbayá también se recomienda hacer un estudio que relacione la concentración de ozono troposférico respecto a las condiciones meteorológicas.

6 Bibliografía

- Met Office education*. (22 de Septiembre de 2014). Obtenido de Met Office:
<http://www.metoffice.gov.uk/education/teens/case-studies/heatwave>
- Red de estaciones Meteorológicas*. (2014). Recuperado el 22 de Septiembre de 2014, de Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología: <http://www.serviciometeorologico.gob.ec/red-de-estaciones-meteorologicas/>
- Solar zenith angle*. (2014). Recuperado el 23 de Septiembre de 2014, de Regional and Mesoscale Meteorology Branch:
<http://rammb.cira.colostate.edu/wmovl/vrl/tutorials/euromet/courses/english/nwp/n5720/n5720005.htm>
- Ahrens, D. C. (2009). *Meteorology today: an introduction to weather, climate, and the environment*. Belmont, CA: Brooks/Cole, CengageLearning.
- Almorox, J. (s.f). *Aplicaciones de la Climatología y Meteorología*. Recuperado el 21 de Noviembre de 2014, de Universidad Politecnica de Madrid: <http://ocw.upm.es/ingenieria-agroforestal/climatologia-aplicada-a-la-ingenieria-y-medioambiente/contenidos/introduccion/aplicaciones-de-la-climatologia-y-meteorologia>
- American Meteorological Society. (26 de January de 2012). Recuperado el 10 de Octubre de 2014, de Meteorology glossary: <http://glossary.ametsoc.org/wiki/Precipitation>
- Arciszewska, C., & McClatchey, J. (2001). The Importance of meteorological data for modelling air pollution using ADMS-Urban. *Meteorological Applications*, 345-350.
- Australian renewable energy Agency. (2013). Solar energy. En *Australian Energy resource assessment* (págs. 261 - 284). Australian renewable energy Agency.
- Banta, R., Pichugina, Y., Kelley, N., Hardesty, M., & Brewer, A. (Junio de 2013). WIND ENERGY METEOROLOGY: Insight into Wind Properties in the Turbine-Rotor Layer of the Atmosphere from High-Resolution Doppler Lidar. *Bulletin of the Meteorological American Society*, págs. 883-902.
- Builtjcs, P. J. (2004). Major Twentieth Century Milestones in Air Pollution Modelling and its Applications. *Air Pollution Modeling and Its application XIV*, 3-17.
- Calvo, M. S. (2002). *Tratado de la contaminación atmosférica: Problemas, tratamiento y gestión*. Madrid: Ediciones Mundi-Prensa.

- Cazorla, M. (2014). Atmospheric measurement station at Universidad San Francisco de Quito (EMA): ground-based physical meteorology instrumentation and assessment of initial measurements. *Avances en Ciencias e Ingenierias*, 21-30.
- Cronin, W. T. (2014). ON the choice of average solar zenith angle. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 2994 - 3003.
- Giancoli, D. C. (2009). *Physics for scientists & engineers with modern physics*. Upper Saddle River, NJ: Pearson Prentice Hall.
- Godish, T. (1991). *Air Quality*. Michigan: Lewis Publishers Inc.
- Hartmann, D. L. (1994). *Global physical climatology*. Washigton: Academic Press.
- IIA-USFQ. (2014). *Instituto de Investigaciones Atmosféricas USFQ (IIA-USFQ)*. Recuperado el 10 de July de 2014, de Universidad San Francisco de Quito:
http://www.usfq.edu.ec/programas_academicos/colegios/politecnico/institutos/iia/Paginas/default.aspx
- INAMHI. (2014). *Meteorología*. Recuperado el 19 de Septiembre de 2014, de Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología: <http://www.serviciometeorologico.gob.ec/clima/>
- Knievel, J. (2005). Recuperado el 3 de Noviembre de 2014, de National Center for Atmospheric Research:
https://www.ral.ucar.edu/projects/armyrange/references/forecastconf_8_05/01_mesoscale_vs_synoptic.pdf
- Manabe, S., & Wetherald, R. (1967). Equilibrium of the atmosphere with a given distribution of relative humidity. . *Journal of the atmospheric science*, 241 - 259.
- Matzarakis, A., Rutz, F., & Mayer, H. (2007). Modelling radiaiton fluxes in simple and complex environments - application of the RayMan model. *Int. J Biometeorology*, 323 - 334.
- NASA. (12 de julio de 2000). *Earth observatory*. Recuperado el 5 de Noviembre de 2014, de National Aeronautics and Space administration:
<http://earthobservatory.nasa.gov/IOTD/view.php?id=703>
- NASA. (2014). Recuperado el 15 de Octubre de 2014, de National Aeronautics and Space Administration: http://solarsystem.nasa.gov/scitech/display.cfm?ST_ID=2517
- NOAA. (2014). *Definitions*. Recuperado el 10 de Octubre de 2014, de National Oceanic and Atmospheric Administration: <http://graphical.weather.gov/definitions/defineRH.html>
- Oke, T. R. (2004). *Siting and exposure of meteorological instruments at urban sites*. Banff: NATO/CCMS International Technical Meeting on Air Pollution Modelling and its Application.

- Parra, R. (2012). Evaluación preliminar de la temperatura media en superficie del Ecuador para el año 2010 obtenida mediante el modelo Weather Research Forecasting(WRF). *Avances en Ciencias e Ingenierías*, C27 - C35.
- Pleim, J., Mathur, R., & Rao, S. (2014). Integrated Meteorology and chemistry modeling: Evaluation and research needs. *Bulletin of the American Meteorological Society*.
- Plummer, N., Allsop, T., & Lopez, J. A. (2003). *Guidelines on Climate Observation Networks and Systems*. Geneva: World Meteorological Organization.
- Secretaria de Ambiente. (2013). *Informe de la Calidad del Aire de Quito 2013*. Quito: Secretaria de Ambiente.
- Steenefeld, G. J., & Holtslag, A. M. (2010). Meteorological Aspects of Air Quality. En G. C. Romano, *Air Quality in the 21st Century* (págs. 67-114). New York: Nova Science Publisher, Inc.
- UNICEF. (22 de Septiembre de 2014). *Unicef Ecuador*. Obtenido de Unicef: http://www.unicef.org/ecuador/emergencias_11637.htm
- Vallero, D. A., Boubel, R. W., Fox, D. L., Turner, B., & Stern, A. C. (2008). *Fundamentals of air pollution*. San Diego: Elsevier Academic Press.
- Walcek, C. J. (1993). Cloud Cover and its Relationship to Relative Humidity in a Springtime Midlatitude Cyclone. *Monthly weather review*, 1021 - 1035.
- Walise, D. E. (1993). A Satellite derive Climatology of the ITCZ. *Journal of Climate*, 2162-2174.
- Wallace, J. M., & Hobbs, P. V. (2006). *Atmospheric Science: An Introductory Survey*. Amsterdam: Elsevier Academic Press.
- WMO. (2014). Recuperado el 15 de Octubre de 2104, de World Meteorological Organization: https://www.wmo.int/pages/themes/weather/index_en.html