

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE ASUNCIÓN**  
**FACULTAD DE CIENCIAS QUÍMICAS**  
**MAESTRÍA EN QUÍMICA AMBIENTAL**



**DETERMINACIÓN Y ANÁLISIS DE LA FORMACIÓN  
FOTOQUÍMICA DE OZONO TROPOSFÉRICO EN UN ÁREA  
DE ELEVADA AFLUENCIA VEHICULAR DEL GRAN  
ASUNCIÓN, PARAGUAY.**

**MIRLA CATALINA CONTEIRO RUIZ DÍAZ**

Tesis presentada a la Facultad de Ciencias Químicas de la Universidad Nacional de Asunción, como requisito para la obtención del grado de Magister en Química Ambiental. Departamento de Físicoquímica.

ASUNCIÓN – PARAGUAY.

Noviembre – 2021.

**DETERMINACIÓN Y ANÁLISIS DE LA FORMACIÓN  
FOTOQUÍMICA DE OZONO TROPOSFÉRICO EN UN ÁREA  
DE ELEVADA AFLUENCIA VEHICULAR DEL GRAN  
ASUNCIÓN, PARAGUAY.**



**MIRLA CATALINA CONTEIRO RUIZ DÍAZ**

Orientador: Prof. Dr. Angel Alberto Rincón Rodríguez

Tesis presentada a la Facultad de Ciencias Químicas de la Universidad Nacional de Asunción, como requisito para la obtención del grado de Magister en Química Ambiental. Departamento de Físicoquímica.

ASUNCIÓN – PARAGUAY.

Noviembre – 2021.

Conteiro Ruiz Díaz, Mirla Catalina

Determinación y Análisis de la Formación Fotoquímica de Ozono Troposférico en un Área de Elevada Afluencia Vehicular del Gran Asunción, Paraguay. / Mirla Catalina Conteiro Ruiz Díaz. - - San Lorenzo: La Autora, 2021.

XIII, 88 p.: fig.; 30 cm.

Tesis presentada a la Facultad de Ciencias Químicas – UNA, como requisito para la obtención del grado de Magister en Química Ambiental.

1. TROPOSPHERIC OZONE. 2. VEHICULAR TRAFFIC I. Título.

CDD: 577.14

C761d

**DETERMINACIÓN Y ANÁLISIS DE LA FORMACIÓN  
FOTOQUÍMICA DE OZONO TROPOSFÉRICO EN UN ÁREA  
DE ELEVADA AFLUENCIA VEHICULAR DEL GRAN  
ASUNCIÓN, PARAGUAY.**

**MIRLA CATALINA CONTEIRO RUIZ DÍAZ**

Aprobado en fecha, 23 de noviembre de 2021.

Tribunal Examinador:

Prof. Dr. Michel Osvaldo Galeano.      FCQ/UNA

Prof. Dr. Derlis Gregor.                      FIUNA/UNA

Prof. MSc. Sergio Méndez.                  FP/UNA

Prof. Dr. Fernando L. Fertonani.          IBILCE/UNESP          Docente extranjero invitado.

Prof. Dr. Angel Alberto Rincón Rodríguez.  
Orientador.

Prof. Dra. Fátima Yubero.  
Directora de Postgrado.

## **Dedicatoria**

*A mi Ángel: Maximiliano y a mi Flor: Cataleya,*

*A mi madre: Zunilda Ruiz Díaz,*

*A mi compañero de vida: Federico Quintana,*

*A mis mentores: Dr. Angel Rincón, MSc. Francisco Ferreira,*

*Dra. Fátima Yubero, Dr. Fernando Fertoni y Lic. Amb. Samuel Jara,*

*A mis amigos: Edgar López, Fátima Báez y Carlos Samudio.*

## Agradecimientos

- Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT), por la beca (Contrato N° 007/2018) otorgada a mi persona, para la realización de la Maestría en Química Ambiental (CONACYT – POSG-17-105), en el marco del “Programa de Incentivos para la Formación de Docentes Investigadores”.

- A la empresa: *Consultora de Monitoreo Ambiental Sociedad Anónima (CMA S.A)*, por proveer el equipo utilizado (sensor portátil AEROQUAL® Serie 500) para llevar a cabo esta investigación.

- A la Lic. Luciana Martínez, por permitir colocar el sensor en su propiedad.

- Al Ing. Edgar López por la ayuda y el apoyo, tanto académico como emocional brindado durante el transcurso de esta Maestría.

- A la DINAC y a su plantel de colaboradores, por proveer los datos necesarios para enriquecer el análisis esta investigación, en especial a la Lic. María Lourdes Aveiro y al Lic. Héctor López Mayans.

- Al MADES y a sus colaboradores, por proporcionar los datos que sirvieron de base complementaria para este trabajo, en especial al Ing. Federico Schroeder.

- Agradezco especialmente a mi tutor Dr. Angel Rincón, por la empatía, apoyo incondicional y acompañamiento constante.

- Agradezco de sobremanera a los profesores: Dr. Angel Rincón, MSc. Francisco Ferreira, Dra. Fátima Yubero, Dr. Michel Galeano, Dr. Fernando Ferttonani y al Dr. Fernando Méndez; por el acompañamiento y conocimiento brindado, ya que fueron mi ejemplo y sostén, tanto en la parte académica como personal.

- Además, agradezco a los miembros de la mesa examinadora: Prof. Dr. Michel Galeano, Prof. Dr. Derlis Gregor, Prof. MSc. Sergio Méndez y al docente extranjero invitado Prof. Dr. Fernando Ferttonani, por las sugerencias y conocimientos aportados, que ayudaron a enriquecer y mejorar este trabajo de investigación.

# DETERMINACIÓN Y ANÁLISIS DE LA FORMACIÓN FOTOQUÍMICA DE OZONO TROPOSFÉRICO EN UN ÁREA DE ELEVADA AFLUENCIA VEHICULAR DEL GRAN ASUNCIÓN, PARAGUAY.

Autor: MIRLA CATALINA CONTEIRO RUIZ DÍAZ.

Orientador: ANGEL ALBERTO RINCÓN RODRÍGUEZ.

## RESUMEN

El ozono troposférico es un contaminante secundario producido en la superficie terrestre a partir de la reacción fotoquímica de sus precursores (NO<sub>x</sub> y COVs). El presente trabajo de investigación tuvo como objetivo principal la determinación de la formación fotoquímica del ozono troposférico (O<sub>3</sub>) generado en un área del Gran Asunción-Paraguay, en un punto reconocido por su elevada afluencia vehicular, mediante el uso de un equipo portátil AEROQUAL® Serie 500. El periodo de medición abarcó la estación otoñal a partir del 18 de marzo al 18 de junio de 2021, durante las 24 h del día. Con el fin de realizar el correcto análisis de los resultados obtenidos se midieron en simultáneo, los parámetros meteorológicos de temperatura (°C) y humedad relativa (%) con el mismo sensor, acumulando 26665 datos para cada parámetro medido. Mientras que, los datos de velocidad (m s<sup>-1</sup>), dirección del viento (°) y precipitación (mm) fueron suministrados por la Red de Estaciones Meteorológicas Automáticas del Departamento de Servicios Meteorológicos e Hidrológicos de la Dirección Nacional de Aeronáutica Civil. Asimismo, los datos del parámetro radiación solar (W m<sup>-2</sup>), fueron proporcionados por la estación de calidad del aire del Ministerio del Ambiente y Desarrollo Sostenible. En este sentido, el análisis estadístico de los datos fue realizado a través del software R-Project, mientras que los gráficos fueron diseñados con los paquetes estadísticos R-Openair y Minitab®19. El estudio realizado, arrojó un valor promedio de 2,29 µg m<sup>-3</sup> para la concentración de ozono troposférico, con una desviación estándar de 3,73. Asimismo, se logró registrar un pico máximo de 58 µg m<sup>-3</sup>. Es de destacar que las mayores concentraciones se registraron en horas de la madrugada, al medio día y se midieron picos durante los fines de semana. Con los resultados obtenidos es posible indicar, que las concentraciones del contaminante ozono troposférico no superaron los valores límites permisibles por la legislación nacional ni internacional.

**Palabras-clave:** *Ozono troposférico, tráfico vehicular, contaminación atmosférica.*

# DETERMINATION AND ANALYSIS OF THE PHOTOCHEMICAL FORMATION OF TROPOSPHERIC OZONE IN AN AREA OF HIGH VEHICULAR TRAFFIC IN GRAN ASUNCIÓN, PARAGUAY.

Author: MIRLA CATALINA CONTEIRO RUIZ DÍAZ.

Advisor: ANGEL ALBERTO RINCÓN RODRÍGUEZ.

## SUMMARY

Tropospheric ozone is a secondary pollutant produced at the earth's surface from the photochemical reaction of its precursors (NO<sub>x</sub> and VOCs). The main objective of this research was to determine the photochemical formation of tropospheric ozone (O<sub>3</sub>) generated in an area of Gran Asunción-Paraguay, at a point known for its high vehicular traffic, by means of an AEROQUAL® 500 Series portable equipment. The measurement period covered the autumn season from March 18 to June 18, 2021, 24 h a day. In order to perform the correct analysis of the results obtained, the meteorological parameters of temperature (°C) and relative humidity (%) were measured simultaneously with the same sensor, accumulating 26665 data for each measured parameter. While the data on wind speed (m s<sup>-1</sup>), wind direction (°) and precipitation (mm) were provided by the Automatic Meteorological Stations Network of the Meteorological and Hydrological Services Department of the National Civil Aeronautics Directorate (Dirección Nacional de Aeronáutica Civil). Likewise, the data for the solar radiation parameter (W m<sup>-2</sup>) were provided by the air quality station of the Ministry of the Environment and Sustainable Development. The statistical analysis of the data was performed using R-Project software, while the graphs were designed using the R-Openair and Minitab®19 statistical packages. The study yielded an average value of 2.29 µg m<sup>-3</sup> for tropospheric ozone concentration, with a standard deviation of 3.73. A maximum peak of 58 µg m<sup>-3</sup> was also recorded. It should be noted that the highest concentrations were recorded in the early morning and midday hours, and peaks were measured during weekends. With the results obtained, it is possible to indicate that the concentrations of tropospheric ozone pollutant did not exceed the limit values allowed by national and international legislation.

**Keywords:** *Tropospheric ozone, vehicular traffic, air pollution.*



**ÍNDICE**

1.	INTRODUCCIÓN.....	14
2.	JUSTIFICACIÓN.....	17
3.	OBJETIVOS .....	19
	3.1. Objetivo general .....	19
	3.2. Objetivos específicos .....	19
4.	REVISIÓN DE LITERATURA.....	20
	4.1. Marco teórico .....	20
	4.2. Antecedentes y marco normativo .....	29
5.	MATERIALES Y MÉTODOS .....	34
	5.1. Diseño de la investigación .....	34
	5.2. Descripción de la zona de muestreo .....	34
	5.3. Características técnicas del monitor portátil .....	40
	5.4. Procedimiento de medición.....	43
	5.5. Tratamiento y análisis de los datos.....	44
6.	RESULTADOS Y DISCUSIONES.....	45
7.	CONCLUSIONES .....	72
8.	SUGERENCIAS PARA INVESTIGACIONES FUTURAS .....	74
9.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	75
10.	ANEXO .....	86

10.1. Anexo.....	86
10.2. Anexo.....	87
10.3. Anexo.....	88

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1.	Fuentes de COVs y formación de componentes del Smog fotoquímico (AOS, PAN y O <sub>3</sub> ). .....	24
Figura 2.	Comparación de vías respiratorias. ....	27
Figura 3.	Alteraciones sobre la vegetación, provocadas por la exposición al ozono superficial. ....	28
Figura 4.	Imagen satelital del punto de muestreo seleccionado en color azul. ....	36
Figura 5.	Montaje del equipo AEROQUAL® Monitor Serie 500 con sensor de ozono, medición de temperatura y humedad relativa del aire. ....	38
Figura 6.	Clasificación del flujo del tráfico vehicular circulante en las Avenidas: Defensores del Chaco y Eusebio Ayala. ....	39
Figura 7.	Características principales del equipamiento de medición de calidad del aire utilizado para la campaña de medición. ....	41
Figura 8.	Partes principales del sensor de medición de ozono troposférico utilizado durante la campaña de medición. ....	42
Figura 9.	Ejemplos de sensores con resistencias sensibles al gas a base de óxidos semiconductores .....	43
Figura 10.	Concentración de Ozono ( $\mu\text{g m}^{-3}$ ) para la campaña de medición entre el 18 de marzo y 18 de junio de 2021. ....	49
Figura 11.	Variación temporal de Ozono ( $\mu\text{g m}^{-3}$ ) durante la campaña de medición entre el 18 de marzo y 18 de junio de 2021. ....	50
Figura 12.	Variación temporal de Ozono ( $\mu\text{g m}^{-3}$ ) durante la campaña de medición entre el 18 de marzo y 18 de junio de 2021. ....	55
Figura 13.	Evolución de la temperatura ambiente ( $^{\circ}\text{C}$ ) y la humedad relativa del aire (%) para la campaña de medición entre el 18 de marzo y 18 de junio de 2021. ....	56
Figura 14.	Resultados de la campaña de medición entre el 18 de marzo y 18 de junio de 2021, de las variables: concentración de O <sub>3</sub> ( $\mu\text{g m}^{-3}$ ), humedad relativa del aire (%), temperatura ambiente ( $^{\circ}\text{C}$ ), dirección ( $^{\circ}$ ) y velocidad del viento ( $\text{m s}^{-1}$ ). ....	58

Figura 15.	Gráfica temporal de la radiación solar ( $W m^{-2}$ ). .....	59
Figura 16.	Gráfica temporal de precipitaciones (mm). .....	61
Figura 17.	Gráfica temporal de precipitaciones (mm), radiación solar ( $W m^{-2}$ ), temperatura ( $^{\circ}C$ ) y formación de ozono ( $\mu g m^{-3}$ ). .....	63
Figura 18.	Frecuencia de velocidad del viento ( $m s^{-1}$ ) en función a la dirección del viento (%), durante el periodo de estudio. ....	64
Figura 19.	Gráfica Rosa de Contaminantes, indica la frecuencia de concentración de ozono ( $\mu g m^{-3}$ ) en función a la dirección, durante la campaña de medición. ....	65
Figura 20.	Gráfica de calendario, indica la variación temporal (días) de la concentración de Ozono ( $\mu g m^{-3}$ ) durante la campaña de medición. ....	66
Figura 21.	Gráfica de contorno, relaciona la concentración de Ozono ( $\mu g m^{-3}$ ) con la radiación solar ( $W m^{-2}$ ) y la dirección del viento ( $^{\circ}$ ), durante la campaña de medición entre el 18 de marzo y 18 de junio de 2021. ....	68
Figura 22.	Gráfica de contorno, relaciona la concentración de Ozono ( $\mu g m^{-3}$ ) con la precipitación (mm) y la radiación solar ( $W m^{-2}$ ), durante la campaña de medición entre el 18 de marzo y 18 de junio de 2021. ....	69
Figura 23.	Variación temporal de $O_3$ ( $\mu g m^{-3}$ ) y $NO_2$ ( $\mu g m^{-3}$ ) durante la campaña de medición entre el 7 de mayo y 15 de junio de 2021, en la Estación de Calidad del Aire del MADES. ....	71

**LISTA DE TABLAS**

Tabla 1. Normativas permisibles de ozono troposférico en la región latinoamericana y parámetros máximos sugeridos por la OMS, la EPA-US y la Unión Europea. ....	32
Tabla 2. Estadísticos de los parámetros de interés, obtenidos y proveídos durante la campaña de medición.....	46
Tabla 3. Intervalos angulares para la clasificación de la dirección del viento .....	67
Tabla 4. Valores estadísticos de los parámetros ozono troposférico y dióxido de nitrógeno (O <sub>3</sub> y NO <sub>2</sub> ). ....	70

**LISTA DE SIGLAS, ABREVIATURAS Y SÍMBOLOS**

AOS	Aerosoles orgánicos secundarios.
EPA	Environmental Protection Agency (Agencia de Protección Ambiental).
NH <sub>3</sub>	Amoniaco.
AMA	Área Metropolitana de Asunción.
Avda.	Avenida.
CFC	Clorofluorocarburos.
COVs	Compuestos orgánicos volátiles
COVsB	Compuestos orgánicos volátiles biogénicos.
CONAMA	Consejo Nacional del Medio Ambiente (Brasil).
DS	Decreto Supremo (Chile).
DINAC	Dirección Nacional de Aeronáutica Civil.
SO <sub>2</sub>	Dióxido de azufre.
NO <sub>2</sub>	Dióxido de nitrógeno.
US	United States (Estados Unidos).
FACEN	Facultad de Ciencias Exactas y Naturales.
FIUNA	Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de Asunción.
HC	Hidrocarburos.
h	Horas.
INE	Instituto Nacional de Estadística.
km	kilometro.
LIAPA	Laboratorio de Investigación de la Atmósfera y Problemas Ambientales.
PM	Material particulado.
<	Menor.
CH <sub>4</sub>	Metano.

$\text{m s}^{-1}$	metro por segundo.
$\mu\text{g m}^{-3}$	microgramo por metro cúbico.
$\text{mg m}^{-3}$	miligramo por metro cúbico.
MADES	Ministerio del Ambiente y Desarrollo Sostenible.
CO	Monóxido de carbono.
NO	Monóxido de nitrógeno.
PAN	Nitrato de peroxiacetilo.
$\text{N}_2$	Nitrógeno.
NOM	Normas Oficiales Mexicanas.
ODS	Objetivos de Desarrollo Sostenible.
OMS	Organización Mundial de la Salud.
ONU	Organización de las Naciones Unidas.
NO <sub>x</sub>	Óxidos de nitrógeno.
$\text{O}_2$	Oxígeno.
$\text{O}_3$	Ozono troposférico.
ppm	Partes por millón.
~	Próximo, aproximado.
$h\nu$	Radiación solar.
$\text{HO}_2\bullet$	Radical hidroperoxilo.
$\bullet\text{OH}$	Radical hidroxilo.
$\text{O}\bullet$	Radical oxígeno.
$\text{RO}_2$	Radical peroxilo.
Res.	Resolución.
SEAM	Secretaría del Ambiente.
UE	Unión Europea.
UNA	Universidad Nacional de Asunción.
$\text{W m}^{-2}$	Watt por metro cuadrado.

## 1. INTRODUCCIÓN

La calidad de vida de los seres humanos ha presentado una significativa mejoría desde el desarrollo de la revolución industrial y el uso de las tecnologías. Sin embargo, los avances de la civilización han generado impactos ambientales que afectan los recursos naturales, perjudicando a la salud de la biota en general (Chen et al. 2013; Wang et al. 2015; Xie et al. 2016).

En este sentido, teniendo en cuenta que una de las metas del tercer Objetivo de Desarrollo Sostenible (ODS) es reducir el número de muertes y enfermedades causadas por la polución y contaminación del aire (ONU 2018), la Organización Mundial de la Salud (OMS) en su última actualización sobre las Directrices de calidad del aire de setiembre del año 2021, recomienda la disminución de los niveles de los principales contaminantes del aire, con el fin de proteger la salud humana y ambiental. Ya que, estudios revelan que el 91% de la población mundial vive en lugares donde los niveles de contaminación del aire superan los límites de sus directrices (OMS 2021).

Cabe resaltar, que las investigaciones relacionadas a los efectos de la calidad del aire, han priorizado la formación de lluvia ácida, la generación de material particulado o la destrucción de la capa de ozono estratosférico. Sin embargo, investigadores (Feng et al. 2015; Wang et al. 2017; Xie et al. 2016) concluyen que el gas denominado ozono troposférico o antropogénico ( $O_3$ ), formado a nivel superficial (en la tropósfera) representa un potencial problema para la salud pública y ambiental, tanto en regiones urbanas como industriales (Wang et al. 2017).

Asimismo, considerando que el ozono troposférico es un oxidante fuerte formado a partir de las reacciones fotoquímicas de contaminantes ( $NO_x$  y COVs) que son sus precursores (Akimoto et al. 2015; Li et al. 2017; Xie et al. 2014), surge la necesidad



de mejorar el conocimiento sobre las condiciones de la calidad del aire en el Área Metropolitana del Gran Asunción. En concreto, la justificación para la realización de este trabajo se centra en determinar el comportamiento de la formación de dicho gas como resultado del incremento de las actividades generadoras de emisiones en un área específica.

En este contexto, se ha realizado una campaña de medición experimental de ozono troposférico en un área de elevada afluencia vehicular para determinar y analizar el comportamiento de dicho contaminante. Por lo tanto, los datos obtenidos en la misma, así como los aportados por el Ministerio del Ambiente y Desarrollo Sostenible (MADES) y la Dirección Nacional de Aeronáutica Civil (DINAC), fueron analizados cualitativa y cuantitativamente para el análisis temporal, que brindará información actual sobre la formación de ozono troposférico en un área puntual de la zona capitalina de nuestro país.

Esta tesis presenta el resultado de las mediciones y estimaciones realizadas a partir del 18 de marzo al 18 de junio de 2021, representando un periodo total de tres meses. Inicialmente, en el Capítulo 1 - INTRODUCCIÓN se realiza una breve descripción del trabajo realizado en el marco de esta tesis. En el Capítulo 2 - JUSTIFICACIÓN se presenta la justificación del tema planteado a lo largo de la investigación realizada. Posteriormente, el Capítulo 3 - OBJETIVOS presenta tanto el objetivo general como los objetivos específicos abordados para el desarrollo y cumplimiento de este trabajo investigativo. En el Capítulo 4 - REVISIÓN DE LA LITERATURA se presenta el marco teórico que sirvió de base científica para el conocimiento del tema tratado, así como los estudios realizados con anterioridad y el marco normativo. El Capítulo 5 - MATERIALES Y MÉTODOS detalla los materiales utilizados y la metodología aplicada para el cumplimiento de los objetivos establecidos. El Capítulo 6 - RESULTADOS Y DISCUSIÓN presenta los hallazgos de las determinaciones en función a la metodología y parámetros medidos, los compara con normativa vigente nacional e internacional y realiza el análisis de los resultados obtenidos. Seguidamente, el Capítulo 7 - CONCLUSIONES resume los principales hallazgos del estudio. El Capítulo 8 - SUGERENCIAS PARA INVESTIGACIONES FUTURAS, indica las posibles directrices para nuevas investigaciones. Además, el Capítulo 9 -

REFERENCIAS contiene la bibliografía consultada y finalmente, el Capítulo 10 - ANEXOS presenta la documentación complementaria como soporte adicional del presente estudio.

## 2. JUSTIFICACIÓN

La flota vehicular de Paraguay, según los datos reportados hasta julio de 2021 por la Dirección Nacional de Registro de Automotores, supera los 2,5 millones de vehículos, de los cuales, más de 1,6 millones corresponden a automóviles que representan una cantidad equivalente al 61,34% del total. Asimismo, el porcentaje restante de 38,65% representa a automóviles antiguos, motocicletas, motocicletas antiguas, tractores y maquinarias pesadas (DRA 2021).

Consecuentemente, considerando la estadística del año 2019, el parque automotor del servicio intermunicipal de transporte público de pasajeros tuvo una participación del 67% de buses con una antigüedad superior a diez años y una participación del 33% para buses con una antigüedad menor a diez años (Dirección Nacional de Transporte 2021).

El trabajo realizado por Recalde et al. (2021), asevera que en el área metropolitana del Gran Asunción transitan vehículos muy antiguos, los cuales utilizan combustible de origen fósil que afecta la calidad del aire de la ciudad. En este contexto, Borrego et al. (2018) han determinado que la calidad del aire urbano se ve afectado significativamente debido al incremento en la utilización de combustibles fósiles (gasolina y diésel) y solventes por parte de la flota vehicular.

Adicionalmente, Li et al. (2017) afirman un incremento exponencial del consumo de combustibles fósiles durante las últimas tres décadas que se encuentra vinculado a la contaminación por ozono troposférico. En este sentido, con relación a la medición y monitoreo del ozono troposférico en Asunción, el informe publicado por el Centro Mario Molina Chile en el 2014, en el marco del *Diagnóstico de Contaminación Atmosférica en Asunción y Recomendaciones para la Gestión de Calidad del Aire* (Centro Mario Molina Chile 2014), recomienda investigar y monitorear dicho

contaminante, debido a que no se encuentran registros previos de evaluación en un tiempo relativamente significativo en la ciudad capitalina.

Teniendo en cuenta que en la Resolución MADES N°488/2017, se establecen los requisitos necesarios para que los datos obtenidos en monitoreos de calidad del aire sean oficiales, seguidamente, se enuncian los considerados acordes a este trabajo de investigación: el fin debe ser investigativo, las mediciones deben estar basadas en los parámetros permisibles de calidad del aire de la Resolución MADES N°259/2015 y deben ser realizadas con instrumentos que cumplan con los métodos reconocidos, aprobados o certificados por la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (EPA-US) o siguiendo las directrices de la Unión Europea (U.E).

Por todo lo expuesto anteriormente, se ha realizado la medición y análisis de la concentración de Ozono troposférico en un área de elevada afluencia vehicular del Gran Asunción con fines investigativos. Además, se compararon los resultados obtenidos con los establecidos por la normativa nacional (Resolución MADES N° 259/15).

El interés en este trabajo surgió a partir de la necesidad de monitorear dicho contaminante para cuantificar, analizar y registrar los valores promedio de la formación fotoquímica del mismo, considerando que, es un compuesto secundario formado a partir de la reacción fotoquímica de contaminantes precursores producidos principalmente por la quema de combustibles fósiles procedentes del transporte vehicular.

El equipo electrónico utilizado es no invasivo y cumple con los estándares internacionales. Asimismo, es reconocido por la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (Environmental Protection Agency, EPA). Finalmente, se ha realizado un análisis de datos estadístico a través de un Software utilizado internacionalmente.

Los datos recabados servirán de base científica para estudios posteriores, ya que la normativa nacional vigente (Ley 5211/2014, Res. 222/2015, Decreto 1269/2019) considera necesario el monitoreo de la calidad del aire y clasifica al ozono troposférico como una sustancia contaminante que debe ser controlada, teniendo en cuenta que, a elevadas concentraciones este, causa daños a la salud humana y al medio ambiente.

### **3. OBJETIVOS**

#### **3.1.Objetivo general**

Determinar la formación fotoquímica del ozono troposférico (O<sub>3</sub>) generado en un área de afluencia vehicular en un periodo de tiempo representativo con una elevada frecuencia de muestreo en un punto determinado del Gran Asunción.

#### **3.2.Objetivos específicos**

- Realizar la medición cuantitativa de la concentración cinco-minutal del ozono troposférico generado por el área de influencia de las Avenidas Defensores del Chaco y Eusebio Ayala durante tres (3) meses de muestreo continuo.
- Determinar los parámetros ambientales que permitan complementar el análisis de la concentración medida de ozono troposférico tales como: humedad relativa, temperatura ambiente, dirección y velocidad del viento.
- Realizar el análisis temporal de las medidas mediante un tratamiento estadístico de los registros usando el Software R-Project y el paquete de análisis OpenAir.
- Comparar y analizar el cumplimiento de los parámetros permisibles de la concentración del ozono troposférico según normativa vigente nacional e internacional.

## 4. REVISIÓN DE LITERATURA

### 4.1. Marco teórico

De acuerdo a Baird y Cann (2012), la atmósfera terrestre no contaminada se encuentra conformada por aproximadamente: 78% de Nitrógeno ( $N_2$ ), 21% de Oxígeno ( $O_2$ ), 1% de Argón (Ar), 0,04 % de dióxido de carbono ( $CO_2$ ) y una cantidad variable de vapor de agua ( $H_2O$ ). En este sentido, es posible determinar la presencia en el aire limpio de sustancias contaminantes mediante variables de concentración en volumen (por ejemplo, partes por millón - ppm o microgramos por metro cúbico -  $\mu g m^{-3}$ ) existentes en ella (O’Ryan y Larraguibel 2000).

La contaminación del aire se produce cuando se alteran dichos componentes y agregan sustancias no deseadas a la atmósfera, las cuales producen efectos adversos en el medio ambiente y en la salud de los seres vivos (Zhongchao 2014). Debido al constante crecimiento poblacional e industrial en las grandes urbes, que ha conllevado a un aumento de las infraestructuras viales, a la cantidad de vehículos y a otros factores adversos relacionados como la deforestación y la actividad industrial; la atmósfera y por ende el aire urbano que respiramos se encuentra contaminado (Li et al. 2017).

En este contexto, la Organización Mundial de la Salud (OMS) establece que la contaminación del aire representa el mayor riesgo ambiental para la salud humana, ya que, causa enfermedades crónicas como: cáncer de pulmón, accidentes cerebrovasculares, cardiopatías, neumopatías y disfunción cognitiva tanto en lactantes como en niños y adolescentes. Dicha problemática de salud pública produce la muerte de aproximadamente 7 millones de personas por año en el mundo (OPS 2021).

Los contaminantes atmosféricos se clasifican en primarios y secundarios. Por un lado, los contaminantes primarios son emitidos directamente de las fuentes de emisión y son básicamente: material particulado (PM), dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>), óxidos de nitrógeno (NO<sub>x</sub>), hidrocarburos (HC), compuestos orgánicos volátiles (COVs), monóxido de carbono (CO) y amoníaco (NH<sub>3</sub>).

Por otro lado, los contaminantes secundarios son productos de las reacciones químicas de dos o más contaminantes primarios o generados como productos de reacciones con otros componentes de la atmósfera (Zhongchao 2014). Se clasifica como contaminante secundario al: ozono troposférico (O<sub>3</sub>), material particulado secundario, formaldehído, smog, a la niebla ácida, entre otros.

Considerando como foco de interés al ozono troposférico, cabe mencionar que los autores Seinfeld y Pandis (1997), resaltan que la dualidad del ozono en la atmósfera conlleva a la consideración del mismo como nocivo cuando se encuentra al nivel troposférico (capa baja de la atmósfera desde el suelo hasta la capa límite planetaria que dependiendo de la topografía, uso del suelo, variables meteorológicas, latitud, entre otras, se encuentra a una altura de 600 a 800 m, pero puede oscilar entre 1 y 2 km). El ozono atmosférico es considerado beneficioso cuando se halla a nivel estratosférico (atmósfera superior, ubicada entre unos 20 - 50 km del nivel del suelo) debido a que sirve de filtro, escudo o barrera de protección ante los rayos del sol y permite el paso de la luz ultravioleta esencial para la vida.

Anteriormente la comunidad científica afirmaba que el ozono troposférico era originado en la estratósfera y que por deposición llegaba hasta la tropósfera, debido a que el 90% del ozono es producido en la estratósfera por reacciones fotolíticas (Metcalf y Derwent 2005). Sin embargo, a través de varios estudios (Chudzyński et al. 2001; Gaona 2017; Skowera, Zuśka, y Baranowska 2020) es posible demostrar que el ozono troposférico es producto de reacciones fotoquímicas de los precursores: óxidos de nitrógeno (NO<sub>x</sub>) y compuestos orgánicos volátiles COVs (O’Ryan y Larraguibel 2000).

#### **4.1.1. Precursores del ozono troposférico**

Se consideran como contaminantes primarios precursores de la formación del ozono troposférico principalmente a los óxidos de nitrógeno (NO<sub>x</sub>) y a los compuestos orgánicos volátiles (COVs).

Por una parte, los NO<sub>x</sub> se producen durante la quema de maderas y combustibles fósiles, reaccionan violentamente con materiales combustibles y reductores. En contacto con el agua producen ácido, óxido nítrico y atacan a los metales. Entre los NO<sub>x</sub> se encuentran el óxido nítrico o monóxido de nitrógeno (NO), dióxido de nitrógeno (NO<sub>2</sub>), trióxido de nitrógeno (NO<sub>3</sub>), óxido nitroso (N<sub>2</sub>O) y el pentóxido de nitrógeno (N<sub>2</sub>O<sub>5</sub>). El óxido nitroso (N<sub>2</sub>O) es considerado un gas de efecto invernadero.

Por otra parte, los compuestos orgánicos volátiles (COVs), son compuestos que poseen elevada presión de vapor (0.01 kPa a 20°C) y una baja solubilidad en agua (Mendoza, León, y Caballero 2010). Bajo esta clasificación se hallan los hidrocarburos y otros tipos de compuestos orgánicos volátiles que podrían llegar a 600 especies (Velázquez 1997). Las especies de mayor interés con relación a la formación de ozono incluyen a los compuestos aromáticos (por ejemplo, benceno, tolueno y xilenos) y carbonilos (por ejemplo, formaldehído y acetaldehído) (Blanchard y Fairley 2001).

#### **4.1.2. Fuentes de los precursores de Ozono Troposférico**

##### **4.1.2.1. Fuentes de NO<sub>x</sub>**

Los NO<sub>x</sub> podrían provenir de fuentes antropogénicas como de fuentes naturales. Entre las principales fuentes antropogénicas de NO<sub>x</sub> se destacan: el efecto secundario de la combustión a elevadas temperaturas que provocan cadenas de nitrógeno y oxígeno en los gases de escape de vehículos motorizados, la generación de electricidad y calor, el uso industrial del ácido nítrico, la fabricación de explosivos y fertilizantes, entre otros.

Además, pueden ser emitidos por fuentes naturales como: fenómenos atmosféricos tormentosos, procesos volcánicos, oxidaciones amoniacales, entre otras (Schwela y Van der Wiele 2011; Velázquez 1997).



#### 4.1.2.2. Fuentes de COVs

Los COVs pueden ser emitidos a la troposfera en cantidades elevadas por fuentes antropogénicas, geogénicas y biogénicas (Cheng y Chang 2009; Gaona 2017).

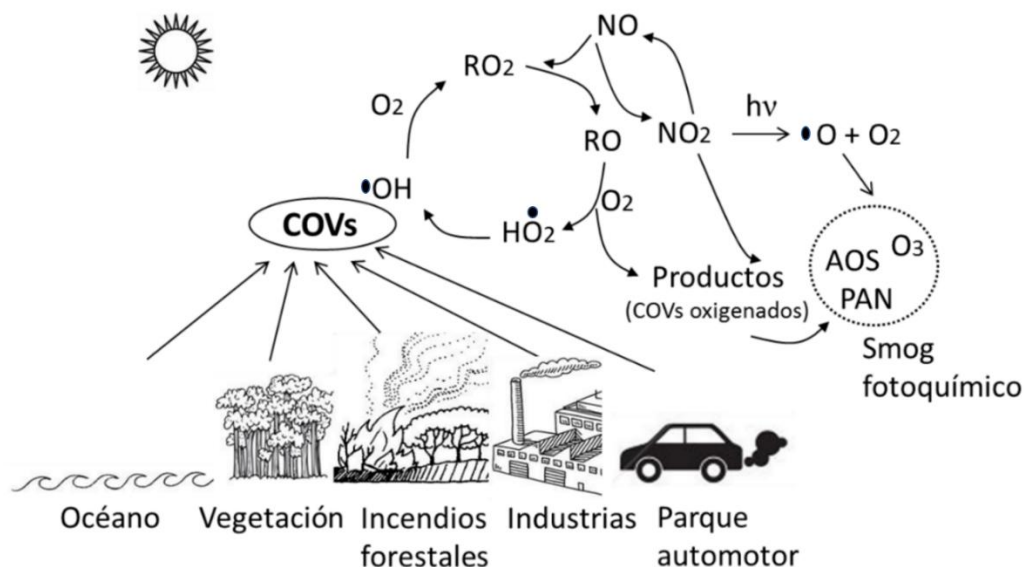
Entre las fuentes antropogénicas se pueden citar: los gases de escape de vehículos que utilizan combustible fósil, evaporación de combustibles líquidos, pinturas y solventes (EPA 2016; Zhongchao 2014). Además, los seres humanos al exhalar, emiten un compuesto biológico volátil llamado isopreno, el cual es un subproducto metabólico de la síntesis del colesterol (Criollo et al. 2016).

Por su parte, entre las fuentes geogénicas se encuentran: las aguas superficiales continentales, los océanos, los depósitos geológicos de hidrocarburos, los sedimentos y los volcanes. Finalmente, entre las fuentes biogénicas podemos citar a la vegetación, la cual emite compuestos orgánicos volátiles biogénicos (COVsB) como mecanismo de defensa ante plagas, insectos y cambios de temperatura (Camargo, Bolaño, y Álvarez 2010).

Asimismo, estudios revelan que los COVsB pueden ser producidos a partir de la basura o material orgánico en descomposición, o también, pueden ser sintetizados por organismos vivos subterráneos u órganos y tejidos de plantas. Es por ello que Peñuelas et al. (2014) indican que el suelo y la masa vegetal representa un gran reservorio y fuente de compuestos orgánicos volátiles biogénicos. En este contexto, se estima que las emisiones de los COVsB son 10 - 12 veces mayores que las emisiones antropogénicas a nivel mundial (Chen et al. 2019; Glasius y Goldstein 2016; Guenther et al. 2012).

Es de relevancia mencionar que los compuestos orgánicos que no forman parte de la formación del smog fotoquímico como el metano ( $\text{CH}_4$ ), el anhídrido carbónico ( $\text{CO}_2$ ) y los compuestos halogenados como el 1,1,1-tricloroetano y los CFC (clorofluorocarburos) no son considerados COVs (Zhongchao 2014).

**Figura 1.** Fuentes de COVs y formación de componentes del Smog fotoquímico (AOS, PAN y  $O_3$ ).



Fuente (Gaona 2017).

En concreto, como se observa en la **figura 1**, las emisiones de los precursores de ozono troposférico generalmente provienen del sector industrial, residencial y del transporte, debido a la utilización de combustibles fósiles (Hui et al. 2018; Reeve 2002). Asimismo, las emisiones producidas a partir de los incendios forestales generan reacciones químicas que dan lugar a la formación de ozono a nivel del suelo (Riera et al. 2017).

#### 4.1.3. Formación fotoquímica del Ozono troposférico

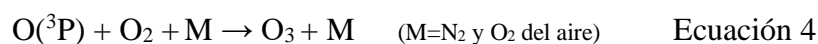
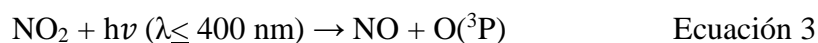
El trabajo de Baird y Cann (2012) menciona que las sustancias difieren unas de otras por la capacidad que poseen estas de absorber la luz en una longitud de onda específica. Debido a esta propiedad, el ozono troposférico se produce fotoquímicamente por la reacción de los rayos UV del sol con los contaminantes primarios: óxidos de nitrógeno ( $NO_x$ ) y compuestos orgánicos volátiles (COVs).

En las siguientes ecuaciones se evidencia la formación de este:



Donde, en presencia de luz solar las dos reacciones tardan unas horas en completarse. En la Ecuación 1, los productos de la reacción son una molécula de oxígeno gaseoso  $\text{O}_2$  y un átomo de oxígeno singlete  $\text{O}({}^1\text{D})$ , mientras que, el producto de la reacción de la Ecuación 2 es una molécula de oxígeno gaseoso  $\text{O}_2$  y un átomo de oxígeno triplete  $\text{O}({}^3\text{P})$ . Las constantes de velocidad para cada reacción dependen de las condiciones climáticas (nubosidad y radiación solar), siendo  $j_1=4,5 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$  y  $j_2=0,5 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ , el valor de sus velocidades de reacción respectivamente.

En contrapartida, la reacción de la Ecuación 3, tiene una constante de velocidad fotoquímica mayor ( $j_3=8,0 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ ), esto significa que al formarse el  $\text{NO}_2$  (dióxido de nitrógeno) en condiciones soleadas, reacciona rápidamente en pocos minutos para producir un átomo de oxígeno triplete  $\text{O}({}^3\text{P})$ .



Debido a la lentitud de las reacciones 1 y 2, y considerando que para el estudio solo  $\text{O}_2$ ,  $\text{O}_3$ ,  $\text{O}({}^3\text{P})$ ,  $\text{NO}_2$ ,  $\text{NO}$  y  $\text{N}_2$  se encuentran en la atmósfera, se utilizan las reacciones de la Ecuación 4 y 5 para explicar el inicio de la formación del ozono. Las tres últimas reacciones conforman un ciclo, en el que constantemente se transforma  $\text{O}_3$  en  $\text{O}_2$  y viceversa. Además, se transforma el  $\text{NO}$  en  $\text{NO}_2$  y viceversa, para formar el ozono troposférico (Gaona 2017; De Visscher 2014).

En contrapartida, existen procesos de eliminación de ozono en la baja troposfera, los cuales pueden ser químicos o físicos. Dentro de los procesos químicos se contempla la eliminación de este por la reacción directa con otras moléculas o radicales, o por fotodisociación (Adame 2009).

A continuación, se detallan dichos procesos:

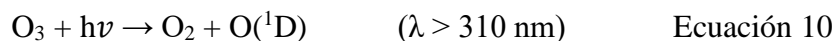
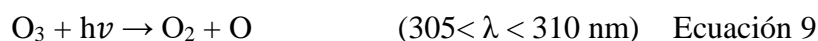


En las Ecuaciones 6 y 7 se observa la reacción de  $\text{O}_3$  con los óxidos de nitrógeno, ocasionando su consumo o destrucción. Este hecho es relevante en atmósferas urbanas durante horarios nocturnos.

Seguidamente, la Ecuación 8 describe el consumo de ozono a partir de la reacción con compuestos orgánicos volátiles (COVs)



Las reacciones que detallan los mecanismos de fotodisociación son las siguientes:



Además, las Ecuaciones 11 y 12, muestran como el ozono formado en las ecuaciones 9 y 10, puede ser consumido por la reacción con los radicales  $\bullet\text{OH}$  y  $\text{HO}_2\bullet$



#### 4.1.4. Clasificación del Ozono troposférico

La mayoría de los centros urbanos sufren episodios de contaminación del aire en donde se producen concentraciones elevadas de ozono a nivel del suelo. Este fenómeno se llama smog fotoquímico y se caracteriza por asemejarse a "una capa de ozono en el lugar equivocado" (Baird y Cann 2012).

El ozono troposférico también es considerado un contaminante climático de vida corta (CCVC), ya que permanece en ella solo semanas. Asimismo, es clasificado como un contaminante criterio por la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos

(EPA-US), ya que en concentraciones ínfimas produce efectos mutagénicos o cancerígenos cuando es acumulado, hecho que solo puede ser observado a largo plazo (O’Ryan y Larraguibel 2000).

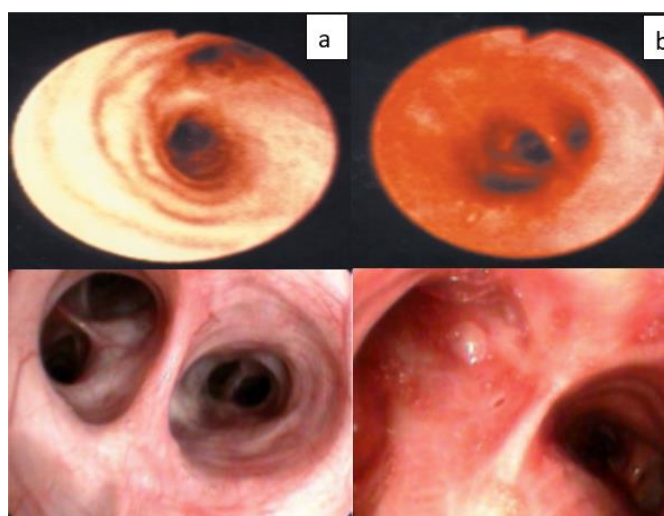
#### 4.1.5. Efectos del Ozono Troposférico sobre la salud humana

El ozono troposférico afecta a la salud de las personas produciendo irritación del sistema respiratorio, disfunción pulmonar y empeora el asma. El riesgo para la salud es mayor en personas cuya ingesta de nutrientes como Vitamina C y E es reducida, así como en los niños y en los adultos mayores (EPA 2000).

Diferentes estudios como los realizados por Vallero (2014), evidencian un aumento del 0,3% en la mortalidad diaria y un acrecentamiento del 0,4 %, en enfermedades cardiovasculares ocasionadas por la exposición a concentraciones de ozono superficial.

En la **figura 2**, en la sección **a**, se aprecia una vía respiratoria sana y en la sección **b**, se observa una vía respiratoria inflamada, luego de haber sido expuesta al ozono troposférico, ya que el mismo, daña los músculos de las vías respiratorias, haciendo que estos se contraigan atrapando el aire en los alvéolos, produciendo sibilancias y dificultad respiratoria (EPA 2021a).

**Figura 2.** Comparación de vías respiratorias.



Fuente: (EPA, 2009).

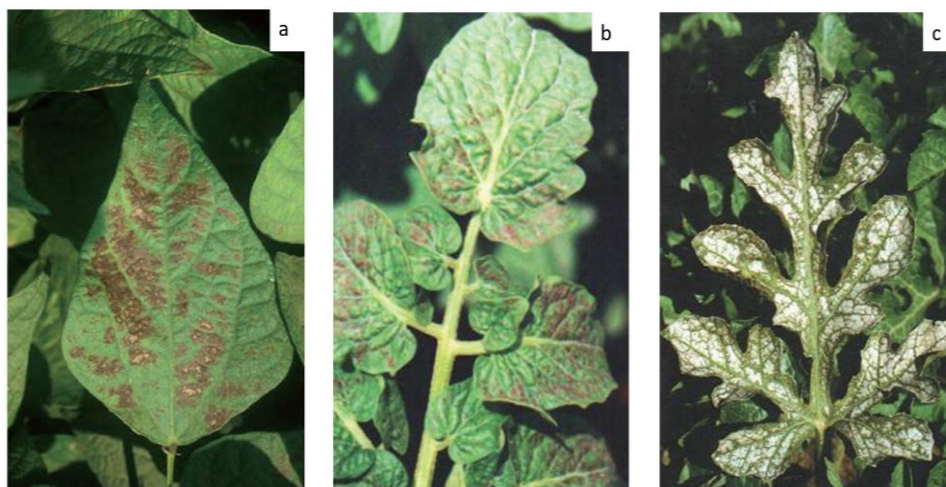
#### 4.1.6. Efectos sobre la vegetación

Las exposiciones a elevadas concentraciones de ozono troposférico, afectan a la vegetación y a los ecosistemas sensibles (bosques, parques, refugios y áreas de vida silvestres) (EPA 2021b; Metcalfe y Derwent 2005; Vallero 2014). Estudios realizados por el Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas de España (CIEMAT), señalan que los efectos provocados por el ozono troposférico sobre la vegetación dependen de la cantidad de contaminante que logra alcanzar el interior de la planta e interferir en las reacciones bioquímicas y metabólicas que producen el desarrollo y crecimiento vegetal.

La principal vía de acceso de ozono a las plantas es a través de los estomas (pequeños poros en la superficie de las hojas), ya que el mismo es un gas que penetra en los tejidos vegetales mediante mecanismos de difusión pasiva (Bermejo et al. 2009; Rave et al. 2008).

Seguidamente, la **figura 3** muestra como la vegetación puede ser afectada por la exposición a ozono troposférico. Las imágenes **a** y **b**, muestran puntos rojos en hojas de judía y tomate, respectivamente. Mientras que, la imagen **c** revela una necrosis avanzada sobre hojas de sandía

**Figura 3.** Alteraciones sobre la vegetación, provocadas por la exposición al ozono superficial.



Fuente: (Bermejo et al. 2009).

Experimentos realizados en cultivos de China (Feng et al. 2015), han demostrado que concentraciones igual a  $78 \mu\text{g m}^{-3}$  de ozono troposférico producen una disminución significativa en el rendimiento de los principales cultivos alimenticios (trigo, soja, papa y arroz) en aproximadamente un 10% en comparación con el aire libre de ozono, es por ello que, en dicho país, consideran al ozono superficial como el contaminante atmosférico más fitotóxico debido al daño causado a la vegetación.

Asimismo, estudios llevados a cabo por destacados expertos de toda Europa, declaran que el ozono troposférico es un problema mundial de contaminación del aire, ya que, en áreas altamente industrializadas y desarrolladas, es uno de los contaminantes atmosféricos más generalizados, con impactos a la salud humana, la producción de cultivos y el medio ambiente. En sus informes concluyen que los controles de emisiones existentes no son suficientes para reducir las concentraciones de ozono a niveles aceptables para la salud humana y la protección del medio ambiente. Es por ello que, solicitan una acción mundial renovada para abordar la reducción del ozono y sus precursores (Fowler et al. 2008).

#### **4.2. Antecedentes y marco normativo**

El constante crecimiento económico y poblacional de Paraguay conlleva a un aumento migratorio de la población rural hacia las zonas urbanas y consecuentemente, a un incremento en el parque automotor. Según datos del Plan Nacional de Mitigación al Cambio Climático (PNCC), entre el año 2012 y 2015 habrían ingresado al país aproximadamente 236.706 vehículos de segunda mano, equivalentes a un promedio de 39.567 vehículos comercializados cada año sin un debido control de emisiones.

A pesar de que Paraguay posee la menor flota vehicular de Latinoamérica, ya que, la cantidad de vehículos por cada 10 habitantes no supera las 3 unidades, se debe tener en cuenta que aproximadamente el 66% del parque automotor, equivalente a unos 158.268 vehículos, sobrepasan los 10 años desde su fecha de fabricación (Secretaría del Medio Ambiente-MADES, 2017).

En el año 2000, la Ley 1590/2000 que regula el Sistema Nacional de Transporte crea la Dirección Nacional de Transporte (DINATRAN) y la Secretaría Metropolitana de Transporte (SMT), donde DINATRAN tiene como atribución la protección de los derechos del usuario del transporte y del medio ambiente. No obstante, la DINATRAN no reglamentó los niveles permisibles de emisión de contaminantes para el parque automotor.

Más adelante, a través de la Ley 3850/2009 se crea el Sistema Nacional de Inspección Técnica Vehicular y se establece la obligatoriedad de la inspección técnica de los rodados como exigencia para la obtención o renovación de la patente municipal de los vehículos en todo el Paraguay.

En este contexto, en el Plan Nacional de acción para combustibles y vehículos más limpios en Paraguay (Centro Mario Molina Chile 2011), se menciona que no existe normativa alguna para los vehículos que ingresan al mercado nacional, dado que no existen reglamentaciones sobre emisiones que deban ser acatadas por los importadores de vehículos.

Posteriormente, en el año 2010 se realizan por primera vez en la ciudad de Asunción, actividades de monitoreos de contaminación atmosférica a cargo del Centro Mario Molina de Chile. El diagnóstico del estado de la calidad del aire de la ciudad evidenció la necesidad de establecer legislaciones para la gestión ambiental del aire. Luego en 2014, un segundo monitoreo en la ciudad capitalina concluye que el transporte público es la mayor fuente de contaminación urbana, ya que en los horarios de mayor flujo vehicular se observan incrementos en los parámetros de contaminación (Centro Mario Molina Chile, 2014).

Dichos estudios han permitido promover la Ley N° 5211/14 de “Calidad del Aire”, cuyo objetivo radica en la protección de la calidad del aire y de la atmósfera, mediante la prevención y control de la emisión de contaminantes químicos y físicos al aire, y reducir el deterioro del ambiente y la salud de los seres vivos, a fin de mejorar su calidad de vida y garantizar la sustentabilidad del desarrollo. La misma, en su Artículo 12 cita a las sustancias a ser controladas entre las cuales se encuentran: monóxido de



carbono, óxidos de azufre, óxidos de nitrógeno, contaminantes climáticos de vida corta, material particulado, entre otros, pero no se menciona al ozono troposférico.

Más adelante, en la resolución N° 222/15 se amplía el listado de sustancias contaminantes controladas, prohibidas y sus sustitutos y se incluye al ozono troposférico. Posteriormente, en la resolución N° 259/15 se establecen los Parámetros permisibles de calidad del aire. La misma, considera para el ozono troposférico la concentración límite máxima de  $120 \mu\text{g m}^{-3}$  para un periodo promedio de ocho horas.

En el año 2018, la SEAM (Secretaría del Medio Ambiente, actualmente Ministerio del Ambiente y Desarrollo Sostenible - MADES) mediante la resolución N° 78/2018 fija los valores límites de emisión de los contaminantes del aire provenientes de fuentes móviles, estableciendo que en los vehículos de ciclo Otto (a nafta, alcohol, GLP o flex) se controlarán las emisiones de monóxido de Carbono (CO) e hidrocarburos (HC) y en los vehículos diésel serán controlados la emisión de partículas (PM) mediante el índice de opacidad.

Finalmente, el Decreto N°1269/19 que reglamenta la Ley N°5211/14 de Calidad de Aire, define al sistema de monitoreo de calidad del aire como un conjunto organizado de recursos humanos, técnicos y administrativos empleados para observar el comportamiento de la calidad del aire a través del tiempo en un área determinada.

Según el Centro Mario Molina Chile (2011), el monitoreo de la calidad del aire en las zonas urbanas actúa como una herramienta de gestión ambiental muy utilizada en los países desarrollados. En la **tabla 1**, se aprecia la normativa aplicada en algunos países de Latinoamérica, los Estados Unidos, la Unión Europea y la OMS con respecto a las emisiones de ozono troposférico en Paraguay.

**Tabla 1.** Normativas permisibles de ozono troposférico en la región latinoamericana y parámetros máximos sugeridos por la OMS, la EPA-US y la Unión Europea.

	<b>Brasil</b>	<b>Chile</b>	<b>México</b>	<b>Paraguay</b>	<b>OMS</b>	<b>EPA-US</b>	<b>UE</b>
<b>Norma</b>	Resolución 3/1990 CONAMA	DS 112/2002	NOM-020-SSA1-2014	Res. 259/15		Estándar ( $\mu\text{g m}^{-3}$ )	
<b>Nivel máximo permisible (<math>\mu\text{g m}^{-3}</math>)</b>	160 (1 h)	120 (8 h)	0,09 ppm~ 176 (1 h) 0,05 ppm~ 100 (8 h)	120 (8h)	<b>Año:2000</b> 120 (8 h) <b>Año:2006</b> 100 (8 h) <b>Año:2021</b> 100 (8 h)	0,12 ppm~ 235 (1 h) 0,08 ppm~ 157 (8 h)	120 (8 h)

Fuente: Elaboración propia.

De la **tabla 1** se puede decir que Paraguay, Chile y la Unión Europea (UE) adoptan la concentración permisible sugerida por la OMS del año 2000, mientras que EE. UU. y Brasil adoptan valores más flexibles próximos entre sí. En contrapartida, México, adopta el valor sugerido por la OMS en el año 2006.

Además, se observa que a partir del año 2006 las Guías de Calidad del Aire de la Organización Mundial de la Salud (OMS) ha sugerido para la concentración del ozono troposférico un valor permisible de  $100 \mu\text{g m}^{-3}$ , para un periodo octohorario (OMS 2006). En este sentido, nuevamente en el 2021 se sostiene en dicho valor, con el fin de reducir riesgos a la salud (OMS 2021).

#### **4.2.1. Últimos estudios realizados en Paraguay respecto al ozono troposférico y otros contaminantes**

El primer y único trabajo académico que estudió al ozono troposférico en el país, lo representa Gómez (2011), a través un análisis estadístico que estima la concentración para un periodo de 10 años en el Campus Universitario de la Universidad Nacional de Asunción (UNA). Mediante el uso de la herramienta estadística R-2.9.0. y la aplicación de técnicas de predicción concluyó que la concentración de ozono podría sobrepasar los estándares establecidos en el año 1986 por la OMS como tolerables para la salud humana.

Posteriormente, en el año 2019 se ha realizado en la ciudad de Asunción, un monitoreo continuo de material particulado fino (MP 2.5) y grueso (MP 10), a través, de la implementación de la primera red de monitoreo de once estaciones mediante el proyecto PINV15-658 de CONACYT ejecutado por la Facultad de Ingeniería de la UNA. El cual concluye que: los picos en las concentraciones de partículas se registran generalmente durante días de emisiones atmosféricas generadas por actividades agrícolas como quemazones de pastizales en los alrededores de la ciudad (CONACYT 2020).

Adicionalmente, en marzo de 2021, el MADES, instaló la primera estación de monitoreo de calidad del aire de referencia del Paraguay, la cual posee la capacidad de monitorear en tiempo real y de forma continua, los parámetros expuestos en la Resolución 259/15, entre los cuales se encuentran el ozono troposférico ( $O_3$ ). La estación cuenta con equipos de alta precisión que cumplen con los estándares internacionales de la EPA y la Unión Europea (MADES 2021c).

Finalmente, entre octubre de 2020 y abril de 2021, la Comisión Nacional de Defensa de los Recursos Naturales (CONADERNA) en convenio con la Facultad de Ciencias Exactas y Naturales (FACEN), realizaron jornadas de medición de la calidad de aire en las ciudades de Concepción y San Lorenzo, respectivamente. Los monitoreos estuvieron a cargo del Laboratorio de Investigación de Atmósfera y Problemas Ambientales (LIAPA), el cual midió: partículas, ruido ambiental, monóxido de carbono, dióxido de nitrógeno, ozono troposférico y dióxido de azufre. El objetivo de la medición fue determinar los niveles de gases y material particulado existentes en la zona de influencia del Campus universitario para su posterior comparación con los resultados del monitoreo realizado en la localidad de San Carlos del Apa, Concepción-Paraguay (CONADERNA 2021).

## **5. MATERIALES Y MÉTODOS**

### **5.1. Diseño de la investigación**

El tipo de estudio realizado corresponde a una metodología descriptiva longitudinal con componentes cuantitativos. A través, de una estación portátil automática se midió la concentración de ozono troposférico en un área específica de alto flujo vehicular del Gran Asunción, durante 3 (tres) meses continuos, comprendidos entre las fechas: 18 (dieciocho) de marzo al 18 (dieciocho) de junio del año 2021, abarcando la estación otoñal de la región.

La campaña de medición continua ha permitido obtener registros con una elevada frecuencia de muestreo (cada cinco minutos), los cuales han permitido determinar la concentración del ozono troposférico formado por las reacciones fotoquímicas de contaminantes primarios emitidos en periodos de tiempo promedio a nivel horario, diario, mensual y estacional.

### **5.2. Descripción de la zona de muestreo**

Paraguay está ubicado en América del sur, entre los paralelos de 19,28° y 27,55° de latitud sur y entre los meridianos de 54,33° y 62,63° de longitud oeste, posee un clima subtropical, con zonas secas al occidente y zonas húmedas al oriente, alcanza una temperatura anual media de 23 °C y la precipitación total anual media es de 1500 mm. Geográficamente está bloqueado por las cordilleras de los Andes ante el avance de los vientos del océano Pacífico. En contrapartida, el océano Atlántico ejerce influencia en el clima del Paraguay, ya que el Anticiclón subtropical del Atlántico sur (ASAS) dotado de humedad en capas bajas transporta masa de aire desde latitudes tropicales hasta el centro de Sudamérica, dicha corriente de aire con viento Noreste es la causal del transporte de calor y humedad sobre el país (Grassi 2020).

Es de resaltar que la mayor concentración de la población urbana en Paraguay se encuentra en la ciudad capitalina Asunción y en su Área Metropolitana (AMA) o Gran Asunción, conformada por las ciudades periféricas (Luque, Fernando de la Mora, San Lorenzo, Lambaré, Mariano Roque Alonso, Ñemby, Capiatá, Limpio, Villa Elisa y San Antonio). Galeano Monti (2017), indica que Asunción posee una población aproximada de 5,3 millones de habitantes, mientras que en el AMA según datos del Instituto Nacional de Estadística (INE, 2021), viven aproximadamente 1,5 millones de personas. Considerando las cifras anteriores, en el AMA se concentra el 41% del total de la población paraguaya (Canese et al. 2019).

DeWitt et al., (2020), señalan que la mala calidad del aire exterior es un factor que perjudica mayormente a los países en desarrollo, ya que estos normalmente no cuentan con la infraestructura y los fondos necesarios para la instalación de redes de monitoreo de calidad del aire. Por lo tanto, los inconvenientes vinculados con la adecuada medición de las concentraciones de parámetros de calidad del aire necesariamente repercuten en un escaso control y caracterización de la problemática relacionada. En consecuencia, la deficiente calidad del aire urbano generado principalmente por el tráfico vehicular podría generar efectos adversos en la salud de los pobladores del Gran Asunción, por ser esta la zona más poblada del país.

De lo expuesto anteriormente, en la **figura 4**, se observa el sitio seleccionado como punto de muestreo representativo del tráfico vehicular del Gran Asunción, localizado en las coordenadas 25°19'18.9"S, 57°33'44.6"W (punto azul). Cabe destacar que el área de influencia directa abarca la Ciudad Capitalina, Asunción y la ciudad Fernando de la Mora.

**Figura 4.** Imagen satelital del punto de muestreo seleccionado en color azul.



Fuente: Google Earth, 2021.

El área de muestreo reconocida por su elevado tráfico vehicular presenta las siguientes características:

- En margen noroeste, al cruzar la Avda. Eusebio Ayala se encuentra la ciudad de Asunción, específicamente el Barrio Villa Aurelia, zona residencial y comercial.
- En el margen noreste, al cruzar la Avda. Eusebio Ayala se encuentra la ciudad Fernando de la Mora - Zona Norte, caracterizada por su influencia comercial y residencial. En este margen se encuentra el Viaducto denominado Calle última.
- En el margen sureste se encuentra la ciudad Fernando de la Mora- Zona sur, en la que se aprecian paradas de buses, semáforos, viviendas, comercios varios

(panaderías, venta de alimentos, venta de vehículos, entre otros), una estación expendedora de combustible y un sanatorio.

- En el margen suroeste al cruzar la Avda. Defensores del Chaco se encuentra la ciudad de Fernando de la Mora - Zona Sur, donde se aprecian: paradas de buses, semáforos, viviendas, comercios varios (farmacias, panaderías, minimercados, venta de repuestos para vehículos, venta de aceites y lubricantes, entre otros), edificios corporativos y más. A unos 200 m aproximadamente, se encuentra el mercado de Abasto administrado por la comuna Asuncena.

A continuación, la **figura 5** muestra el montaje del equipo AEROQUAL® Monitor Serie 500, el cual fue instalado en un balcón situado en el segundo piso de una casa particular, a unos 4 m aproximadamente del nivel de la Avda. Defensores del Chaco, simulando una nariz humana. Cabe mencionar que la metodología de monitoreo automático que utiliza este trabajo ha seleccionado un (1) punto de muestreo para las mediciones de Ozono, Temperatura y Humedad relativa del aire, los cuales se han realizado en simultáneo y constituyen un sitio representativo a la fuente de emisión a evaluar (tráfico vehicular). En concreto, en la elección del punto de muestreo para la medición del ozono troposférico se han tenido en cuenta los siguientes criterios:

- Dirección y velocidad predominante del viento en el área de estudio, en base a datos procedentes de estaciones meteorológicas cercanas durante el periodo de muestreo.
- Proximidad a zonas pobladas y con un elevado flujo vehicular.
- Evitar interferencias en la medición procedentes de chimeneas, pollerías, quema de pastizales o equipos de refrigeración cercanos.
- Adicionalmente, se han tenido en cuenta factores vinculados con la seguridad del equipo de muestreo, y el permiso de acceso al lugar del muestreo (casa particular).



**Figura 5.** Montaje del equipo AEROQUAL® Monitor Serie 500 con sensor de ozono, medición de temperatura y humedad relativa del aire.

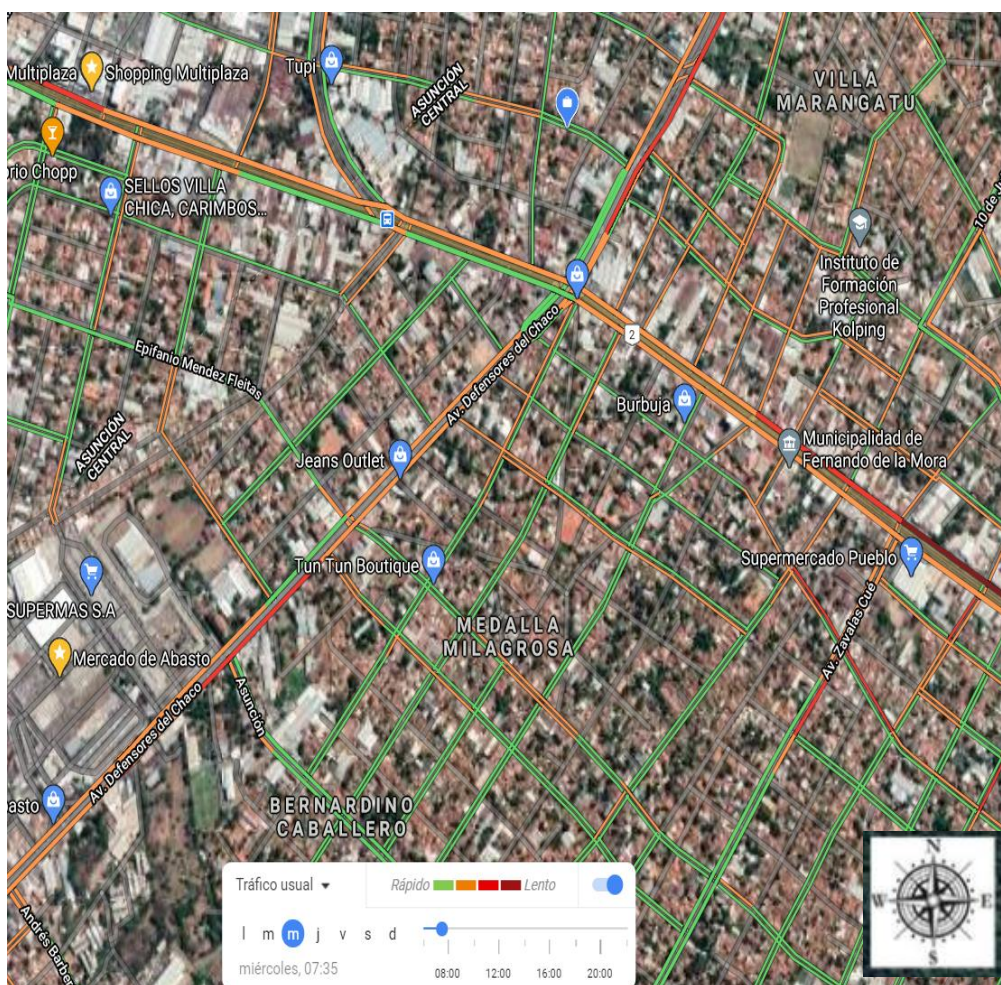


Fuente: imagen propia, (marzo, 2021).



Seguidamente, en la **figura 6** se puede apreciar a través de la estimación realizada por Google Maps, el significativo tráfico vehicular circulante en las Avenidas Defensores del Chaco y Eusebio Ayala para un miércoles en hora pico (7:35 h). Se diferencia por colores la velocidad del tráfico, donde el tráfico rápido de elevada fluidez es identificado por el color verde mientras que el tráfico lento o poco fluido es identificado por el color granate.

**Figura 6.** Clasificación del flujo del tráfico vehicular circulante en las Avenidas: Defensores del Chaco y Eusebio Ayala.



Fuente: Google maps, 2021.

### 5.3. Características técnicas del equipo portátil

Para la campaña de medición del contaminante ozono troposférico se ha utilizado un instrumento portátil de última generación de origen neozelandés de la marca AEROQUAL® Monitor Serie 500 ilustrado en la **figura 7**, el cual está provisto de un sensor de Ozono que detecta el gas con una elevada capacidad de registro de datos en tiempo real.

Además, el equipo posee un segundo sensor que registra la Temperatura ambiente (°C) y la humedad relativa del aire (%), el cual está diseñado para medir dichos parámetros de manera simultánea a las mediciones de ozono<sup>1</sup>.

El equipo realiza el muestreo en unidades de concentración del contaminante por volumen de aire en  $\text{mg m}^{-3}$ ,  $\mu\text{g m}^{-3}$  o ppm. Este método integrado permite descartar otros tipos de sensores cuyos resultados no son fiables debido a que estiman la concentración a partir de métodos indirectos. Cabe mencionar que el equipo es reconocido por la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (US-EPA) y tanto la calidad como la trazabilidad de los datos, cumplen con los estándares internacionales para instrumentos de calidad del aire basados en sensores (Aeroqual, 2019)<sup>2</sup>.

---

<sup>1</sup> El equipamiento empleado en el presente trabajo de investigación ha sido facilitado mediante el apoyo de la empresa: Consultora de Monitoreo Ambiental (CMA S.A.) de Asunción, Paraguay.

<sup>2</sup> Otras instituciones de referencia en el mundo que utilizan sensores AEROQUAL son: NASA, Shell, Samsung, Coca cola, Chevron, Tesla, Universidad de Johns Hopkins, Universidad de Birmingham y Universidad de Toronto. Extraído de: (<https://www.aeroqual.com/>), consultado el 15 de noviembre de 2021.

**Figura 7.** Características principales del equipamiento de medición de calidad del aire utilizado para la campaña de medición.



Fuente: (Aeroqual, 2019).

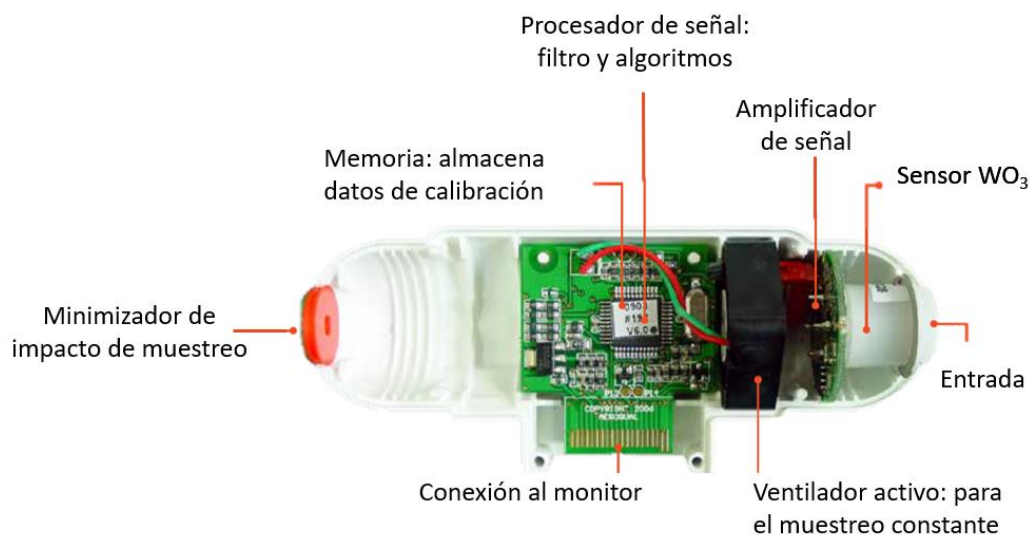
Seguidamente, la **figura 8** indica las partes principales del sensor de ozono utilizado en la campaña de medición, este efectúa el muestreo mediante una captación activa de las muestras de aire garantizando representatividad e incrementando la precisión de la medición, semejando a una nariz electrónica.

El sensor posee una tecnología de semiconductor sensible al gas (Gas Sensitive Semiconductor, GSS), el cual utiliza material de detección patentado, con corrección automática de línea de base y rechazo de interferencias integrados con una respuesta altamente lineal. Además, cuenta con certificado de calibración de fábrica actualizado correspondiente al 30 de junio de 2020 (inferior a 2 años), incluido en el **Anexo 1**<sup>3</sup>.

---

<sup>3</sup> Según las especificaciones técnicas del manual de operación de los sensores AEROQUAL, los mismos deben calibrarse una vez cada 8000 horas de uso continuo. Por tanto, en función de la frecuencia de uso para aplicaciones típicas de monitores portátiles, es necesario realizar el mantenimiento y la calibración de fábrica de los sensores una vez por lo menos cada 2 años. Extraído de: (<https://www.aeroqual.com/>), consultado el 15 de noviembre de 2021. La calibración se realiza en laboratorios certificados por el fabricante, donde el único país de la región que cuenta con dicha certificación es Uruguay.

**Figura 8.** Partes principales del sensor de medición de ozono troposférico utilizado durante la campaña de medición.



Fuente: (Aeroqual, 2019).

Además, la tecnología empleada en el sensor de ozono utiliza un óxido semiconductor, en este caso, el óxido de tungsteno ( $WO_3$ ) que actúa como una resistencia sensible al gas ozono troposférico para su detección (Aeroqual 2016).

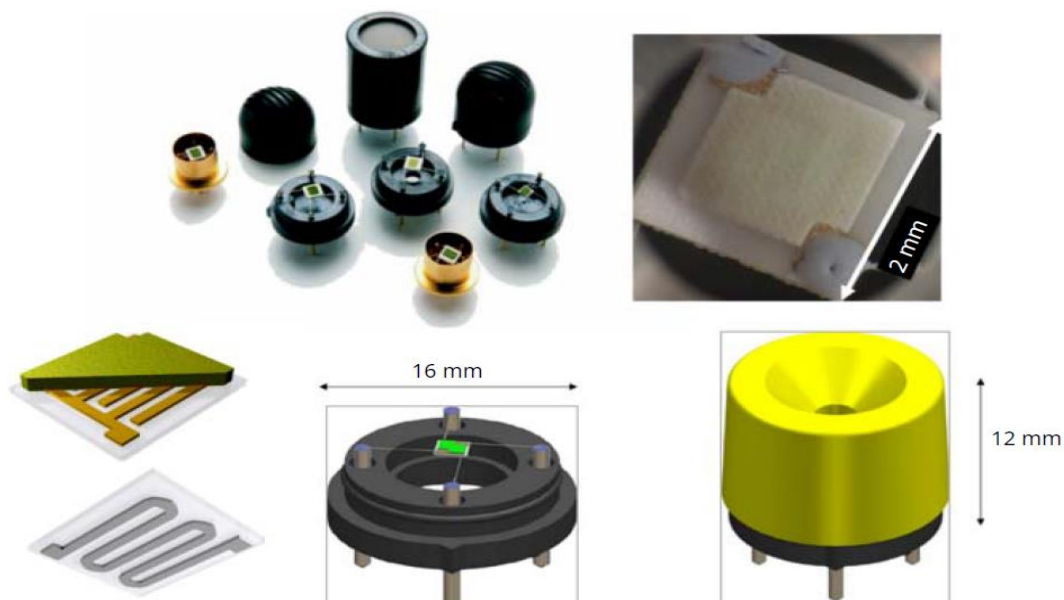
En este contexto, estudios realizados por Williams (1999 y 2019b) establecieron que los sensores basados en óxidos semiconductores como resistencias sensibles al gas, son aplicables para la medición ambiental y recomiendan este tipo de dispositivos, ya que sus características han sido bien estudiadas y comprendidas.

A modo comparativo, la **figura 9** muestra diferentes ejemplos de sensores con resistencias sensibles al gas, los cuales son compactos, altamente confiables y de bajo costo para monitorear la calidad del aire urbano (Williams 2019a).

Lazcano y Sánchez (2009), mencionan que en los sensores ópticos que utilizan  $WO_3$ , el mecanismo de detección se basa en la interacción superficial entre las moléculas del gas y el material sensible, denominada adsorción.



**Figura 9.** Ejemplos de sensores con resistencias sensibles al gas a base de óxidos semiconductores



Fuente: (Williams 2019a)

#### 5.4. Procedimiento de medición

La técnica de muestreo utilizada para la campaña de medición aplica analizadores automáticos activos y según la Organización Mundial de la Salud, es una técnica válida para la valoración de la calidad del aire en ambientes exteriores (OMS 2006). Por lo tanto, los datos de las concentraciones de ozono troposférico medidas por el equipo portátil han sido producto de mediciones automáticas con intervalos continuos de 5 (cinco) minutos, los cuales fueron almacenados en la memoria interna del equipo.

Simultáneamente, a la medición de la concentración de ozono troposférico, se realizó la medición de las variables meteorológicas: temperatura y humedad relativa del aire, las cuales complementaron el posterior análisis de los resultados obtenidos en la campaña de muestreo. Además, cabe resaltar que los datos de las variables de dirección, velocidad del viento 5-minutal y precipitación, fueron proveídos por la estación automática, ubicada en la Secretaría Nacional del Deporte, la cual forma parte de la Red de Estaciones Meteorológicas Automáticas del Departamento de Servicios

Meteorológicos e Hidrológicos de la Dirección Nacional de Aeronáutica Civil (DINAC).

Adicionalmente, datos sobre las concentraciones de: ozono troposférico ( $O_3$ ) y dióxido de nitrógeno ( $NO_2$ ), como los de la radiación solar, fueron proveídos por la Estación de Monitoreo de Calidad de Aire del MADES.

Una vez recopilados los registros tanto del equipo portátil como los de la red de Meteorología e Hidrología de la DINAC y de la Estación de Calidad de Aire del MADES, se procedió al tratamiento analítico de los mismos.

### **5.5. Tratamiento y análisis de los datos**

El tratamiento de los datos medidos fue realizado mediante el uso del software R-Project, el cual es un lenguaje informático muy utilizado en la academia para el tratamiento de datos. En concreto, se aplicó el paquete estadístico R-OpenAir, desarrollado especialmente para el análisis de datos de calidad del aire por el Environmental Research Group of King's College de Londres y la University of Leeds.

Asimismo, el OpenAir presenta la capacidad de realizar gráficas complejas multivariadas de grandes series de datos y un complejo cálculo de parámetros estadísticos y matemáticos (Follos Pliego, 2012). El paquete OpenAir es mantenido por el Consejo de Investigación del Medio Ambiente de Inglaterra (NERC), el cual proporciona el entorno de desarrollo gráfico y matemático.

De manera complementaria, para el análisis estadístico de los datos recabados de la Estación de monitoreo de calidad del Aire dependiente del MADES y la estación automática dependiente de la DINAC, específicamente para los parámetros: radiación solar ( $W m^{-2}$ ) y precipitación (mm), en función a la formación del ozono troposférico se utilizó el software Minitab®19, para el periodo que abarcó la campaña de medición.

## 6. RESULTADOS Y DISCUSIONES.

Conforme a la metodología aplicada, la campaña de medición abarcó el periodo trimestral comprendido entre el 18 de marzo al 18 de junio de 2021, totalizando 93 (noventa y tres) días de medición. Durante dicho intervalo, se recopilaron aproximadamente 288 valores diarios, para cada uno de parámetros medidos por el equipo (concentración de ozono, humedad relativa del aire y temperatura ambiente), acumulando aproximadamente 864 datos cada 24 h. Es decir, en total se obtuvieron 26.665 datos para cada uno de los parámetros ya mencionados.

En la **tabla 2** se presentan los datos estadísticos obtenidos (valores promedio, moda, valores mínimos, valores máximos y la desviación estándar) a partir de la medición realizada, de cada parámetro estudiado (ozono troposférico, humedad relativa del aire, temperatura ambiente), así como los valores de dirección y velocidad del viento, facilitados por la DINAC. En este contexto, en la misma recopilación de datos, se presenta el valor límite permisible por la Resolución MADES 259/15 para la concentración del ozono troposférico (O<sub>3</sub>).

**Tabla 2.** Estadísticos de los parámetros de interés, obtenidos y proveídos durante la campaña de medición.

Parámetro	Promedio	Moda	Valor mínimo	Valor máximo	Desviación estándar	Valor límite permisible
O <sub>3</sub> (μg m <sup>-3</sup> )	2,29	< valor límite de detección <sup>4</sup>	< valor límite de detección <sup>4</sup>	58	3,73	120
Humedad relativa (%)	65,15	74	14,5 <sup>5</sup>	99,5	17,35	NA
Temperatura (°C)	24,09	21	7,8	49,1 <sup>6</sup>	6,55	NA
Dirección del viento (°)	76,81	N	0 <sup>7</sup>	338	85,14	NA
Velocidad del viento (m s <sup>-1</sup> )	2,13	0 <sup>8</sup>	0 <sup>8</sup>	11,27	1,23	NA

\*NA: no aplica. **Fuente:** Elaboración propia

Considerando que el parámetro de mayor interés en este estudio es la concentración de ozono troposférico, se observa en la **tabla 2** que, durante la campaña de medición realizada, el valor promedio obtenido fue de 2,29 μg m<sup>-3</sup>. Teniendo en cuenta que el valor máximo permitido por la normativa nacional es igual a 120 μg m<sup>-3</sup> para la concentración de dicho gas, se debe destacar que los valores obtenidos no sobrepasaron dicho valor, ya que el valor máximo medido fue igual a 58 μg m<sup>-3</sup>,

<sup>4</sup> El valor límite mínimo de detección del sensor es igual a 0,001 ppm=1,96 μg m<sup>-3</sup>. Ver Anexo 9.2. Extraído de: <https://www.aeroqual.com/product/ozone-sensor-ozu>, consultado el 15 de noviembre de 2021.

<sup>5</sup> El intervalo de detección de humedad relativa por el sensor es (10 - 90 %). Ver Anexo 9.2. Extraído de: <https://www.aeroqual.com/product/ozone-sensor-ozu>, consultado el 15 de noviembre de 2021.

<sup>6</sup> El intervalo de detección de temperatura por el sensor es (0 - 40 °C). Ver Anexo 9.2. Extraído de: <https://www.aeroqual.com/product/ozone-sensor-ozu>, consultado el 15 de noviembre de 2021.

<sup>7</sup> El valor de 0 (°) en la dirección del viento indica que el mismo proviene de la coordenada Norte, según lo especificado por los profesionales la estación automática, ubicada en la Secretaría Nacional del Deporte, la cual forma parte de la Red de Estaciones Meteorológicas Automáticas del Departamento de Servicios Meteorológicos e Hidrológicos de la Dirección Nacional de Aeronáutica Civil (DINAC), de la cual se recabaron estos datos.

<sup>8</sup> El valor de 0 (m s<sup>-1</sup>) para la velocidad del viento indica que dicho parámetro se encontraba en calma, según lo especificado por los profesionales la estación automática, ubicada en la Secretaría Nacional del Deporte, la cual forma parte de la Red de Estaciones Meteorológicas Automáticas del Departamento de Servicios Meteorológicos e Hidrológicos de la Dirección Nacional de Aeronáutica Civil (DINAC), de la cual se recabaron estos datos.



mientras que el valor mínimo resultó ser igual a la moda, el cual se encontró por debajo del límite de detección del equipo.

En este sentido, para analizar los datos recabados del gas de interés durante el periodo de medición, se utilizó el estadístico desviación estándar poblacional, el cual arrojó un valor de 3,73. Dicho estadístico, permite cuantificar la variación o la dispersión del conjunto de datos con respecto al promedio. Esto es, si la desviación es baja, los valores tienden a estar agrupados cerca del promedio. Mientras que, si la desviación es alta indica que los datos se extienden sobre un rango de valores más amplio.

Por otro lado, considerando los demás parámetros medidos por el sensor, se realizó el análisis estadístico de los mismos. Es decir, para la humedad relativa del aire, se obtuvo un valor promedio de 65,15%, una moda de 74% y un valor máximo de 99,5%. Del mismo modo, analizando la temperatura del ambiente, se obtuvo un valor promedio de 24,09 °C, un valor mínimo de 7,8 °C, un valor máximo de 49,1 °C y una moda de 21 °C.

Es importante resaltar que se registraron por el equipo tres días de temperaturas superiores a 45 °C durante los 93 días de medición. Las fechas que registraron los valores atípicos fueron el 24 de marzo, el 10 y 19 de abril. Para el 24 de marzo, el equipo midió un valor máximo de temperatura igual a 49,1°C, a las 17:14 h, mientras que la mayor temperatura registrada por la DINAC para ese mismo día en la estación de referencia fue de 34,56 °C, a las 16:00 h. Asimismo, en fecha 10 de abril, el valor máximo medido por el equipo fue de 46,3 °C, registrado a las 17:06 h, y el valor máximo registrado por la estación de referencia a las 16:00 h, fue de 34,78 °C. En este contexto, en fecha 19 de abril, el sensor del equipo midió el mayor valor de temperatura igual a 46,5 °C, a las 15:25 h, mientras que, la estación de referencia midió el mayor pico de temperatura igual a 31,11 °C, a las 14:30 h.

Se considera que los tres valores atípicos, podría deberse a la exposición directa del equipo al sol, ocasionando el sobrecalentamiento de este, ya que el mismo se encontraba sin ningún resguardo a la intemperie. Hecho que no se observa en las estaciones meteorológicas ya que estas, se encuentran resguardadas.

Seguidamente, para realizar un análisis más objetivo y detallado se tuvieron en cuenta los parámetros dirección y velocidad del viento proveídos por la DINAC, los cuales, fueron tratados estadísticamente. A continuación, se detallan los valores obtenidos en dicho tratamiento.

Para el parámetro dirección del viento, se tuvo un promedio igual a  $76,81^\circ$  perteneciente a la coordenada Este. Además, un valor máximo de  $338^\circ$  correspondiente a la coordenada Norte y una moda igual al valor mínimo de  $0^\circ$  relacionado también, a la coordenada Norte.

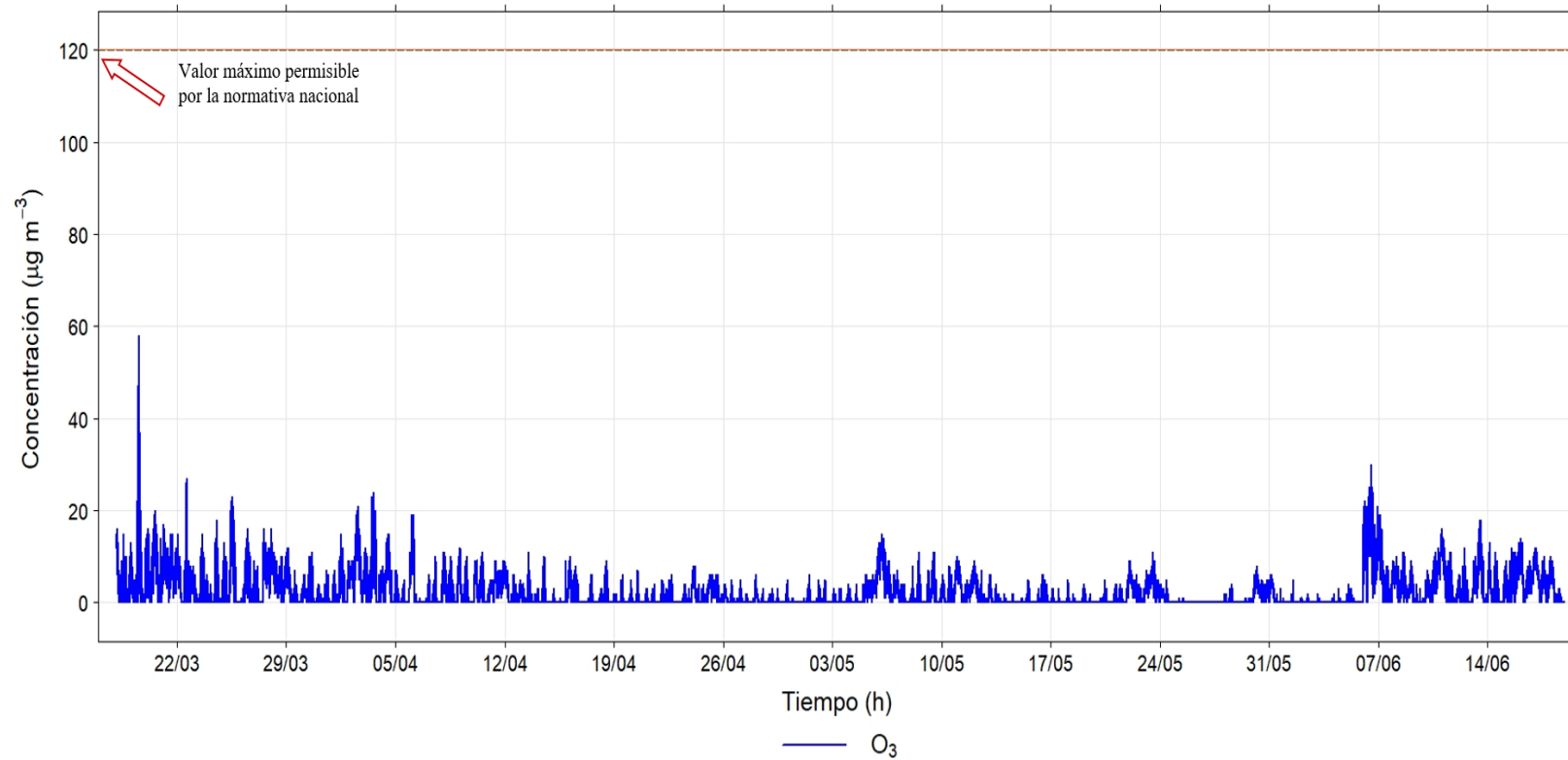
Del mismo modo, considerando la velocidad del viento, se obtuvo un promedio de  $2,13 \text{ m s}^{-1}$ , un valor máximo de  $11,27 \text{ m s}^{-1}$  y un valor mínimo de  $0 \text{ m s}^{-1}$ , igual a la moda, recordando que este último valor corresponde a los vientos en calma.

Adicionalmente, de manera complementaria, se presentan los resultados de las mediciones, a través de gráficos.

En este contexto, la **figura 10** presenta la evolución de la concentración del ozono troposférico ( $\mu\text{g m}^{-3}$ ) medido durante el periodo de muestreo en función al tiempo transcurrido, para un periodo de medición que abarcó 14 semanas. En dicha representación gráfica, se observa que el valor máximo fue obtenido en la primera semana de la campaña de medición, sin superar este al valor máximo permisible por la normativa nacional como ya se ha mencionado anteriormente.

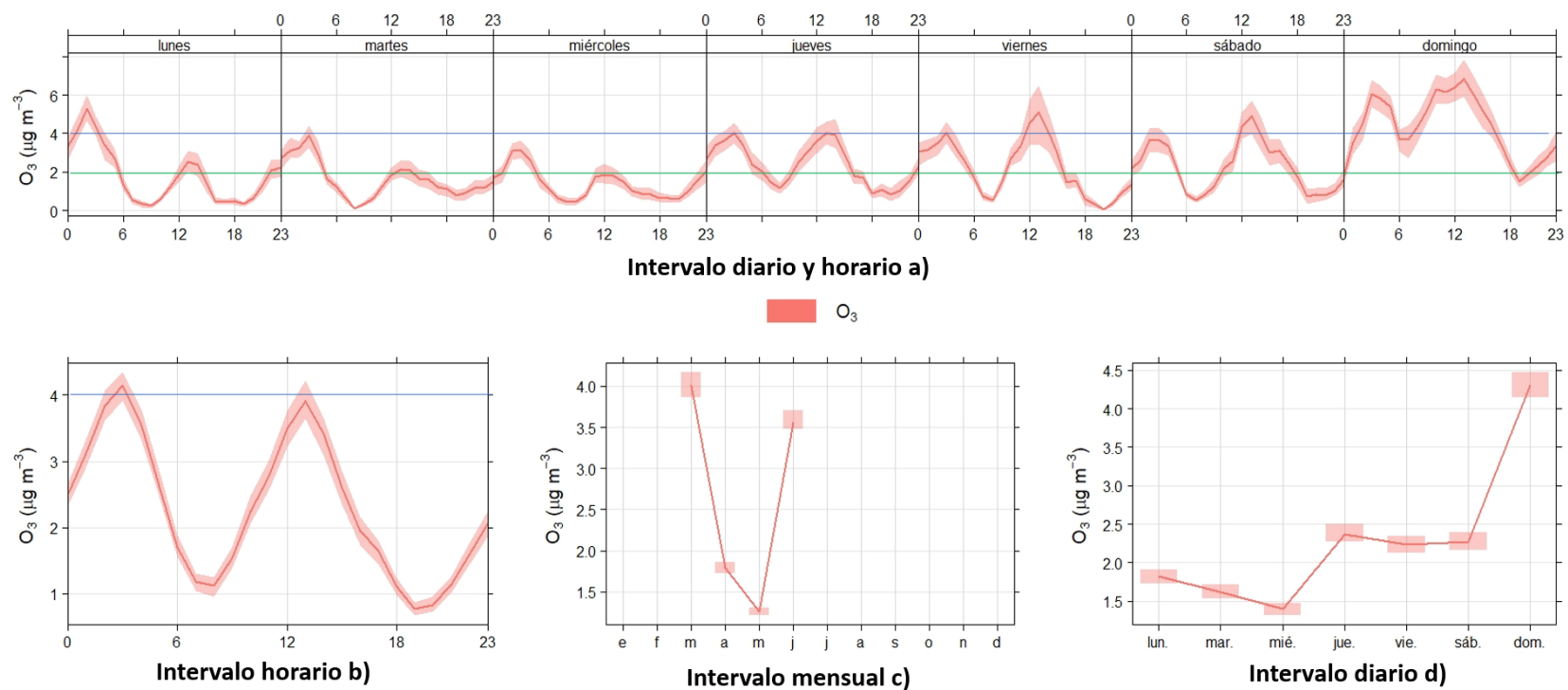
Se estima que los niveles bajos de concentración de ozono pueden ser ocasionados por los factores que favorecen la dispersión de los contaminantes en la zona de estudio como la velocidad del viento y la topografía plana sin barreras edilicias o geográficas importantes, característicos del lugar donde se realizó la medición.

**Figura 10.** Concentración de Ozono ( $\mu\text{g m}^{-3}$ ) para la campaña de medición entre el 18 de marzo y 18 de junio de 2021.



Fuente: Elaboración propia.

**Figura 11.** Variación temporal de Ozono ( $\mu\text{g m}^{-3}$ ) durante la campaña de medición entre el 18 de marzo y 18 de junio de 2021.



Fuente: Elaboración propia.

La **figura 11**, representa la variación de la concentración del ozono troposférico con respecto al tiempo: a) días de la semana y horas, b) horas, c) meses y d) días de la semana.

A partir de la **figura 11 a)** se pueden apreciar los días de la semana en los que se producen las principales concentraciones de  $O_3$ , además de la distribución del contaminante durante las horas del día donde se puede analizar en detalle el patrón semanal con respecto a la evolución horaria de las concentraciones medidas. Del mismo modo, la **figura 11 b)** muestra un resumen de la concentración medida con respecto a la evolución horaria que permite visualizar en qué horarios predominan las mayores concentraciones de  $O_3$ , y si el perfil obtenido se repite de la misma forma en la **figura 11 a)** para todos los días de la semana.

En este sentido, observando las **figuras 11 a)** y **11 b)**, según el parámetro estadístico que promedia los valores, es notorio el aumento de la concentración de  $O_3$  en horas de la madrugada, ( $4 - 6 \mu\text{g m}^{-3}$ ), de lunes a miércoles y al medio día un valor que no supera los ( $3 \mu\text{g m}^{-3}$ ), para estos días de la semana. Además, se observa, que a partir de los jueves hay una disminución leve en la concentración de ozono en horas de la madrugada hasta los sábados ( $\sim 4 \mu\text{g m}^{-3}$ ). En contrapartida, en horas del mediodía a partir de los jueves hasta los sábados hay un leve aumento de concentración del contaminante ( $\sim 6 \mu\text{g m}^{-3}$ ). Mientras que los domingos muestran su pico en horarios de la madrugada entre los valores ( $4 - 6 \mu\text{g m}^{-3}$ ) y al mediodía, una concentración levemente superior a ( $6 \mu\text{g m}^{-3}$ ).

En este contexto, estudios anteriores evidenciaron que el efecto de medir la concentración de  $O_3$ , durante la madrugada o a tempranas horas del día sin la incidencia de radiación solar, se debe a la reacción de ozonólisis iniciada a través de la cicloadición de la molécula de  $O_3$  al doble enlace del alqueno, es decir, la concentración de  $O_3$  en horarios nocturnos se ve favorecida por la concentración de COVs presentes en la troposfera (Gaona 2017). Asimismo, los estudios realizados por Cheung y Wang (2001) y Wang et al. (2015), indicaron que los picos de ozono durante la noche madrugada podrían deberse al transporte vertical del contaminante en la estratosfera o a la acumulación del mismo en la capa límite durante la noche.

Seguidamente, la **figura 11 c)** resume la evolución de la concentración del gas medido, en función de los meses del año. Esto permite apreciar la variación de la concentración del O<sub>3</sub> a lo largo de los meses, comprobando si existe algún tipo de estacionalidad en el parámetro medido. En este contexto, se observa que los meses donde hubo mayor formación de ozono troposférico fueron los meses marzo y junio, mientras que se midieron valores mínimos durante los meses abril y mayo.

Es de resaltar que en el mes de marzo se realizaron solo 14 días de medición y en el mes de junio solo 18 días. Es decir, no fueron meses completos de 30 o 31 días como lo fueron abril y mayo, respectivamente. Asimismo, sería interesante plasmar la situación global por la cual atraviesa la sociedad ya que, a partir de diciembre del año 2019 hasta la fecha, el mundo se ve afectado por la pandemia de la (Covid-19), la cual ha desencadenado toques de queda totales o parciales, sancionados por los Gobiernos para un mejor control de la enfermedad.

A pesar de que en México (Peralta et al. 2021) y en Brasil (Dantas et al. 2020), aumentó la cantidad de ozono troposférico durante la pandemia, y como Paraguay no cuenta con un registro anterior de medición para la formación del contaminante ozono, es necesario mencionar que durante los meses en los cuales se realizó la medición del contaminante, Paraguay ya no contaba con toques de queda absolutos, sino parciales, es decir, solo contaba con horarios de restricción de circulación durante la noche y madrugada (Decretos N° 5025-5053-5071-5100-5118-6160-5161-5322-5410/2021, Paraguay). No obstante, se considera prudente no atribuir la baja concentración medida de ozono troposférico a la situación mundial.

Asimismo, continuando con el análisis de las gráficas es posible observar una distribución semanal en las **figuras 11 a)** y **11 d)**. A través de estas, se aprecia un aumento en la concentración de O<sub>3</sub> partir de los jueves hasta los domingos, donde se denota un marcado aumento en la concentración del gas en comparación a los otros días de la semana. Con el fin de explicar la tendencia de aumento de concentración del O<sub>3</sub> durante los fines de semana, se recurre al trabajo realizado por los autores Altshuler, Arcado, y Lawson (1995), los cuales indican que la concentración de ozono medida durante los fines de semana podría ser favorecida por acción de reactivo limitante que ejercen los COVs en la formación del gas. Además, estudios revelan que en varias

partes del mundo este efecto es recurrente, hasta se lo conoce como efecto del fin de semana o efecto del domingo (Blanchard y Fairley 2001; Cleveland et al. 1974; Xie et al. 2016).

Como complemento de la figura 11, la **figura 12** relaciona los estadísticos de la distribución central como la mediana (línea continua roja) y las medidas de posición no central como el primer cuartil (área roja oscura) y el percentil 95 (área roja clara). Es decir, para la **figura 12 a)** se observa que el 50% de los datos (mediana) no superó la concentración de ( $5 \mu\text{g m}^{-3}$ ), mientras que el primer cuartil se mantuvo inferior o igual de lunes a miércoles y supera levemente dicha concentración a partir de los jueves hasta domingo. Por otro lado, el parámetro estadístico no central, percentil 95, mostró un aumento de jueves a domingo entre el rango de concentración de ( $10 - 20 \mu\text{g m}^{-3}$ ), sugiriendo que la posibilidad de encontrar estos valores durante esos días de la semana sería del 95%.

Seguidamente, en la **figura 12 b)** se observa la relación existente entre las concentraciones del contaminante medido con respecto a los horarios del día. En este sentido se observa con mayor nitidez el aumento de la concentración del  $\text{O}_3$  en horarios de la madrugada y el medio día.

Con relación al resumen presentado en la **figura 12 c)**, es posible describir a través del estadístico central, como en los meses marzo y junio se presentaron valores medios que oscilaron entre la concentración mínima detectable por el sensor, y fueron aumentando sin alcanzar la concentración de  $5 \mu\text{g m}^{-3}$ . Mientras que en los meses de abril y mayo la mediana es constante, indicando la posibilidad de que el 50% de los valores sea igual al valor límite detectable por el sensor del equipo.

En este sentido, continuando con el análisis de la figura 12 c), se puede decir que el estadístico primer cuartil, indica que la concentración de  $\text{O}_3$  superó levemente el valor de  $5 \mu\text{g m}^{-3}$ , sin alcanzar la concentración de  $10 \mu\text{g m}^{-3}$ . En contrapartida, durante los meses abril y mayo, el primer cuartil indicó una disminución en la concentración del contaminante medido, sin alcanzar el valor de  $5 \mu\text{g m}^{-3}$ . Del mismo modo, al considerar el percentil 95, en los meses marzo y junio es notorio observar que los valores inferiores al 95% arrojan una concentración superior a  $10 \mu\text{g m}^{-3}$ . Asimismo, teniendo

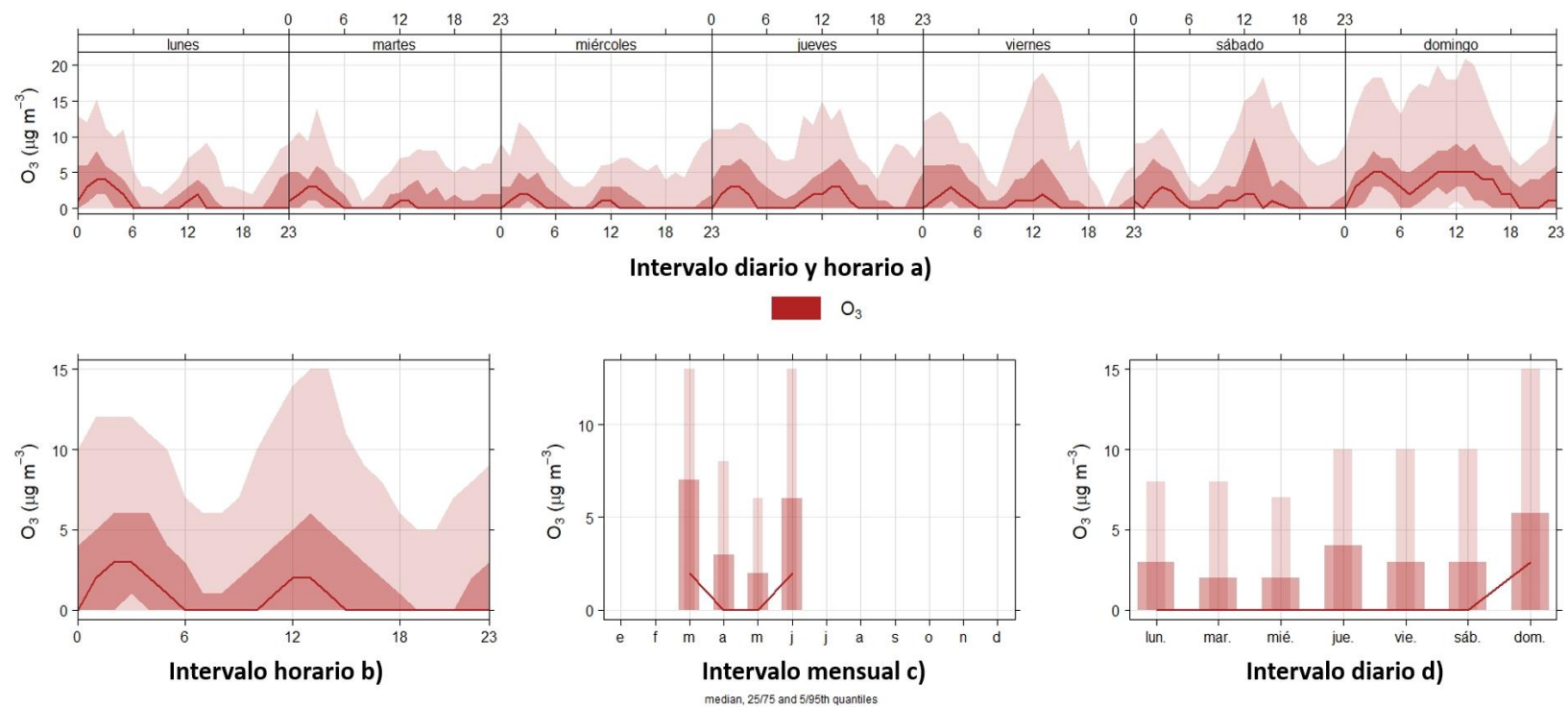
en cuenta los meses abril y mayo, el percentil 95 indica la posibilidad de medir concentraciones que no superen el intervalo de 5 - 10  $\mu\text{g m}^{-3}$ .

Finalmente, en la **figura 12 d)**, donde se observa el comportamiento diario del contaminante, es posible notar una mediana que ronda alrededor de la concentración mínima que pudiera ser captada por el sensor para casi todos los días de la semana, esto es, de lunes a sábado, mientras que los domingos es notorio un leve aumento de la medida central que no supera la concentración de 5  $\mu\text{g m}^{-3}$ . Del mismo modo, considerando el parámetro primer cuartil para el intervalo de lunes a sábado también es posible medir la concentración de 5  $\mu\text{g m}^{-3}$ , con una posibilidad del 25%.

En contrapartida, el efecto de fin de semana descrito por Blanchard y Fairley (2001), se ve reflejado en los días domingo, ya que, el primer cuartil arroja un valor levemente superior a 5  $\mu\text{g m}^{-3}$ . Bajo el mismo criterio de efecto de fin de semana, el percentil 95, también indica que en los días domingo existe la posibilidad de superar la concentración de 10  $\mu\text{g m}^{-3}$  y alcanzar la concentración de 15  $\mu\text{g m}^{-3}$ . Mientras que, para los otros días de la semana, esto es, de lunes a sábado, el mismo parámetro estadístico indica que existe el 95% de probabilidad de alcanzar la concentración de 5 a 10  $\mu\text{g m}^{-3}$ .

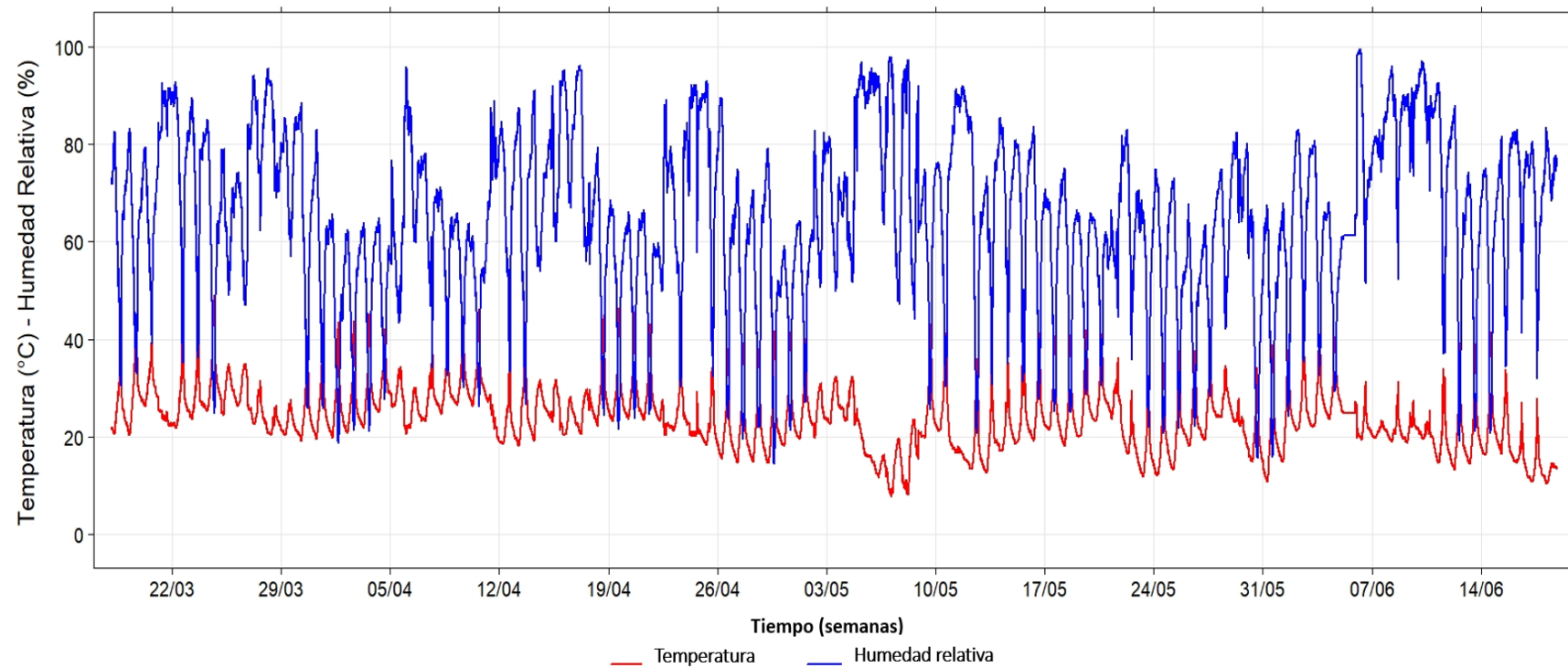


**Figura 12.** Variación temporal de Ozono ( $\mu\text{g m}^{-3}$ ) durante la campaña de medición entre el 18 de marzo y 18 de junio de 2021.



Fuente: Elaboración propia.

**Figura 13.** Evolución de la temperatura ambiente (°C) y la humedad relativa del aire (%) para la campaña de medición entre el 18 de marzo y 18 de junio de 2021.



Fuente: Elaboración propia.

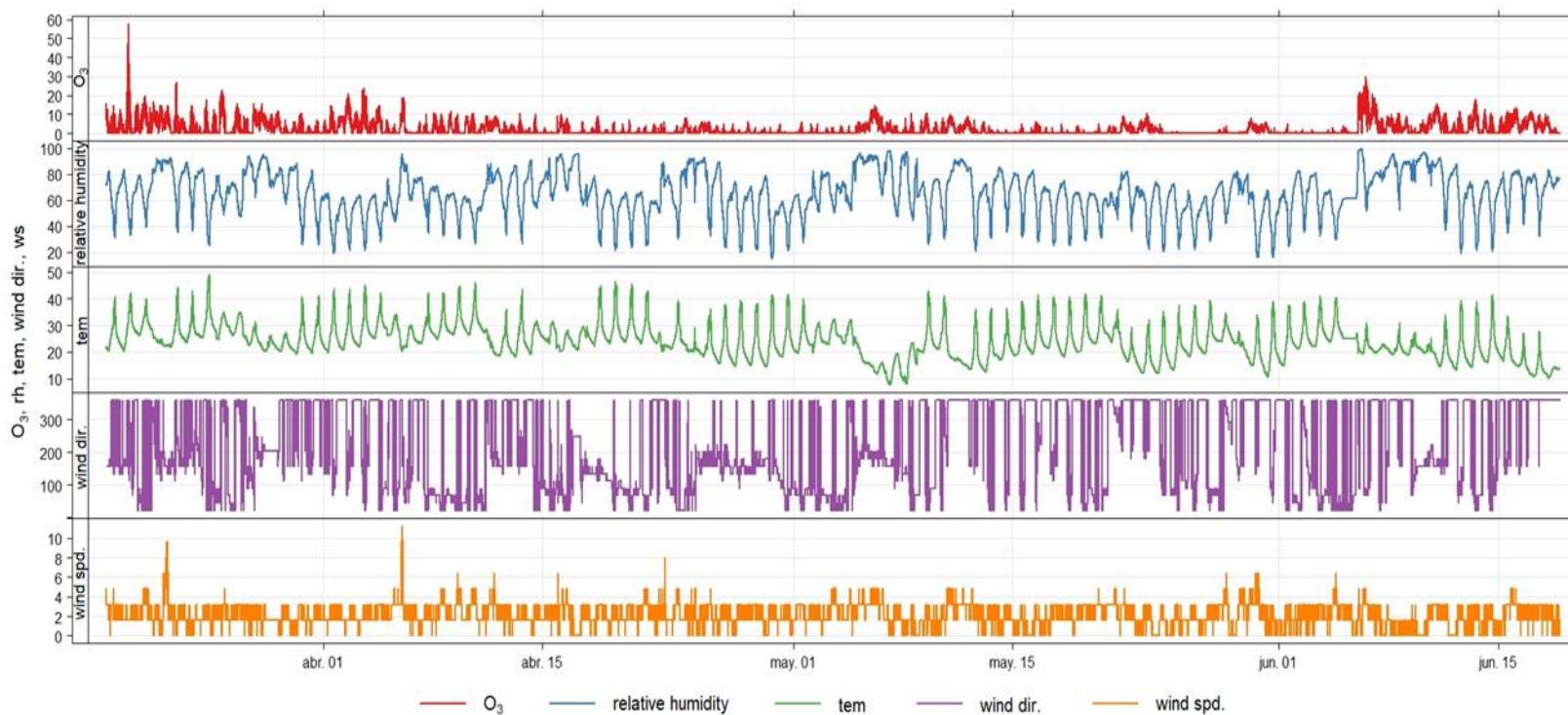
En la **figura 13**, se muestra la relación complementaria existente entre la temperatura ambiente ( $^{\circ}\text{C}$ ) y la humedad relativa del aire (%). Esto es, la humedad relativa se incrementa a medida que la temperatura disminuye y viceversa. Considerando los datos del año 2020, publicados en el Anuario Climatológico del Paraguay, indican que el promedio de las medias de la temperatura ambiente para los meses (marzo, abril, mayo y junio) fue de  $14,12^{\circ}\text{C}$ , mientras que, el promedio de las medias mensuales del parámetro humedad relativa para los meses (marzo, abril, mayo y junio) tuvo un valor de  $62,15\%$  (DINAC 2020). En este sentido, se podría decir que no existe una diferencia marcada entre los valores de humedad relativa y temperatura ambiente medidos durante el periodo de estudio a comparación de los datos registrados por la DINAC, considerando el mismo periodo trimestral del año 2020. No obstante, se debe tener en cuenta que los parámetros climatológicos por ser naturales no presentan estabilidad ni mucho menos reproducibilidad, haciendo propicia y favorable la dispersión y transporte de los contaminantes que se podrían generar en un punto.

A seguir, la **figura 14**, muestra la evolución de los parámetros medidos por el sensor y los recabados de la DINAC, durante el tiempo que abarcó la campaña de muestreo: concentración de  $\text{O}_3$ , humedad relativa del aire, temperatura ambiente, dirección y velocidad del viento.

En este sentido, la figura 14 muestra la variabilidad en la formación del gas estudiado durante todo el periodo de medición con los parámetros meteorológicos. Donde, es posible observar el aumento en la concentración de ozono troposférico con el aumento de la temperatura, hecho que se ve desfavorecido con el aumento de la humedad relativa. El estudio realizado por Cano et al. (2016), revela que la humedad relativa no favorece la formación de ozono troposférico, ya que, al reaccionar el ozono formado con el agua ( $\text{H}_2\text{O}$ ) del ambiente se destruye (consume) para formar los radicales hidroxilo ( $\bullet\text{OH}$ ) e hidroperoxilo ( $\text{HO}_2\bullet$ ), reacción que fue explicada anteriormente.

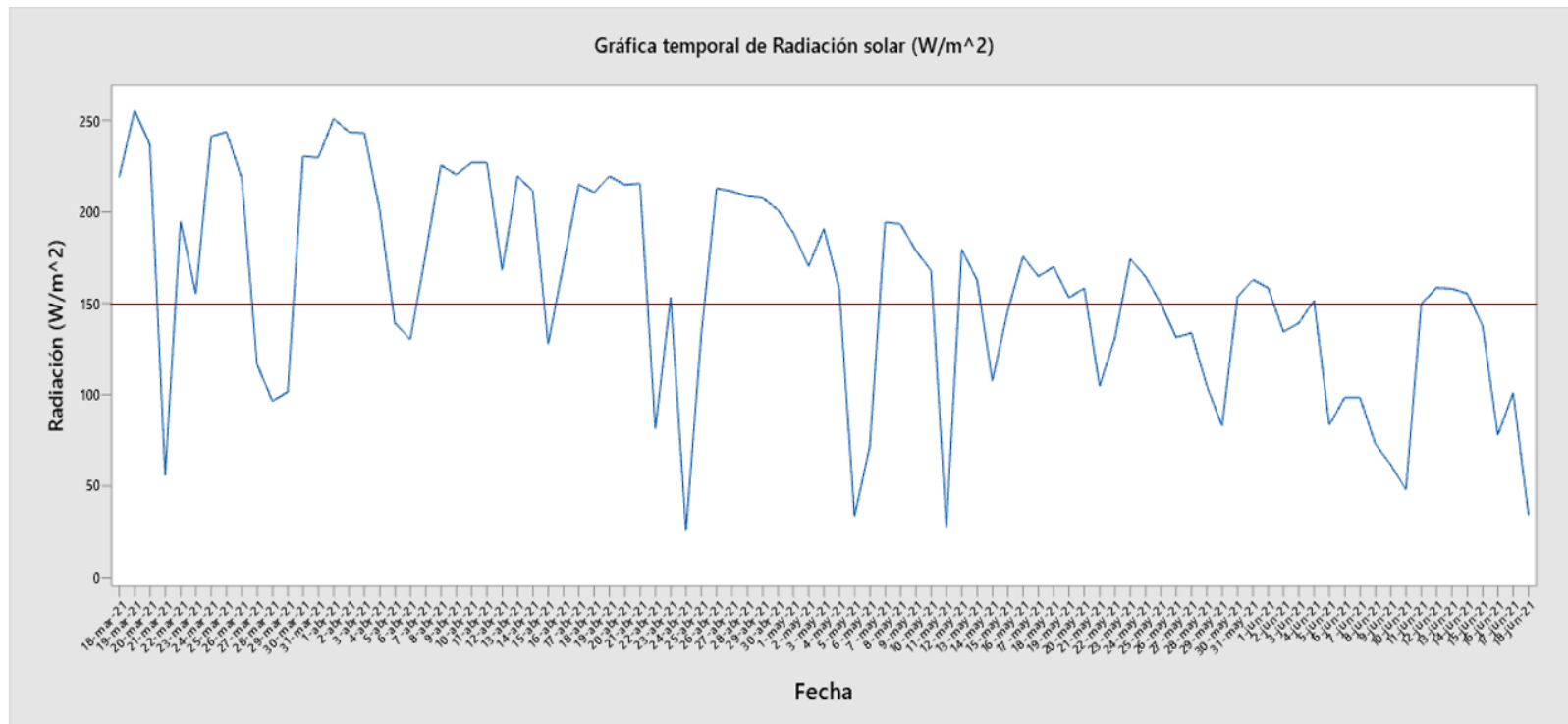
Además, en la figura 14 se observa la significativa variabilidad de los parámetros dirección y velocidad del viento, respecto a la concentración medida de ozono. Cano et al. (2016), indican que una baja concentración de ozono podría deberse a que los parámetros del viento ayudan a la dispersión del contaminante generado.

**Figura 14.** Resultados de la campaña de medición entre el 18 de marzo y 18 de junio de 2021, de las variables: concentración de  $O_3$  ( $\mu g m^{-3}$ ), humedad relativa del aire (%), temperatura ambiente ( $^{\circ}C$ ), dirección ( $^{\circ}$ ) y velocidad del viento ( $m s^{-1}$ ).



Fuente: Elaboración propia.

**Figura 15.** Gráfica temporal de la radiación solar ( $W\ m^{-2}$ ).



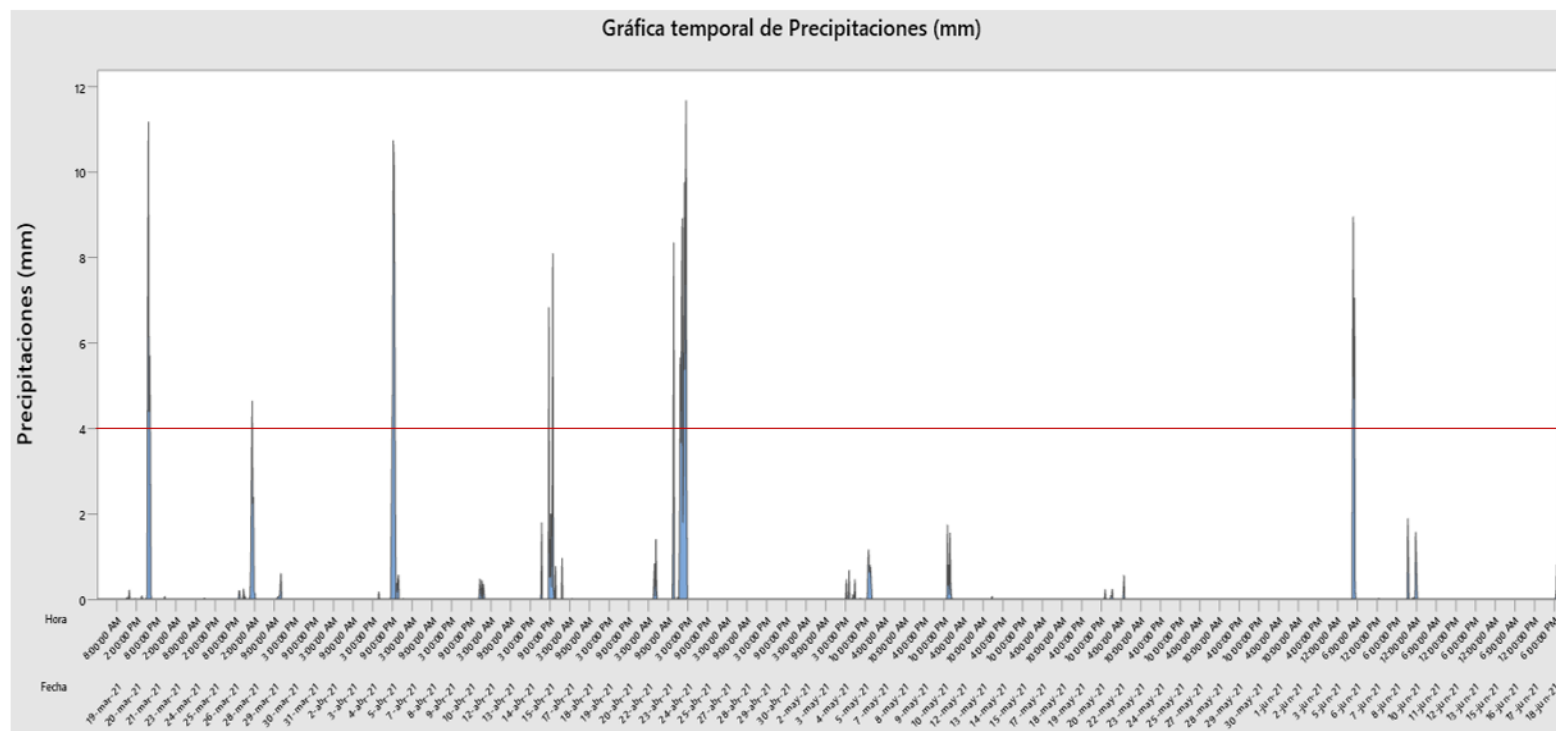
Fuente: Elaboración propia.

Las **figuras 15 y 16** son gráficas temporales de radiación solar y precipitación, respectivamente. Donde, la primera fue diseñada a partir de los datos medidos y proveídos por el MADES y la segunda, a partir de los datos medidos y suministrados para el estudio por la DINAC.

En la figura 15, se aprecia la variación de la radiación solar ( $\text{W m}^{-2}$ ) con respecto al tiempo, mediante la cual se observan tres picos de valores inferiores a  $50 \text{ W m}^{-2}$ , y con mayor frecuencia picos superiores a  $150 \text{ W m}^{-2}$ . Como se mencionó anteriormente, la variable radiación solar, es un parámetro que incide directamente en la formación fotoquímica del contaminante en estudio. En consecuencia, más adelante, la figura 17 relaciona la cantidad de ozono troposférico medida por el sensor, con los datos de radiación solar proporcionados por el MADES.

Asimismo, la figura 16 representa la cantidad de precipitaciones pluviales registradas durante el periodo de estudio, dichos valores, relacionan este parámetro meteorológico con la concentración de ozono registrada por el sensor, ya que, el estudio realizado por Adame (2009) indica que la lluvia limpia la atmósfera ocasionando una menor formación de ozono troposférico. Más adelante en la figura 17, se relaciona la pluviometría con la formación del  $\text{O}_3$ .

**Figura 16.** Gráfica temporal de precipitaciones (mm).



Fuente: Elaboración propia.

Seguidamente, la **figura 17** representa la variación temporal de los parámetros medidos: a) precipitación, b) formación de ozono c) radiación solar y d) temperatura.

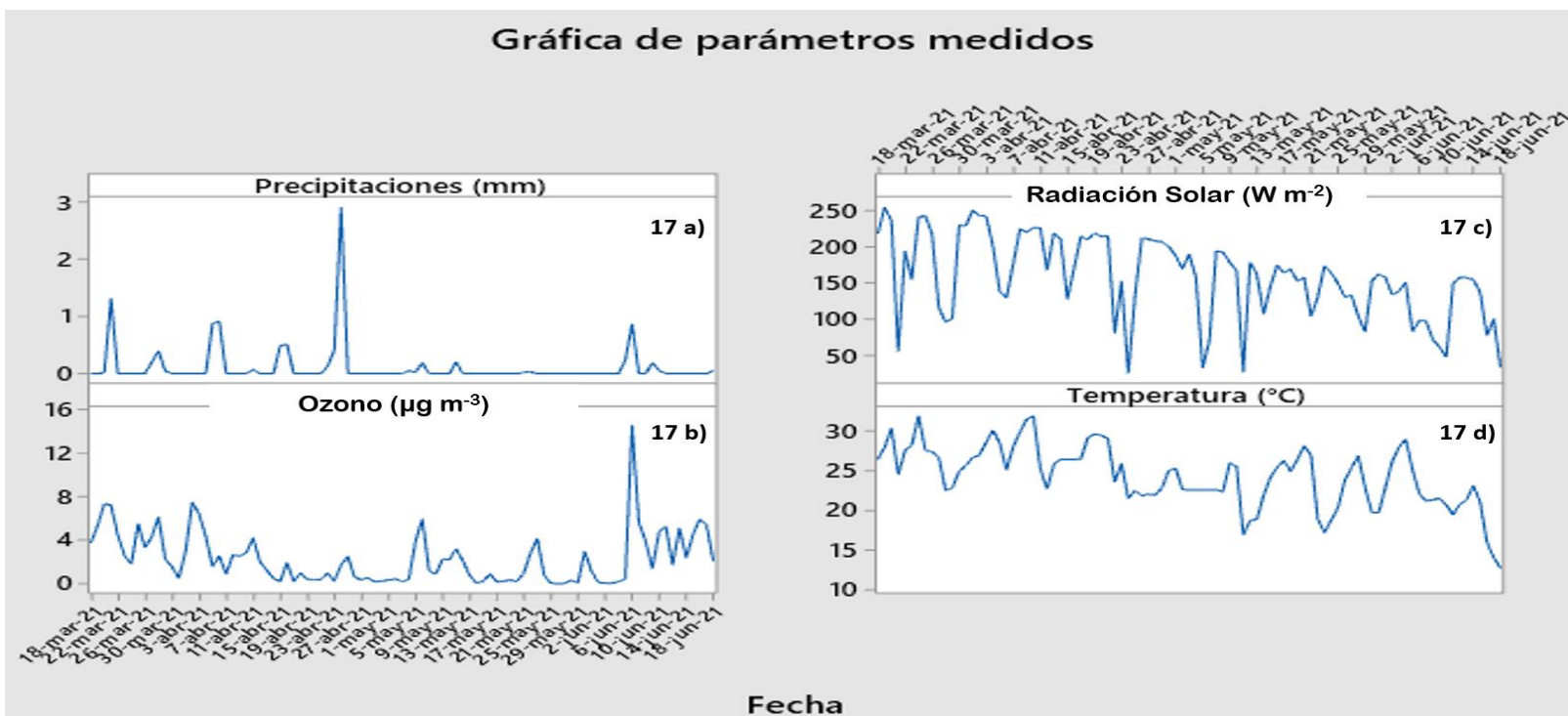
Comparando las figuras **17 a)** y **17 b)** es posible apreciar la relación inversa existente entre la precipitación y la formación de ozono troposférico, esto es, en los días con precipitación, hubo una menor formación de ozono troposférico. Se considera que la baja concentración de ozono medida en los días lluviosos, pudo haber sido causada por las precipitaciones, ya que las mismas, limpian la atmósfera diluyendo o dispersando los contaminantes que pudieran existir en ella. Además, como ya se explicó anteriormente, es posible el consumo o disminución de las concentraciones de ozono troposférico a partir de su reacción con las moléculas de agua ( $H_2O$ ), existentes en el ambiente, debido a una elevada humedad relativa o por las precipitaciones pluviales. Cabe mencionar que según fuentes consultadas de la Dirección de Meteorología e Hidrología de DINAC, el barrido atmosférico presentado por la lluvia se ve reflejado en la disminución de las concentraciones de contaminantes a las 24h después del evento meteorológico.

Bajo el mismo criterio, comparando la figura **17 b)** y **17 c)** se logra visualizar la relación directa existente entre la formación de ozono troposférico y la radiación solar, ya que dicho gas se forma a partir de la reacción fotoquímica de sus precursores. No obstante, existen estudios, que demostraron la presencia de ozono troposférico en horarios nocturnos, esto es, sin la incidencia de la radiación solar, como ya se mencionó anteriormente.

A partir de las figuras **17 b)** y **17 d)** es posible relacionar la formación de ozono y el parámetro meteorológico temperatura, donde es apreciable la relación directa existente entre ambas variables. La incidencia de la temperatura en la formación de ozono troposférico se podría explicar desde los principios termodinámicos que rigen a los gases. Es decir, considerando la propiedad física del ozono y las Leyes que rigen a los fluidos, es posible aseverar que un aumento de temperatura favorecerá la velocidad de reacción para la formación de ozono troposférico (Adame 2009).



**Figura 17.** Gráfica temporal de precipitaciones (mm), radiación solar ( $\text{W m}^{-2}$ ), temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ ) y formación de ozono ( $\mu\text{g m}^{-3}$ ).

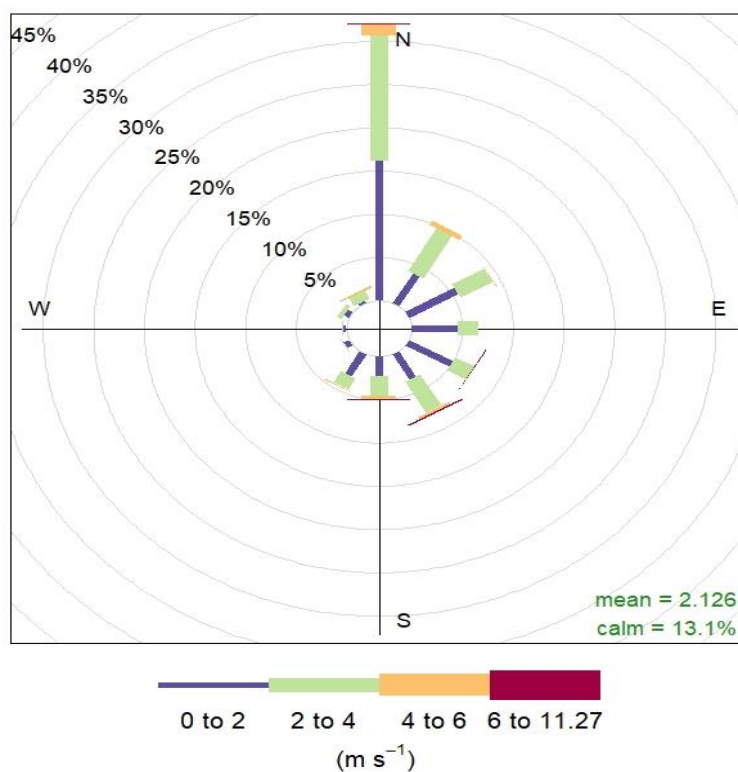


Fuente: Elaboración propia.

Asimismo, Adame (2009), a través de su estudio de investigación indicó que el viento es un factor determinante para el transporte y difusión de los contaminantes, ya que los vientos en calma favorecen la acumulación de los mismos y los vientos con elevadas velocidades los diluyen. Es por ello que, en las figuras 18 y 19 se presentan las medidas de velocidad y dirección del viento obtenidas por la estación de monitoreo ubicada en la Secretaría Nacional de Deportes, dependiente de la DINAC, durante el periodo que abarcó la campaña de medición (18 de marzo al 18 junio del 2021), con una frecuencia 5 minutal durante las 24 h del día, totalizando 26.665 valores para cada uno de los parámetros (dirección y velocidad del viento).

A partir de la tabla 2, es posible observar que la velocidad promedio del viento es igual a  $2,13 \text{ m s}^{-1}$  y en términos de frecuencia de la velocidad en función a la dirección del viento, se puede visualizar a partir de la **figura 18** que las mayores frecuencias proceden del norte con velocidades entre  $4 - 6 \text{ m s}^{-1}$  (35 - 30%) y  $2 - 4 \text{ m s}^{-1}$  (30 - 15%), siguiendo la dirección noreste con velocidades entre  $4 - 6 \text{ m s}^{-1}$  (10%).

**Figura 18.** Frecuencia de velocidad del viento ( $\text{m s}^{-1}$ ) en función a la dirección del viento (%), durante el periodo de estudio.

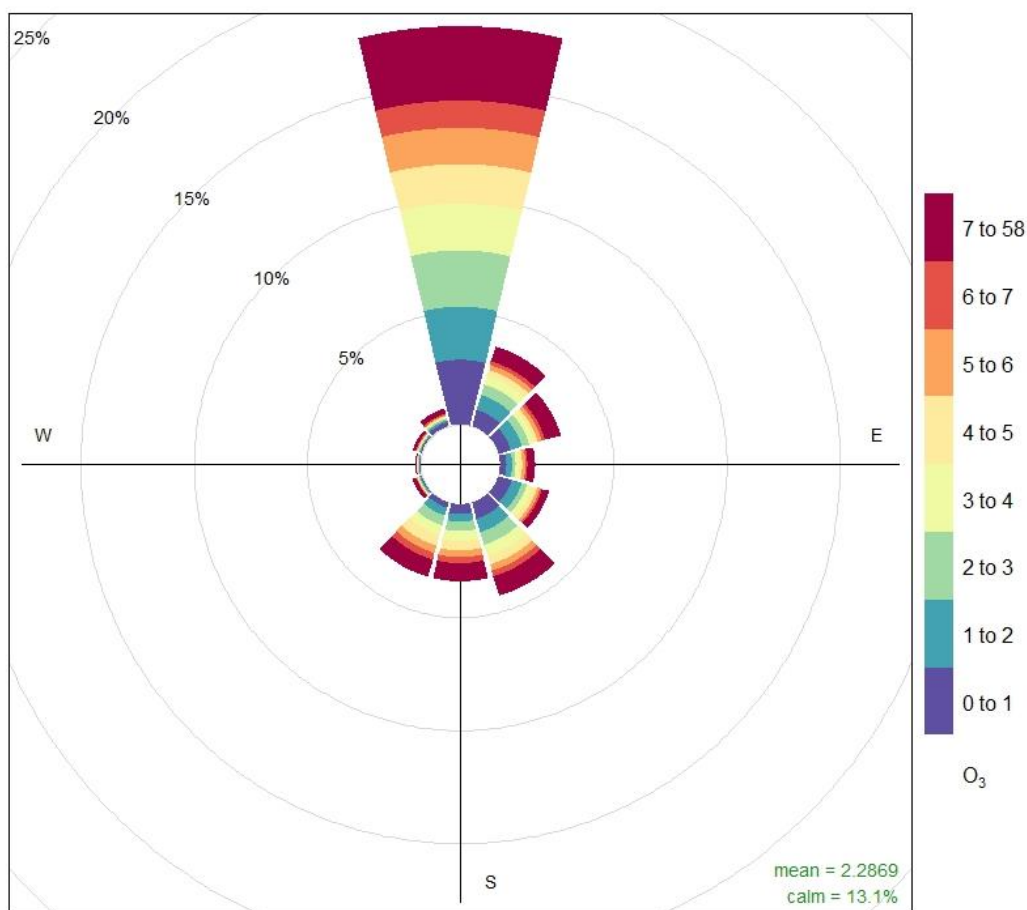


Fuente: Elaboración propia.

Además, mediante la representación gráfica conocida como Rosa de Contaminantes, plasmada en la **figura 19** es posible apreciar la relación existente entre la dirección del viento y la concentración del contaminante medido.

En este sentido, se percibe como la mayor incidencia (>15%) es producida por el viento de la coordenada norte (N), ya que las posibilidades de obtener mayor formación de ozono, se ve favorecida por los vientos provenientes de dicha componente. En contrapartida, la menor incidencia ( $\sim 0\%$ ) para la formación del  $O_3$  se observa en la componente oeste (O).

**Figura 19.** Gráfica Rosa de Contaminantes, indica la frecuencia de concentración de ozono ( $\mu\text{g m}^{-3}$ ) en función a la dirección, durante la campaña de medición.



Fuente: Elaboración propia.

A continuación, de manera ilustrativa, la **figura 20** muestra en un calendario las concentraciones de ozono troposférico ( $\mu\text{g m}^{-3}$ ) obtenidas durante el periodo de medición. Donde, los colores claros indican una menor concentración del gas de interés (inferior a  $4 \mu\text{g m}^{-3}$ ), mientras que la coloración oscura indica una mayor concentración de  $\text{O}_3$  (superior a  $6 \mu\text{g m}^{-3}$ ).

Mediante la aplicación de esta herramienta, es posible percibir que, durante todo el periodo de medición se observan valores promedios inferiores a  $6 \mu\text{g m}^{-3}$  con excepción del 6 de julio, donde se observa una coloración lila oscura, indicando una concentración promedio mayor a lo habitual, igual a  $15 \mu\text{g m}^{-3}$ . No obstante, se debe tener presente que dicho valor no representa niveles significativos de contaminación, ya que se encuentra muy por debajo del límite permitido por la normativa nacional.

**Figura 20.** Gráfica de calendario, indica la variación temporal (días) de la concentración de Ozono ( $\mu\text{g m}^{-3}$ ) durante la campaña de medición.

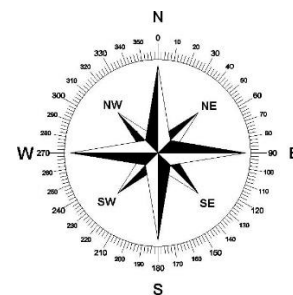


Fuente: Elaboración propia.

Seguidamente, en la **tabla 3**, se presentan las direcciones del viento correspondientes a cada intervalo angular, de modo explicativo para la siguiente presentación de valores.

**Tabla 3.** Intervalos angulares para la clasificación de la dirección del viento

Dirección	Intervalo angular (°)	Intervalo letras	Intervalo imagen
Norte	337,5 – 22,5	N	
Noreste	22,5 – 67,5	NE	
Este	67,5 – 112,5	E	
Sureste	112,5 – 157	SE	
Sur	157 – 202,5	S	
Suroeste	202,5 – 247,5	SO	
Oeste	247,5 – 292,5	O	
Noroeste	292,5 – 337,5	NO	



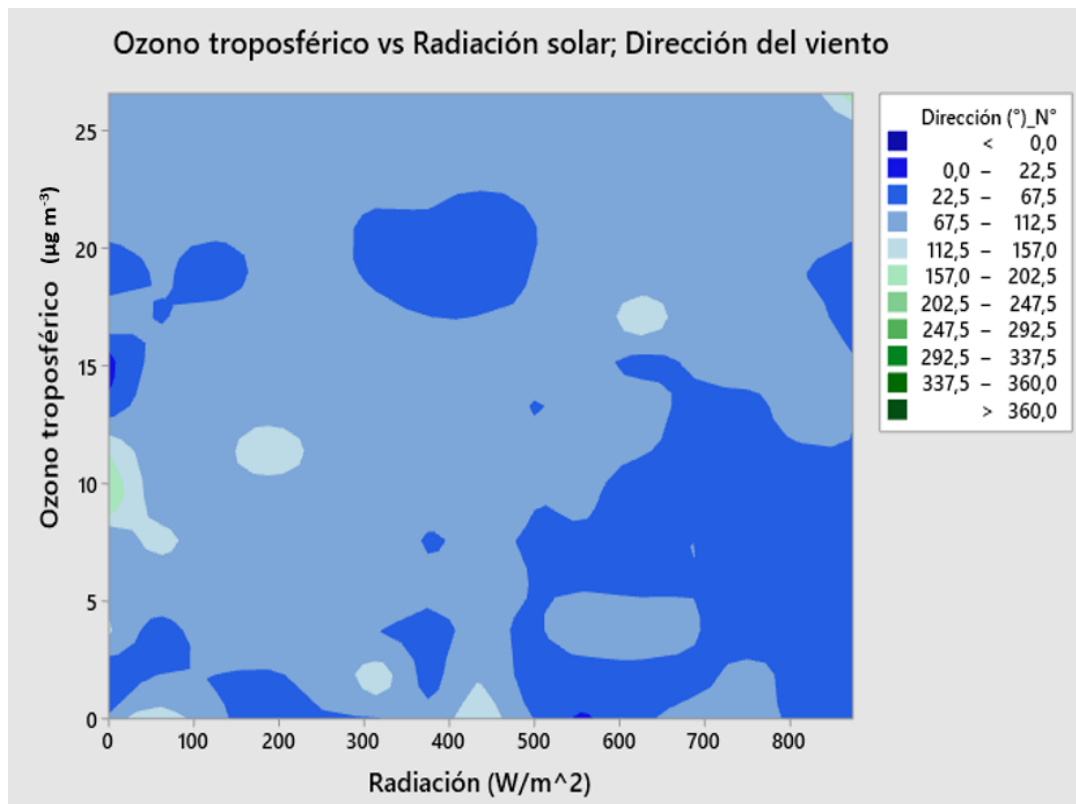
Fuente: Elaboración propia

Además, mediante la gráfica de contorno representada en la **figura 21**, se visualiza la relación existente entre la formación de ozono troposférico ( $\mu\text{g m}^{-3}$ ) y la radiación solar ( $\text{W m}^{-2}$ ). Es decir, se observa que las mayores concentraciones de ozono son producidas cuando se miden valores elevados de radiación solar, evidenciando así, la formación fotoquímica del contaminante.

Consecuentemente, se aprecia la predisposición de formación del gas superficial cuando las coordenadas del viento provienen principalmente de la dirección norte (N) y noreste (NE), durante la campaña de medición.

En este sentido, Zavala et al. (2020), indican que la formación de  $\text{O}_3$  y su distribución espacial son afectadas por los patrones de transporte de masa de aire, mayormente influenciados por la topografía, la altitud y la radiación solar.

**Figura 21.** Gráfica de contorno, relaciona la concentración de Ozono ( $\mu\text{g m}^{-3}$ ) con la radiación solar ( $\text{W m}^{-2}$ ) y la dirección del viento ( $^\circ$ ), durante la campaña de medición entre el 18 de marzo y 18 de junio de 2021.

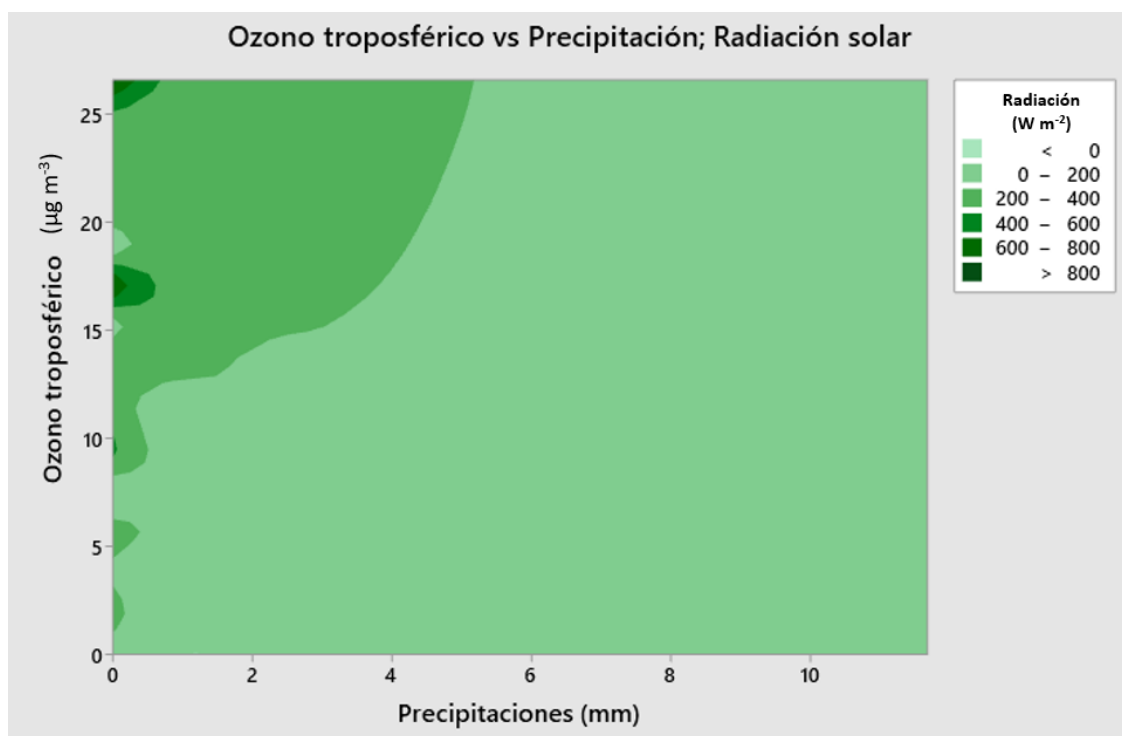


Fuente: Elaboración propia.

Para finalizar el análisis de los datos obtenidos y recabados, se presenta nuevamente una gráfica de contorno en la **figura 22**, mediante la cual, es posible apreciar la correspondencia existente entre la precipitación (mm) y la radiación solar ( $\text{W m}^{-2}$ ), hecho que propicia el incremento de la formación del ozono troposférico ( $\mu\text{g m}^{-3}$ ).

Asimismo, se observa que las mayores concentraciones de ozono se presentan con los valores más elevados de radiación solar (superiores a  $400 \text{ W m}^{-2}$ ) y en ausencia de lluvia, lo que evidencia la formación fotoquímica del contaminante cuando la atmosfera no es limpiada por la precipitación húmeda.

**Figura 22.** Gráfica de contorno, relaciona la concentración de Ozono ( $\mu\text{g m}^{-3}$ ) con la precipitación (mm) y la radiación solar ( $\text{W m}^{-2}$ ), durante la campaña de medición entre el 18 de marzo y 18 de junio de 2021.



Fuente: Elaboración propia.

Seguidamente, de manera complementaria la **tabla 4**, presenta los estadísticos de los parámetros proveídos por el MADES: ozono troposférico ( $O_3$ ) y dióxido de nitrógeno ( $NO_2$ ), en unidades de concentración ( $\mu g m^{-3}$ ), los cuales fueron medidos en la Estación de calidad del aire de dicho Ministerio.

**Tabla 4.** Valores estadísticos de los parámetros ozono troposférico y dióxido de nitrógeno ( $O_3$  y  $NO_2$ ).

Parámetro	Promedio	Moda	Valor mínimo	Valor máximo	Desviación estándar	Valor límite permisible
$O_3 (\mu g m^{-3})$	15,9	12,6	5,3	66,6	11,2	120
$NO_2 (\mu g m^{-3})$	10,3	4	2,5	22,8	5,4	200

Fuente: MADES, 7 de mayo al 15 de junio de 2021.

En concreto, es posible observar un valor promedio para el  $O_3$  igual a 15,9 ( $\mu g m^{-3}$ ) y un valor máximo de 66,6 ( $\mu g m^{-3}$ ). Además, analizando los datos del precursor  $NO_2$ , se aprecia que el valor promedio de la concentración de este gas fue de 10,3  $\mu g m^{-3}$ , mientras que la mayor concentración medida fue de 22,8  $\mu g m^{-3}$ .

De los valores obtenidos, se destaca que, durante el periodo de medición, considerado para este estudio, las concentraciones arrojadas para ambos gases en la Estación de Calidad del aire del MADES, no superaron los valores de la concentración límite estipulada en la Legislación Nacional para ambos contaminantes y dichos resultados se asemejan a los datos obtenidos por el sensor de ozono utilizado en este trabajo.

Finalmente, en la **figura 23**, se observa la superposición de los promedios de las concentraciones ( $\mu g m^{-3}$ ) medias en la Estación del MADES, ya mencionada, para los gases  $O_3$  (línea naranja) y  $NO_2$  (línea azul), en función al tiempo transcurrido en días.

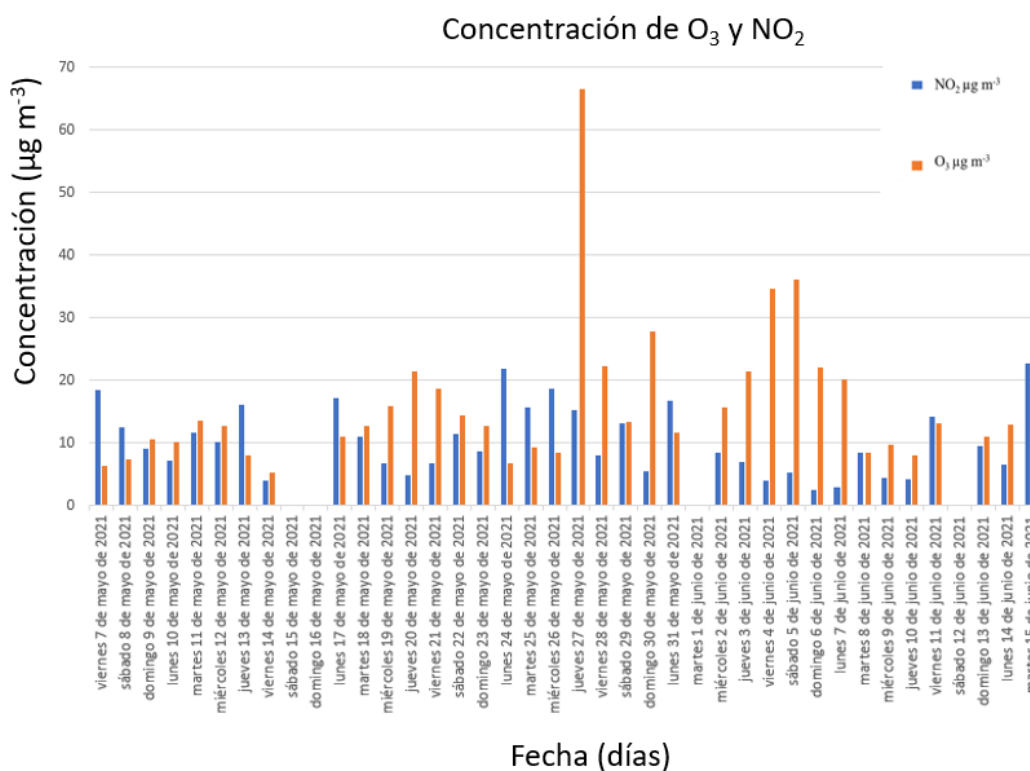
En este sentido, a partir de la gráfica, es posible visualizar que, para un periodo de 36 días considerados para la medición, la concentración del  $O_3$  superó a la concentración de  $NO_2$ , con una frecuencia del 64%. Esto es, 26 días arrojaron valores superiores de concentración de ozono troposférico para el periodo de tiempo analizado. Para poder



explicar este hecho se hace referencia a los trabajos de investigación realizados por Peralta et al. (2021) y Cuesta et al. (2018), los cuales indican que el aumento de NO<sub>x</sub> se produce debido a una disminución de ozono troposférico y viceversa.

Además, cabe destacar que el periodo de medición abarcó 5 (cinco) semanas, dentro de las cuales también se observó el aumento de concentración de O<sub>3</sub> ( $\mu\text{g m}^{-3}$ ) durante los fines de semana, hecho que se presenta en varios estudios como se mencionó anteriormente.

**Figura 23.** Variación temporal de O<sub>3</sub> ( $\mu\text{g m}^{-3}$ ) y NO<sub>2</sub> ( $\mu\text{g m}^{-3}$ ) durante la campaña de medición entre el 7 de mayo y 15 de junio de 2021, en la Estación de Calidad del Aire del MADES.



Fuente:(MADES 2021a, 2021b).

## 7. CONCLUSIONES

En el marco de este trabajo de investigación se realizó la medición cuantitativa de la concentración cinco-minutal del ozono troposférico generado por el área de influencia de las Avenidas Defensores del Chaco y Eusebio Ayala, en un periodo de tres (3) meses de muestreo continuo, a partir del 18 de marzo al 18 de junio de 2021, durante las 24 h del día, a través de la técnica de monitoreo por sensor.

Para complementar el análisis de la concentración medida de ozono troposférico, se determinaron los parámetros ambientales que podrían influenciar en la concentración de ozono troposférico como: humedad relativa, temperatura ambiente, dirección y velocidad del viento. Los cuales, fueron tratados estadísticamente con el fin de lograr el análisis temporal de los mismos, con relación a la concentración de ozono troposférico presente en el punto de muestreo.

De acuerdo con los resultados obtenidos y al análisis realizado se logró evidenciar que:

- Hubo formación de ozono troposférico en horas de la madrugada de lunes a miércoles que no superaron el valor promedio de  $(4 - 6 \mu\text{m}^{-3})$ , además para horarios del mediodía durante estos días de la semana, no se superó el valor promedio de concentración de  $(3 \mu\text{m}^{-3})$ . Asimismo, para el intervalo de jueves a sábados, en horarios de la madrugada y al mediodía no se midieron valores promedio mayores a  $(6 \mu\text{m}^{-3})$ . En contrapartida, los domingos mostraron picos en horas de la madrugada entre los valores promedios de  $(4 - 6 \mu\text{m}^{-3})$ , y al medio día concentraciones levemente superiores a  $(6 \mu\text{m}^{-3})$ .

- Existe correspondencia entre la formación del gas en estudio y los parámetros meteorológicos. Esto es, se observó la relación directa existente para las variables (temperatura y radiación solar) con la formación del O<sub>3</sub> y la relación inversa con los parámetros humedad relativa y precipitación húmeda (lluvia). Mientras, que la velocidad promedio igual a (2,13 m s<sup>-1</sup>) y la componente Norte del viento aportan transporte del contaminante y la dilución de este.

- Se evaluaron estadísticamente los resultados medidos por el MADES, en su estación de calidad del aire. Durante el periodo que abarcó esta recolección de datos se notó un solo pico de (66,6 µg m<sup>-3</sup>) y una moda de (12,6 µg m<sup>-3</sup>) este hecho demostró que las concentraciones de ozono en la estación de referencia de dicho Ministerio son casi comparables con los datos obtenidos por el presente trabajo.

- Se resalta la robustez del equipo utilizado ya que no mostró inconvenientes mayores durante el periodo de medición, a pesar de encontrarse en la intemperie logró soportar las inclemencias del tiempo (jornadas de mucho calor y eventos tormentosos).

- Medir una baja concentración de ozono (menor al valor límite de detección del equipo utilizado) no descarta la existencia de elevadas concentraciones de este en otros puntos. A pesar de que no se hayan sobrepasado los límites permisibles de concentración según normativa nacional (Resolución MADES 259/2015) ni internacional (OMS, 2021).

Finalmente, es importante mencionar que, durante el periodo de estudio, el mundo ha vivido una pandemia de la cual aún no se está recuperando. No obstante, esto no resultó en inconvenientes para la realización de este estudio, y tampoco se cree que pudiera afectar en gran medida a los datos obtenidos, los cuales representan una referencia para futuros estudios relacionados con la contaminación urbana y el elevado tráfico vehicular.

## 8. SUGERENCIAS PARA INVESTIGACIONES FUTURAS

A partir de este trabajo de tesis, se busca promover el desarrollo para estudios futuros en el país y se recomienda:

- Proseguir con la investigación y el estudio de la formación fotoquímica del ozono troposférico en áreas con elevada incidencia antropogénica y en un periodo que abarque análisis de series temporales mayores (como mínimo durante un año).
- Se considera relevante seguir estudiando al  $O_3$ , mediante el monitoreo simultáneo de varios puntos en la ciudad de Asunción.
- Se recomienda hacer estudios de medición en áreas remotas, con poca incidencia antropogénica para tener una Línea de Base de referencia (mediciones de fondo del ozono urbano). Si bien, existe evidencia científica de contaminación por  $O_3$  en áreas rurales debido a las reacciones generadas por los COVsB, se sugiere realizar mediciones con el fin de recabar datos que pudieran servir de referencia para intercomparar la concentración de  $O_3$  generado tanto en zonas rurales como urbanas.

A través de las sugerencias realizadas, se hace indispensable un monitoreo continuo de las variables de calidad del aire, a fin de contar con una base de datos con información científica publicable del  $O_3$  y otros contaminantes criterio, que tenga la virtud de analizar la fluctuación de estos, respecto a la estacionalidad mediante series de tiempo interanuales.

Finalmente, se considera importante el aporte del presente trabajo con relación al tratamiento y análisis de datos, los cuales permiten facilitar una base científica de referencia para estudios nacionales y/o regionales que admitan la elaboración de normativas ambientales que podrán ser adoptadas a futuro para la toma de decisiones gubernamentales, que logren la reducción de los efectos producidos por la contaminación del aire en la salud humana y ambiental.

## 9. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Adame, José. 2009. “Caracterización y comportamiento del ozono superficial en la provincia de Huelva”. Universidad de Huelva.
- Aeroqual. 2016. “Manual de productos Aeroqual”. 20.
- Aeroqual. 2019. “Portable Air Quality Monitors”. 24.
- Akimoto, Hajime, Yasuaki Mori, Kansuke Sasaki, Hiroto Nakanishi, Tsuyoshi Ohizumi, y Yasuyuki Itano. 2015. “Analysis of monitoring data of ground-level ozone in Japan for long-term trend during 1990-2010: Causes of temporal and spatial variation”. *Atmospheric Environment* 102:302–10.
- Altshuler, Samuel L., Theodore D. Arcado, y Douglas R. Lawson. 1995. “Weekday vs. weekend ambient ozone concentrations: Discussion and hypotheses with focus on Northern California”. *Journal of the Air and Waste Management Association* 45(12):967–72.
- Baird, Colin, y Michael Cann. 2012. *Environmental Chemistry*. Fifth Edit. New York: W. H. Freeman and Company.
- Bermejo, Victoria, Rocío Alonso, Susana Cozar, Isaura Rábago, y Marta García. 2009. “El ozono troposférico y sus efectos en la vegetación”. 1–75.
- Blanchard, Charles L., y David Fairley. 2001. “Spatial mapping of VOC and NO<sub>x</sub>-limitation of ozone formation in central California”. *Atmospheric Environment* 35(22):3861–73.

- Borrego, C., J. Ginja, M. Coutinho, C. Ribeiro, K. Karatzas, Th Sioumis, N. Katsifarakis, K. Konstantinidis, S. De Vito, E. Esposito, M. Salvato, P. Smith, N. André, P. Gérard, L. A. Francis, N. Castell, P. Schneider, M. Viana, M. C. Minguillón, W. Reimringer, R. P. Otjes, O. von Sicard, R. Pohle, B. Elen, D. Suriano, V. Pfister, M. Prato, S. Dipinto, y M. Penza. 2018. “Assessment of air quality microsensors versus reference methods: The EuNetAir Joint Exercise – Part II”. *Atmospheric Environment* 193:127–42.
- Camargo, Yiniva, Tomás Bolaño, y Antonio Álvarez. 2010. “Emisiones de Compuestos Orgánicos Volátiles de origen biogénico y su contribución a la dinámica atmosférica”. *Revista Intropica* 5:77–86.
- Canese, Marta, Fernando González, Néstor Sagui, Cecilia Vuyk, Gabriel Villalba, Perla Godoy, Nery Velazquez, Gustavo Ibarra, Diego Laterra, Roque Pignata, y Javier Allende. 2019. “Urbanización popular en el área Metropolitana de Asunción: Resistencia y perspectivas de cambio”. 126.
- Cano, Yulixis, José Morales, Ligbel Sánchez, Marinela Colina, y Julio Torres. 2016. “Evaluación de los niveles de ozono en la ciudad de Maracaibo, Estado Zulia, Venezuela”. *Revista Internacional de Contaminacion Ambiental* 32(1):25–34.
- Centro Mario Molina Chile. 2011. “Plan de acción para combustibles y vehículos más limpios en Paraguay”. 67.
- Centro Mario Molina Chile. 2014. “Diagnóstico de contaminación atmosférica en Asunción y recomendaciones para la gestión de calidad de aire”. 1–50.
- Chen, Pengfei, Jiannong Quan, Qiang Zhang, Xuexi Tie, Yang Gao, Xia Li, y Mengyu Huang. 2013. “Measurements of vertical and horizontal distributions of ozone over Beijing from 2007 to 2010”. *Atmospheric Environment* 74:37–44.

- Chen, Xin, Dylan B. Millet, Hanwant B. Singh, Armin Wisthaler, Eric C. Apel, Elliot L. Atlas, Donald R. Blake, Ilann Bourgeois, Steven S. Brown, John D. Crouse, Joost A. de Gouw, Frank M. Flocke, Alan Fried, Brian G. Heikes, Rebecca S. Hornbrook, Tomas Mikoviny, Kyung-Eun Min, Markus Müller, J. Andrew Neuman, Daniel W. O'Sullivan, Jeff Peischl, Gabriele G. Pfister, Dirk Richter, James M. Roberts, Thomas B. Ryerson, Stephen R. Shertz, Chelsea R. Thompson, Victoria Treadaway, Patrick R. Veres, James Walega, Carsten Warneke, Rebecca A. Washenfelder, Petter Weibring, y Bin Yuan. 2019. "On the sources and sinks of atmospheric VOCs: an integrated analysis of recent aircraft campaigns over North America". *Atmospheric Chemistry and Physics* 19(14):9097–9123.
- Cheng, Kaiyu, y Ni Bin Chang. 2009. "Assessment of the impact of biogenic VOC emissions in a high ozone episode via integrated remote sensing and the CMAQ model". *Frontiers of Earth Science in China* 3(2):182–97.
- Cheung, Vincent T. F., y T. Wang. 2001. "Observational study of ozone pollution at a rural site in the Yangtze Delta of China". *Atmospheric Environment* 35(29):4947–58.
- Chudzyński, S., A. Czyzewski, K. Ernst, A. Pietruczuk, W. Skubiszak, T. Stacewicz, K. Stelmaszczyk, A. Szymański, I. Sówka, A. Zwoździak, y J. Zwoździak. 2001. "Observation of ozone concentration during the solar eclipse". *Atmospheric Research* 57(1):43–49.
- Cleveland, W. S., T. E. Graedel, B. Kleiner, y J. L. Warner. 1974. "Sunday and workday variations in photochemical air pollutants in New Jersey and New York". *Science* 186(4168):1037–38.
- CONACYT. 2020. "Invesigadores miden Material Particulado en el aire de Asunción". Recuperado el 28 de octubre de 2021 (<https://www.conacyt.gov.py/investigadores-miden-niveles-material-particulado-aire-asuncion>).

- CONADERNA. 2021. “CONADERNA y FACEN MONITOREAN CALIDAD DEL AIRE EN SAN LORENZO”. Recuperado el 28 de octubre de 2021 (<http://www.conaderna.gov.py/noticias/conaderna-y-facen-monitorean-calidad-del-aire-en-san-lorenzo-1497>).
- Criollo, Carla, Rodrigo Assar, Dante Cáceres, y Margarita Préndez. 2016. “Arbolado urbano , calidad del aire y afecciones respiratorias en seis comunas de la provincia de Santiago, Chile”. *Revista chilena de enfermedades respiratorias* 32:77–86.
- Cuesta, Andrea, Carlos González, Mauricio Velasco, y Beatriz Aristizábal. 2018. “Distribución Espacial De Concentraciones De SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub> Y O<sub>3</sub> En El Aire Ambiente De Manizales”. *Revista Internacional de Contaminacion Ambiental* 34(3):489–504.
- Dantas, Guilherme, Bruno Siciliano, Bruno França, Cleyton Da Silva, y Graciela Arbilla. 2020. “The impact of COVID-19 partial lockdown on the air quality of the city of Rio de Janeiro, Brazil”. *Science of the Total Environment* 729:10.
- DINAC. 2020. “Anuario Climatológico”. 82.
- Dirección Nacional de Transporte. 2021. “Anuario estadístico de transporte 2019”. 1–165.
- DRA, Dirección del Registro de Automotores. 2021. “Datos estadísticos hasta el mes de julio”. 2. Recuperado el 26 de octubre de 2021 (<https://www.pj.gov.py/notas/20621-registro-de-automotores-lleva-matriculado-2624867-vehiculos>).
- EPA. 2000. “El Ozono y Su Salud”.
- EPA. 2016. “Guía de la Calidad del Aire sobre el ozono”. 2.
- EPA. 2021a. “Efectos del ozono sobre la salud”. *Agency United States Environmental Protection* 1. Recuperado (<https://www.epa.gov/ground-level-ozone-pollution/health-effects-ozone-pollution>).



- EPA. 2021b. “Efectos nocivos del ozono”. *Unites States Environmental Protection Agency*. Recuperado (<https://www.epa.gov/ground-level-ozone-pollution/ground-level-ozone-basics#effects>).
- Feng, Zhaozhong, Enzhu Hu, Xiaoke Wang, Lijun Jiang, y Xuejun Liu. 2015. “Ground-level O<sub>3</sub> pollution and its impacts on food crops in China: A review”. *Environmental Pollution* 199:42–48.
- Follos Pliego, Fernando. 2012. *MANUAL BÁSICO para el tratamiento de datos de CALIDAD DEL AIRE mediante el lenguaje estadístico R y paquetes adicionales como OPENAIR*.
- Fowler, D., M. Amann, R. Anderson, M. Ashmore, P. Cox, M. Depledge, D. Derwent, P. Grennfelt, N. Hewitt, Oystein Hov, M. Jenkin, F. Kelly, P. Liss, M. Pilling, J. Pyle, J. Slingo, y D. Stevenson. 2008. “Ground-level ozone in the 21st century: future trends, impacts and policy implications”. *October* 134.
- Galeano Monti, José. 2017. “Territorios de exclusión social”. *Paper Knowledge . Toward a Media History of Documents* 262.
- Gaona, Elizabeth. 2017. “Contaminación atmosférica: cinética y mecanismos de la fotodegradación de compuestos orgánicos biogénicos”. Universidad Nacional de Córdoba.
- Glasius, Marianne, y Allen H. Goldstein. 2016. “Recent Discoveries and Future Challenges in Atmospheric Organic Chemistry”. *Environ. Sci. Technol* 50:20.
- Grassi, Benjamín. 2020. “Estado del clima, Paraguay 2019”. 97.
- Guenther, A. B., X. Jiang, C. L. Heald, T. Sakulyanontvittaya, T. Duhl, L. K. Emmons, y X. Wang. 2012. “The Model of Emissions of Gases and Aerosols from Nature version 2.1 (MEGAN2.1): an extended and updated framework for modeling biogenic emissions”. *Geoscientific Model Development* 5(6):1471–92.

- Hui, Lirong, Xingang Liu, Qinwen Tan, Miao Feng, Junling An, Yu Qu, Yuanhang Zhang, y Meiqing Jiang. 2018. “Characteristics, source apportionment and contribution of VOCs to ozone formation in Wuhan, Central China”. *Atmospheric Environment* 192:55–71.
- Li, Kangwei, Linghong Chen, Fang Ying, Stephen J. White, Carey Jang, Xuecheng Wu, Xiang Gao, Shengmao Hong, Jiandong Shen, Merched Azzi, y Kefa Cen. 2017. “Meteorological and chemical impacts on ozone formation: A case study in Hangzhou, China”. *Atmospheric Research* 196:40–52.
- MADES. 2021a. “ANÁLISIS DE RESULTADOS DE LA ESTACIÓN DE MONITOREO DE CALIDAD DE AIRE CORRESPONDIENTE AL MES DE JUNIO 2021”.
- MADES. 2021b. “ANÁLISIS DE RESULTADOS DE LA ESTACIÓN DE MONITOREO DE CALIDAD DE AIRE CORRESPONDIENTE AL MES DE MAYO 2021”.
- MADES. 2021c. “MADES inauguró primera estación de monitoreo de calidad del aire del Paraguay”. Recuperado el 28 de octubre de 2021 (<http://www.mades.gov.py/2021/03/03/mades-inauguro-primera-estacion-de-monitoreo-de-calidad-del-aire-del-paraguay/>).
- Mendoza, Alberto, Marco León, y P. Caballero. 2010. “Emisiones de compuestos orgánicos volátiles durante arranques en frío de automóviles ligeros”. *Ingeniería, Investigación y Tecnología* 11(3):333–47.
- Metcalf, Sarah, y Dick Derwent. 2005. *Atmospheric Pollution and Environmental Change*. First publ. editado por H. Arnold. Great Britain.
- O’Ryan, Raúl, y Luis Larraguibel. 2000. *Contaminación del aire en Santiago: estado actual y soluciones*. Vol. 4. Perspectivas en Política, Economía y Gestión.

- OMS. 2006. “Guías de Calidad del Aire de la OMS relativas al material particulado, el ozono, el dióxido de nitrógeno y el dióxido de azufre”. *Guías de calidad del aire de la OMS relativas al material particulado, el ozono, el dióxido de nitrógeno y el dióxido de azufre* 1–21.
- OMS. 2021. “WHO Global Air Quality Guidelines”. 285.
- ONU. 2018. “Agenda 2030 y los Objetivos de Desarrollo Sostenible Una oportunidad para América Latina y el Caribe”. *Publicación de las Naciones Unidas* 89.
- OPS. 2021. “OMS estima que 7 millones de muertes ocurren cada año debido a la contaminación atmosférica”. *Organización Panamericana de la Salud*. Recuperado el 28 de octubre de 2021 ([www3.paho.org/hq/index.php?option=com\\_content&view=article&id=9406:2014-7-million-deaths-annually-linked-air-pollution&Itemid=135&lang=es](http://www3.paho.org/hq/index.php?option=com_content&view=article&id=9406:2014-7-million-deaths-annually-linked-air-pollution&Itemid=135&lang=es)).
- Peñuelas, J., D. Asensio, D. Tholl, K. Wenke, M. Rosenkranz, B. Piechulla, y J. P. Schnitzler. 2014. “Biogenic volatile emissions from the soil”. *Plant, Cell and Environment* 37(8):1866–91.
- Peralta, Oscar, Abraham Ortínez, Ricardo Torres-, Manuel Suárez, Telma Castro, y Luis Ruíz. 2021. “Ozone over Mexico City during the COVID-19 pandemic”. *Science of the Total Environment* 761.
- Rave, Claudia, Luis Builes, Julián Ossa, y Ricardo Smith. 2008. “IDENTIFICACIÓN DE ZONAS CRÍTICAS POR CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA EN EL ÁREA METROPOLITANA DEL VALLE DE ABURRÁ, para el apoyo en la toma de decisiones de ordenamiento ambiental y territorial”. *Gestión y Ambiente* 11(1):54–66.
- Recalde, Carolina, Luis Bernal, Fátima Colmán, y Ángel Rincón. 2021. “Determinación y análisis de las concentraciones de material particulado medido por una red de monitoreo continuo para la Ciudad de Asunción”.
- Reeve, Roger N. 2002. *Introduction to Environmental Education*. John Wiley & Sons.

- Riera, María, Carmen Íñiguez, Ferran Ballester, y Juan Bellido. 2017. “Exposición Al Humo De Incendios Forestales Y Mortalidad En Valencia”. Universitat Jaume I.
- Schwela, Dietrich, y Adriaan Van der Wiele. 2011. “Gestión de Calidad del aire”. 1–65.
- Seinfeld, John H., y Spyros N. Pandis. 1997. *Atmospheric chemistry and physics*.
- Skowera, Barbara, Zbigniew Zuśka, y Alicja Baranowska. 2020. “Temporal variability of tropospheric ozone pollution in the agricultural region of central-eastern Poland”. *Sustainability (Switzerland)* 12(18).
- Vallero, Daniel. 2014. *Fundamentals of Air Pollution*. 5a ed.
- Velázquez, Federico. 1997. “Modelización y análisis de las concentraciones de ozono troposférico”. Universidad Complutense de Madrid.
- De Visscher, Alex. 2014. *Air Dispersion Modeling Foundations and Applications*. New Jersey: John Wiley & Sons.
- Wang, Tao, Likun Xue, Peter Brimblecombe, Yun Fat Lam, Li Li, y Li Zhang. 2017. “Ozone pollution in China: A review of concentrations, meteorological influences, chemical precursors, and effects”. *Science of the Total Environment* 575:1582–96.
- Wang, Zhanshan, Yunting Li, Tian Chen, Dawei Zhang, Feng Sun, Qiang Wei, Xin Dong, Ruiwen Sun, Ning Huan, y Libo Pan. 2015. “Ground-level ozone in urban Beijing over a 1-year period: Temporal variations and relationship to atmospheric oxidation”. *Atmospheric Research* 164–165:110–17.
- Williams, David. 1999. “Semiconducting oxides as gas-sensitive resistors”. *Sensors and Actuators, B: Chemical* 57(1–3):1–16.
- Williams, David. 2019a. *Electrochemical Engineering: The Path from discovery to Product*. First Edit. editado por R. Alkire, P. Bartlett, y M. Koper. Weinheim, Germany: Wiley-VCH.

- Williams, David. 2019b. “Low Cost Sensor Networks: How Do We Know the Data Are Reliable?” *ACS Sensors* 4(10):2558–65.
- Xie, Min, Kuanguang Zhu, Tijian Wang, Pulong Chen, Yong Han, Shu Li, Bingliang Zhuang, y Lei Shu. 2016. “Temporal characterization and regional contribution to O<sub>3</sub> and NO<sub>x</sub> at an urban and a suburban site in Nanjing, China”. *Science of the Total Environment* 551–552:533–45.
- Xie, Min, Kuanguang Zhu, Tijian Wang, Haoming Yang, Bingliang Zhuang, Shu Li, Minggao Li, Xinsheng Zhu, y Yan Ouyang. 2014. “Application of photochemical indicators to evaluate ozone nonlinear chemistry and pollution control countermeasure in China”. *Atmospheric Environment* 99:466–73.
- Zavala, Miguel, William H. Brune, Erik Velasco, Armando Retama, Luis Adrian Cruz-Alavez, y Luisa T. Molina. 2020. “Changes in ozone production and VOC reactivity in the atmosphere of the Mexico City Metropolitan Area”. *Atmospheric Environment* 238(June):1–17.
- Zhongchao, Tan. 2014. *Air Pollution and Greenhouse Gases From Basic Concepts to Engineering Applications for Air Emission control*. Waterloo: Springer.
- PARAGUAY. Ley 1590/00. (2000). Que regula el sistema Nacional de transporte y crea la Dirección Nacional de transporte (DINATRAN) y la Secretaría metropolitana de transporte (SMT). Gaceta Oficial
- PARAGUAY. Ley 3850/09. (2009). Crea el sistema nacional de inspección técnica vehicular y establece la obligatoriedad de la realización de la inspección técnica como requisito previo para la obtención o renovación de la patente municipal de rodados en todo el territorio nacional. Gaceta Oficial
- PARAGUAY. Ley 5211/14. (2014). De Calidad del aire. Gaceta Oficial
- PARAGUAY. Resolución N°222/15. (2015). Por la cual se amplía el listado de sustancias contaminantes controladas, prohibidas y sus sustitutos, incluyendo al ozono troposférico. Secretaría del Ambiente (SEAM).

PARAGUAY. Resolución N°259/15. (2015). Por la cual se establece parámetros permisibles de calidad del aire. Secretaría del Ambiente (SEAM).

PARAGUAY. Resolución N°488/17. (2017). Por la cual se establecen requisitos para considerar como oficiales los datos obtenidos en mediciones o monitoreo de calidad del aire por Instituciones diferentes a la Secretaría del Ambiente (SEAM).

PARAGUAY. Resolución N°78/18. (2018). Por la cual se fijan los valores límites de emisión de los contaminantes del aire provenientes de fuentes móviles; se deja sin efecto la resolución 520 B/08 “por la cual se establecen controles y multas por la emisión de contaminantes atmosféricos, a medios de transporte que utilicen todo tipo de combustibles y se deja sin efecto la Resolución N°001/07 y demás relacionadas, donde se establecen parámetros y multas por emisión de poluyentes vehiculares. Secretaría del Ambiente (SEAM).

PARAGUAY. Decreto N° 5025/2021. Por el cual se establecen nuevas medidas específicas en el marco del plan de levantamiento gradual del aislamiento preventivo general en el territorio nacional por la pandemia del corona virus (covid-19), a partir del 18 de marzo de 2021 hasta el 28 de marzo de 2021, y se deja sin efecto el decreto N° 4990/2021

PARAGUAY. Decreto N° 5053/2021. Por el cual se establecen nuevas medidas específicas en el marco del plan de levantamiento gradual del aislamiento preventivo general en el territorio nacional por la pandemia del corona virus (covid-19), a partir del 27 de marzo del 2021 hasta el 4 de abril de 2021.

PARAGUAY. Decreto N° 5071/2021. Por el cual se establecen medidas específicas en el marco del plan de levantamiento gradual del aislamiento preventivo general en el territorio nacional por la pandemia del coronavirus (covid-19), a partir del 5 de abril de 2021 hasta el 12 de abril de 2021.

PARAGUAY. Decreto N° 5100/2021. Por el cual se extiende el periodo establecido en el artículo 1° del Decreto N° 5071/2021, hasta el 19 de abril de 2021 y se mantienen vigentes las medidas específicas dispuestas en el marco del plan de levantamiento gradual del aislamiento preventivo general en el territorio nacional por la pandemia del coronavirus (covid-19).

PARAGUAY. Decreto N° 5118/2021. Por el cual se extiende el periodo establecido en el artículo 1° del Decreto N° 5100/2021, hasta el 26 de abril de 2021 y se mantienen vigentes las medidas específicas dispuestas en el marco del plan de levantamiento gradual del aislamiento preventivo general en el territorio nacional por la pandemia del coronavirus (covid-19).

PARAGUAY. Decreto N° 5160/2021. Por el cual se establecen medidas específicas en el marco del plan de levantamiento gradual del aislamiento preventivo general en el territorio nacional por la pandemia del coronavirus (covid-19), a partir del 27 de abril de 2021 hasta el 10 de mayo de 2021.


PARAGUAY. Decreto N° 5161/2021. Por el cual se establecen medidas específicas en el marco del plan de levantamiento gradual del aislamiento preventivo general en el territorio nacional por la pandemia del coronavirus (covid-19), a partir del 11 de mayo de 2021 hasta el 24 de mayo de 2021

PARAGUAY. Decreto N° 5322/2021. Por el cual se extiende el periodo establecido en el artículo 1° del Decreto N° 5161/2021, hasta el 7 de junio de 2021, y se mantienen vigentes las medidas específicas dispuestas en el marco del plan de levantamiento gradual del aislamiento preventivo general en el territorio nacional por la pandemia del coronavirus (covid-19).

PARAGUAY. Decreto N° 5410/2021. Por el cual se extiende el periodo establecido en el artículo 1° del Decreto N° 5161/2021, hasta el 21 de junio de 2021, y se mantienen vigentes las medidas específicas dispuestas en el marco del plan de levantamiento gradual del aislamiento preventivo general en el territorio nacional por la pandemia del coronavirus (covid-19).

## 10.ANEXO

### 10.1. Anexo

 <b>Aeroqual Limited</b> 460 Rosebank Road, Avondale, Auckland, New Zealand Phone: +64-9-623 3013 Fax: +64-9-623 3012 www.aeroqual.com				
<b>Calibration Certificate No. 43828</b>				
<b>Calibration Date: 30 Jun 2020 13:36</b>				
<b>Model:</b> <input type="text" value="Ozone Ultra Low 0-0.15 ppm"/>				
<b>Serial No: OZUL1912104-097</b>				
<b>Environmental Conditions</b>				
Temperature	<input type="text" value="29.9"/>	°C		
Relative Humidity	<input type="text" value="29.1"/>	%		
<b>Measurements</b>				
Calibration Standard /ppm	0.005	0.063	0.115	0.000
AQL Sensor (Mean) /ppm	0.005	0.065	0.114	0.000
AQL Sensor (Std. Dev) /ppm	0.000	0.001	0.001	0.000
*The Mean and Standard Deviation are calculated from three consecutive readings.				
<b>Calibration Standard</b>				
The Aeroqual ozone sensors are calibrated in a controlled environment against a NATA certified ozone UV photometer whose traceability is maintained with international standards organisations. *NATA is Australia's national body for accreditation of producers of certified reference materials.				
<b>QC Approval: Takao Yamasaki</b>				
<b>Date: 30 Jun 2020</b>				



## 10.2.Anexo

aeroqual<sup>90</sup>SECTORES ▾ PRODUCTOS ▾ APOYO ▾ SOBRE ▾ BLOG CONTACTENOS 

## Sensor de ozono 0-0,15 ppm



CABEZAL DEL SENSOR DE OZONO 0-0,15 PPM

[SOLICITAR PRESUPUESTO "](#)

Código del sensor	OZU / OZU2
Distancia	0-0,15 ppm
Tipo de sensor	GSS
Límite mínimo de detección	0,001 ppm
Precisión de la calibración de fábrica	≤± 0,005 ppm
Resolución	0,001 ppm
Tiempo de respuesta	60 segundos
Temperatura	0 hasta 40 ° C
Humedad relativa	10 a 90%

## 10.3.Anexo



UNIVERSIDAD NACIONAL DE ASUNCIÓN  
FACULTAD DE CIENCIAS QUÍMICAS  
COMITÉ DE ÉTICA EN LA INVESTIGACIÓN

### Informe de evaluación de protocolo de investigación

**Título de la investigación:** DETERMINACIÓN Y ANÁLISIS DE LA FORMACIÓN FOTOQUÍMICA DE OZONO TROPOSFÉRICO EN UN ÁREA DE ELEVADA AFLUENCIA VEHICULAR.

	Trabajo de grado
	Proyecto de investigación
X	Trabajo de <i>Postgrado</i>

**Investigador responsable:** Lic. Mirla catalina Conteiro Ruiz Díaz.

**Tutor:** Prof. Dr. Angel Rincón

**Fecha:** 4 de junio 2021

**Código:** CEI 732/2021

**Declaración de la decisión tomada:**

X	No requiere evaluación
	Protocolo Aprobado
	Protocolo Rechazado (Propuesta de investigación éticamente inaceptable)
	Solicitud de enmienda (no se aprueba hasta una modificación del protocolo o el CI)
	Protocolo Aprobado con Recomendación
	Aprobación con condicionamiento (documentación requerida)

**Observaciones del CEI:** Ninguna.

**En el caso de una decisión positiva el investigador deberá:**

Notificar al CEI sobre enmiendas al protocolo, al material de reclutamiento, a la información para los potenciales participantes en la investigación o al formato de CI. Reportar eventos adversos inesperados relacionados con la conducción del estudio Informar al CEI la terminación del estudio si esta fuera anticipada y las razones por las que se lo hizo y toda circunstancia no esperada o decisiones significativas.

**Prof. Dra. Laura Mereles**  
Presidente / Evaluador