



UNIVERSIDAD DE CHILE – FACULTAD DE CIENCIAS – ESCUELA DE CIENCIAS

AMBIENTALES Y BIOTECNOLOGÍA

“EFECTO DE LAS MEDIDAS DE RESTRICCIÓN RELACIONADAS
CON EL COVID-19, SOBRE LA CALIDAD DEL AIRE AMBIENTAL
EN LA CIUDAD DE SANTIAGO DE CHILE”

Seminario de Título entregado a la Universidad de Chile en cumplimiento parcial de los requisitos para optar al Título de:

Químico Ambiental

ANDRÉS CAMIL BURGOS GONZÁLEZ

Director del Seminario de Título: Dr. Manuel A. Leiva Guzmán

Co - Director: Dr. Richard E. Toro Araya

DICIEMBRE 2022

Santiago – Chile



INFORME DE APROBACIÓN SEMINARIO DE TÍTULO

Se informa a la Escuela de Ciencias Ambientales y Biotecnología de la Facultad de Ciencias, de la Universidad de Chile que el Seminario de Título, presentado por el Sr. Andrés Camil Burgos González.

“EFECTO DE LAS MEDIDAS DE RESTRICCIÓN RELACIONADAS
CON EL COVID-19, SOBRE LA CALIDAD DEL AIRE AMBIENTAL
EN LA CIUDAD DE SANTIAGO DE CHILE”

Ha sido aprobado por la Comisión de Evaluación, en cumplimiento parcial de los requisitos para optar al Título de Químico Ambiental.

Director Seminario de Título: Dr. Manuel A. Leiva Guzmán

Co – Director Seminario de Titulo: Dr. Richard Toro Araya

Comisión Revisora y Evaluadora:

Presidente Comisión: Dr. Carlos Manzano

Evaluador: Dr. Álvaro Aliaga

Santiago de Chile, Diciembre de 2022

BIOGRAFÍA



Andrés Burgos González nació el 22 de enero de 1999. Egresó de cuarto medio en el Liceo de Aplicación el año 2016, donde desarrollo su interés en la química y en las ciencias participando en distintas actividades extraescolares relacionadas a dicho campo. En este mismo espacio se presentó la preocupación por el medio ambiente. Buscando como seguir el ámbito de las ciencias ambientales y la química, ingresa a la carrera de Química Ambiental el año 2017, de la cual egresa el año 2021.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

BIOGRAFÍA	ii
ÍNDICE DE CONTENIDOS	iii
INDICE DE TABLA.....	v
INDICE DE FIGURAS.....	vi
LISTA DE ABREVIATURA	viii
RESUMEN.....	x
ABSTRACT	xii
INTRODUCCIÓN	1
OBJETIVOS	7
Objetivo general	7
Objetivos específicos	7
MATERIALES Y METODOS	8
Área de estudio.....	8
Uso de Software	9
Bases de datos	9
Estrategia gradual: Paso a Paso.....	12
Tratamiento de datos	14

Diferencias de concentraciones entre periodo histórico, 2020 y 2021.....	16
Periodos de encierro.....	17
RESULTADOS Y DISCUSIÓN	19
Diferencias de concentraciones de contaminantes en 2017-2019, 2020 y 2021.....	19
Caracterización de periodos en fases del plan Paso a Paso y variación de movilidad	26
Casos COVID-19, movilidad e indice de fase	26
Relación entre movilidad e indice de fase propuesto.....	28
Periodos pre encierro, encierro y post encierro.....	30
Comparar cambio de concentraciones a traves de los periodos de encierro y apertura.	37
Variabilidad mensual a traves de periodos pre encierro, encierro y post encierro.	37
Diferencias en la variación horaria	62
CONCLUSIONES	80
BIBLIOGRAFÍA	83
ANEXO.....	92

INDICE DE TABLA

Tabla 1: Promedio de concentraciones de contaminantes diferenciados por periodo histórico, 2020 y 2021, con sus respectivos cambios relativos entre periodos. *No existe diferencia significativa con $p < 0,05$. **No existe diferencia significativa con $p < 0,001$.	23
Tabla 2: Periodos de Pre-Encierro, Encierro y Post-Encierro según criterio de índice de fase (PIF) e índice de movilidad (PIM), con sus respectivas fechas (inicio y fin) y días ISO de dichas fechas. Se destaca la diferencia de días entre periodos.	36
Tabla 3: Cambio relativo de contaminantes y variables meteorológicas entre años históricos (Hist), 2020 y 2021 para el periodo pre encierro, con criterio de fase y movilidad. Cada cambio relativo es entre el o los años más antiguo respecto al más actual. *No existe diferencia significativa con $p < 0,05$. **No existe diferencia significativa con $p < 0,01$. *** No existe diferencia significativa con $p < 0,001$.	46
Tabla 4: Cambio relativo de contaminantes y variables meteorológicas entre años históricos (Hist), 2020 y 2021 para el periodo encierro, con criterio de fase y movilidad. Cada cambio relativo es entre el o los años más antiguo respecto al más actual. *No existe diferencia significativa con $p < 0,05$. **No existe diferencia significativa con $p < 0,01$. *** No existe diferencia significativa con $p < 0,001$.	54
Tabla 5: Cambio relativo de contaminantes y variables meteorológicas entre años históricos (Hist), 2020 y 2021 para el periodo post encierro, con criterio de fase y movilidad. Cada cambio relativo es entre el o los años más antiguo respecto al más actual. *No existe diferencia significativa con $p < 0,05$. **No existe diferencia significativa con $p < 0,01$. *** No existe diferencia significativa con $p < 0,001$.	60

INDICE DE FIGURAS

Figura 1: Grafico de variación de horaria de concentraciones de MP ₁₀ , MP _{2,5} , NO, NO ₂ , CO y O ₃ entre los años 2017 al 2021.	20
Figura 2: Concentraciones horarias para MP ₁₀ , MP _{2,5} , CO, NO, NO ₂ y O ₃ , para periodo histórico (rojo), 2020 (verde) y 2021 (azul).....	26
Figura 3: Grafico semanal de casos actuales de COVID-19, indice de movilidad e indice de fase en la AMS desde el 13 de abril del 2020 hasta el 31 de enero de 2021.....	28
Figura 4: Grafico de correlación de Spearman del indice de fase con el indice de movilidad con datos desde el 28-07-2020 al 31-12-2021.	30
Figura 5: Grafico de indice de fase (azul) e indice de movilidad normalizado (anaranjado) a traves del tiempo, con límite de 0,7 para indice de fase y límite en -0,5 para indice de movilidad.	32
Figura 6: Calendario 2020 y 2021 con caracterización de encierro (verde) y apertura (azul) a traves de indice de fase.....	33
Figura 7: Calendario 2020 y 2021 con caracterización de encierro (verde) y apertura (azul) a traves de indice de movilidad.....	34
Figura 8: Variación de promedio mensual de concentraciones de contaminantes por periodo pre encierro, encierro y post encierro con criterio de fase del año 2020, con intervalo de confianza del 95%.....	38

Figura 9: Variación de promedio mensual de concentraciones de contaminantes por periodo pre encierro, encierro y post encierro con criterio de fase del año 2021.	39
Figura 10: Variación de promedio mensual de concentraciones de contaminantes por periodo pre encierro, encierro y post encierro con criterio de movilidad del año 2020.	40
Figura 11: Variación de promedio mensual de concentraciones de contaminantes por periodo pre encierro, encierro y post encierro con criterio de movilidad del año 2021.	41
Figura 12: Variación horaria de contaminantes para el periodo de pre encierro bajo criterio de fase 2020, criterio de fase 2021, criterio de movilidad 2020 y criterio de movilidad 2021.....	67
Figura 13: Variación horaria de contaminantes para el periodo de encierro bajo criterio de fase 2020, criterio de fase 2021, criterio de movilidad 2020 y criterio de movilidad 2021.....	72
Figura 14: Variación horaria de contaminantes para el periodo de post encierro bajo criterio de fase 2020, criterio de fase 2021, criterio de movilidad 2020 y criterio de movilidad 2021.	77

LISTA DE ABREVIATURA

OMS: Organización Mundial de la Salud.

MP_{2,5}: Material Particulado de diámetro aerodinámico menor o igual a 2,5 micrones.

MP₁₀: Material Particulado de diámetro aerodinámico menor o igual a 10 micrones.

NO: Monóxido de nitrógeno.

NO₂: Dióxido de nitrógeno.

NO_x: Óxidos de nitrógeno.

SO₂: Dióxido de azufre.

CO: Monóxido de carbono.

O₃: Ozono.

COV: Compuestos orgánicos volátiles.

CH₄: Metano.

OH: Radical hidroxilo atmosférico.

AMS: Área Metropolitana de Santiago.

PPDA: Plan de Prevención y Descontaminación Atmosférica.

MMA: Ministerio del Medio Ambiente

ISCI: Instituto Sistemas Complejos de Ingeniería.

SINCA: Sistema Nacional de Información de la Calidad de Aire.

HR: Humedad relativa.

T: Temperatura.

WS: Velocidad de viento.

PIM: Periodo con criterio de índice de movilidad.

PIF: Periodo con criterio de índice de fase.

CF2020: Periodo de pre encierro, encierro y post encierro basado en criterio de indice de fase en 2020.

CF2021: Periodo de pre encierro, encierro y post encierro basado en criterio de indice de fase en 2021.

CM2020: Periodo de pre encierro, encierro y post encierro basado en criterio de movilidad en 2020.

CM2021: Periodo de pre encierro, encierro y post encierro basado en criterio de movilidad en 2021.

RESUMEN

En el año 2019 brota un nuevo virus llamado SARS-COV-2, el cual generó un estado de pandemia en todo el mundo, provocando que los gobiernos de distintos países tomaran medidas de restricción de movilidad y otras prevenciones para evitar la dispersión del virus. A pesar de las pérdidas que ha dejado el COVID-19, las restricciones dan una oportunidad para evaluar la contaminación debido a la reducción de la movilidad. Investigadores alrededor del mundo han encontrado diversos resultados, donde principalmente se destaca una reducción en la concentración de contaminantes en el aire. Al llegar el SARS-COV-2 a Chile, se aplica una estrategia gradual para poder enfrentar la dispersión del virus, llamada Plan Paso a Paso, que establece cinco fases o pasos, de los cuales van desde la cuarentena (fase 1) hasta un desconfinamiento total (fase 5). Este trabajo tiene como objetivo evaluar la afección del Plan Paso a Paso y la movilidad en la calidad de aire en dos años de pandemia en el Área Metropolitana de Santiago (AMS): 2020 y 2021, comparándolos con un periodo histórico (2017 a 2019). Para cumplir dicho objetivo se extrajo los datos de concentración horaria para los contaminantes de material particulado grueso y fino, monóxido de carbono, óxidos de nitrógeno y ozono a través de ocho estaciones de la red Sistema Nacional de Calidad de Aire en la AMS. La movilidad fue entregada a través de un índice de movilidad por la plataforma CovidAnalytics del Instituto Sistemas Complejos de Ingeniería, y cada dato del Plan Paso a Paso de la Base de Datos COVID facilitada por el gobierno. Los análisis se hicieron a través del software de lenguaje de programación R, utilizando paquetes estadísticos y openair.

Al evaluar de forma general el periodo histórico y los años de pandemia, se obtiene una disminución para todos los contaminantes en el año 2020 exceptuando el ozono, el cual aumenta su concentración. Al comparar el periodo histórico con el 2021, se obtienen resultados semejantes, solo que en este caso existe un aumento en las concentraciones de monóxido de carbono. A través de la observación de las distintas fases y el cambio de la movilidad a través de la pandemia se logran establecer 4 criterios para la evaluar el cambio de concentración de los contaminantes, los cuales son: índice de fase 2020, índice de movilidad 2020, índice de fase 2021 e índice de movilidad 2021. Con esto se podrá evaluar cómo afecta la movilidad y la estrategia gradual en cada año a la concentración de contaminantes. Los resultados indican que el índice de fase y la movilidad afectan las concentraciones en los distintos periodos, ya que al comparar estos con distintos años, en donde no existió periodo de encierro, las concentraciones disminuyen de forma general. Esto indica que la movilidad y las restricciones tienen una afección en la concentración contaminantes atmosféricos.

ABSTRACT

In the year 2019 a novel virus called SARS-COV-2 breaks out, which generated a pandemic state worldwide, causing governments of different countries to take mobility restriction measures and other preventions to avoid the spread of the virus. Despite the losses caused by COVID-19, the restrictions provide an opportunity to assess contamination due to reduced mobility. Researchers around the world have found several results, most notably a reduction in the concentration of pollutants in the air. COVID-19 also reaches Chile, where the government takes the initiative in mobility restrictions, giving the possibility to evaluate how air quality varies due to these restrictions. In Chile, a gradual strategy is applied to deal with the spread of the virus, called the Plan Paso a Paso, which establishes five phases or steps, ranging from quarantine (phase 1) to total unlock down (phase 5). This work aims to evaluate the effect of the Plan Paso a Paso and mobility on air quality in two years of pandemic in the Metropolitan Area of Santiago (AMS): 2020 and 2021, comparing them with a historical period (2017 to 2019). To achieve this objective, hourly concentration data for coarse and fine particulate matter, carbon monoxide, nitrogen oxides and ozone pollutants were extracted from eight stations of the National Air Quality System network in the MSA. Mobility was delivered through a mobility index by the CovidAnalytics platform of the Instituto Sistemas Complejos de Ingeniería, and each Plan Paso a Paso data from the COVID database provided by the government. The analyses were done through R programming language software, using statistical packages and openair.

When evaluating in general the historical period and the pandemic years, a decrease is obtained for all pollutants in the year 2020 except for ozone, which increases its concentration. When comparing the historical period with 2021, similar results are obtained, only in this case there is an increase in carbon monoxide concentrations. Through the observation of the different phases and the change in mobility through the pandemic, four criteria can be established to evaluate the change in the concentration of pollutants, which are: phase index 2020, mobility index 2020, phase index 2021 and mobility index 2021. With this it will be possible to evaluate how the mobility and the gradual strategy in each year affects the concentration of pollutants. The results indicate that the phase index and mobility affect the concentrations in the different periods, since when comparing these with different years, where there was no enclosure period, the concentrations decrease in general. This indicates that mobility and restrictions have an effect on the concentration of atmospheric pollutants.

INTRODUCCIÓN

En diciembre de 2019 en la ciudad de China, Wuhan, se identifica un nuevo tipo de coronavirus, llamado SARS-COV-2. Este virus logró dispersarse fácilmente alrededor del mundo lo cual ha provocado una alerta en gran parte del mundo, generando que el 30 de enero de 2020, el Director General de la Organización Mundial de la Salud (OMS) declarara el brote como emergencia de salud pública de importancia internacional (Muhammad et al., 2020; Patel et al., 2020; Zhu et al., 2020). Esta alerta provocó que las autoridades de distintos países tomaran medidas de distanciamiento físico entre personas, llegando ordenar cuarentenas en masa, lo cual se refiere a la cuarentena impuesta a una población para así frenar el brote del COVID-19 (Patel et al., 2020).

Estas cuarentenas mencionadas han incidido a cambiar el estilo de vida, donde existe una movilidad reducida, es decir que el desplazamiento de personas ha disminuido como consecuencia de las políticas de encierro y el miedo a la enfermedad provocada por el COVID-19 (Cresswell, 2021; Kellerman, 2022; Parr et al., 2020). La reducción de movilidad conlleva a un menor volumen de tráfico vehicular, disminuyendo en 26,1% en Corea del Sur para el mes de febrero del año 2020 y un 47,5% en Florida, Estados Unidos, para el mes de marzo en el 2020, en ambos casos se comparó el mismo periodo mencionado con el año 2019 (Lee et al., 2020; Parr et al., 2020). La reducción de tráfico vehicular también conlleva a un menor consumo de combustible, así como la emisión de compuestos producto de la combustión de vehículos (Harantová et al., 2022).

Dadas las condiciones descritas por las medidas de encierro, no solo se han reducido las emisiones vehiculares, sino también en algunas partes del mundo se detuvo la industria, por lo que se da una oportunidad para estudiar como varía la calidad de aire en sitios urbanos a través de la pandemia (Dantas et al., 2020; Muhammad et al., 2020). En estudios en países de América, Europa y Asia se ha encontrado como resultado una reducción de concentración de contaminantes en el primer periodo de pandemia, es decir, entre enero y mayo del 2020, dependiendo del comienzo del brote del virus en cada país. En la mayoría de los casos se estudia el material particulado fino ($< 2,5 \mu\text{m}$ de diámetro aerodinámico, $\text{MP}_{2,5}$) y grueso ($> 2,5$ a $< 10 \mu\text{m}$ de diámetro aerodinámico, MP_{10}), monóxido de nitrógeno, dióxido de nitrógeno y la suma total de estos (NO , NO_2 y NO_x respectivamente), monóxido de carbono (CO), ozono (O_3) y dióxido de azufre (SO_2) (Filonchik et al., 2021; Mashayekhi et al., 2021; Silva et al., 2022; Toro A. et al., 2014). Luego de este primer periodo descrito, se ha encontrado que una baja en la movilidad a través del año 2020 y parte del 2021, ha reducido las concentraciones de distintos contaminantes (Hwang & Lee, 2022; Velayarce et al., 2022).

El primer caso de COVID-19 en Chile ocurre el 3 de marzo del 2020, por esto, se comienzan a tomar medidas de restricción de movilidad, aplicación del uso de mascarillas y encierros impuestos por la autoridad, siendo la primera cuarentena el 12 de marzo en la región de Aysén. Luego, con la dispersión del virus en el país, el 15 de marzo comienzan a cerrar las escuelas y universidades, seguidamente, el 26 de marzo en gran parte de la ciudad de Santiago se rigen cuarentenas en ciertas comunas. (Canals L, 2020; Ministerio de Ciencia, Tecnología, Conocimiento e Innovación, 2021). Culminando la primera etapa

de la pandemia en Chile, se anuncia una estrategia de desconfinamiento gradual llamada Plan Paso a Paso, el cual consiste en 5 fases, donde la fase 1 hace referencia a una cuarentena total y al ir aumentando de número la fase existirán menos restricciones de movilidad y actividades, siendo la fase 5 una apertura total, donde están permitidas la mayoría de las actividades. Este plan fue implementado el 27 de julio del 2020, desde entonces comienzan a haber distintas fases en las distintas comunas del país. Cabe destacar que las fases son impuestas por el Ministerio de Salud a través de sus criterios sanitarios (Ministerio de Ciencia, Tecnología, Conocimiento e Innovación, 2021; Ministerio de Salud, 2020).

El material particulado fino se define como aerosoles con un diámetro aerodinámico menor a $2,5 \mu\text{m}$ y tiene su formación en la atmósfera, catalogándose como aerosol secundario. Este se forma a partir de la coagulación de partículas en modo nucleación (partículas menores a 10 nm de diámetro aerodinámico) y de la condensación del vapor de agua (Pandis & Seinfeld, 2016). Por otra parte, el material particulado grueso, el cual se define como los aerosoles menores a $10 \mu\text{m}$ de diámetro aerodinámico, pueden ser tanto aerosoles primarios como secundarios. Los aerosoles primarios, al ser emitidos directamente, tienen diversas fuentes tanto naturales como antropogénicas. En las fuentes antropogénicas se encuentra la combustión incompleta la cual forma carbono negro, polvo industrial y aerosoles orgánicos. En el caso de las fuentes naturales existen los restos de biomasa, esporas, sales de mar y polvo volcánico y mineral. En el caso de los aerosoles secundarios, se pueden formar por sales de sulfato y nitrato que provienen de

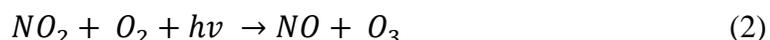
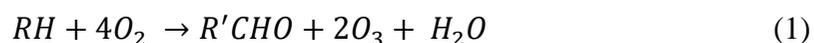
fuentes antropogénicas, y por compuestos orgánicos volátiles (COV) y sulfatos volcánicos que son emitidas por fuentes naturales (Pandis & Seinfeld, 2016).

Los óxidos de nitrógeno tienen tanto fuentes naturales como antropogénicas, siendo estas últimas las de mayor contribución. El monóxido de nitrógeno se forma en procesos de combustión en altas temperaturas, en donde el nitrógeno, ya sea de la atmósfera o del combustible, reacciona con el oxígeno atmosférico. El dióxido de nitrógeno se emite en menores cantidades de forma directa, y se forma por la oxidación del monóxido de nitrógeno en la atmósfera (Pandis & Seinfeld, 2016).

El monóxido de carbono tiene como fuente principal la oxidación del metano (CH_4) y otros hidrocarburos por el radical hidroxilo (OH). La segunda fuente más importante es la quema de biomasa y combustión de combustibles fósiles. A pesar de que la principal fuente es su formación en la atmósfera, se estima que dos tercios del CO provienen de fuentes antropogénicas, debido a que el la fuente con mayor contribución de metano es la agricultura y los residuos (Pandis & Seinfeld, 2016).

La formación de ozono tiene relación con la fotoquímica de los óxidos de nitrógenos y los COVs, la cual está dada por la reacción neta R1 (1), en donde RH es referente a un COV. Si bien esta reacción neta no muestra la participación de óxidos de nitrógenos, estos están presente en el mecanismo de formación del ozono, debido a que el ozono se produce principalmente por la reacción R2 (2). A través de este mecanismo se formulan dos escenarios de producción de ozono (PO_3), uno es el limitado por óxidos de nitrógeno y otro limitado por COVs (Jacob et al., 1999). El área metropolitana de Santiago está regida

por un ambiente limitado por COV, por lo que la producción de ozono está dada por ecuación (3) (Jacob et al., 1999; Seguel et al., 2020). Esta ecuación quiere decir que con una disminución de NO_2 existirá una mayor producción de ozono (Jacob et al., 1999).



$$P_{O_3} = \frac{2k_4 P_{HO_x} [RH]}{k_9 [NO_2] [M]} \quad (3)$$

Debido a que una de las principales fuentes de contaminantes son los automóviles, ¿Qué ocurriría si se da el caso en que la movilidad sea restringida? Con la llegada del COVID-19 a Chile se da una oportunidad en que se puede evaluar la contaminación atmosférica debido a las restricciones de movilidad anteriormente mencionadas. Por esto el año 2021, Toro A. et al. presentan un estudio donde evalúan como el encierro impuesto por el COVID-19 afecta a la calidad de aire en la AMS. Este estudio abarca solo el periodo entre marzo y mayo del 2020, donde estudian el comportamiento horario de CO, O_3 , NO_x , MP_{10} y $\text{MP}_{2.5}$ comparándolos por el mismo periodo (marzo a mayo) pero del 2017 al 2019, teniendo estos años como periodo histórico. Los resultados muestran que el MP_{10} bajó un 5,2%, el cual no demuestra ser significativo, mientras que el $\text{MP}_{2.5}$, CO, NO_x , NO y NO_2 presentan una reducción del 13%, 54%, 66% y 42% respectivamente, por otra parte, el O_3 muestra un aumento del 64%, lo cual se explica por el hecho de que el AMS es una zona limitada en COVs, que conlleva a una correlación inversa entre NO_x y O_3 (Toro A. et al., 2021).

Distintos estudios han demostrado que existe un impacto en la calidad de aire debido a las restricciones de movilidad y encierro dadas por el brote de COVID-19. Sin embargo, estos estudios evalúan solo periodos de encierro en el 2020, en donde, en su mayoría solo se destaca un periodo de encierro (Silva et al., 2022). No obstante, durante el periodo de la pandemia entre 2020 y 2021 en Chile, existieron distintos periodos donde se estableció cuarentena completa o parcial (Ministerio de Ciencia, Tecnología, Conocimiento e Innovación, 2021). Por lo anterior descrito, este estudio busca ver el impacto de estas restricciones a través de estos dos años, tanto el impacto en la movilidad y como esta se relaciona con calidad de aire en la AMS, además de identificar como el cambio de estilo de vida que ha provocado el brote de COVID-19 puede alterar los patrones horarios de contaminación ambiental.

OBJETIVOS

Objetivo general

- Analizar y estudiar el efecto de las restricciones asociadas al COVID-19, durante las fases de encierro y posterior apertura, en la calidad del aire ambiental en el área metropolitana de Santiago para los años 2020 y 2021.

Objetivos específicos

- Estimar la significancia de las diferencias entre las concentraciones de contaminantes en el período histórico (años 2017-2019) y años 2020 y 2021, respectivamente.
- Caracterizar distintos periodos de pre encierro, encierro y post encierro, a través de la observación de la variabilidad de las fases y movilidad durante los años 2020 y 2021. Esto también se relacionará con los casos actuales de COVID-19.
- Comparar el cambio de las concentraciones de contaminantes, de forma mensual, horaria y en promedio para periodos de pre encierro, encierro y post encierro para el año 2020, 2021 y periodo histórico.

MATERIALES Y METODOS

Área de estudio

En la Área Metropolitana de Santiago (AMS, 33,5 S, 70,6 W) contiene 34 comunas, las cuales contienen cerca de 7,1 millones de personas, es decir cerca del 40% de la población total del país según el censo del 2017, concentrando así una significativa porción de las actividades económicas (Instituto Nacional de Estadísticas, 2018)

El AMS se encuentra entre dos cordilleras, la cordillera de la Costa por el oeste (1500 metros de altitud) y la cordillera de los Andes por el este (4500 metros de altitud), que tienen incidencia en la dispersión vertical y horizontal de contaminantes, la cual varía de forma horaria y estacional. Junto a esto, en la ciudad se genera una capa de inversión térmica a 400 metros de altura en invierno y 1000 metros en verano, lo cual provoca una baja dispersión de contaminantes (Schmitz, 2005; Toro A. et al., 2014). Por esta razón se ha declarado como zona saturada de O₃, CO, MP_{2,5} y MP₁₀ y zona latente en NO_x, y por lo cual se ha implementado un Plan de Descontaminación Atmosférica (PPDA) (Ministerio del Medio Ambiente, 2012). Una zona saturada hace referencia a una zona donde se ha sobrepasado la norma de calidad de aire, mientras que la zona latente es donde la concentración un contaminante esta entre el 80% y 100% respecto su norma (MINSEGPRES, 2010) Existen normas de calidad de aire anual, de 24 horas, 8 horas y 1 hora. Para que la norma anual se considere sobrepasada el promedio trianual de concentraciones del contaminante a evaluar debe superar su norma limite (50 µg m⁻³N para MP₁₀, 20 µg m⁻³ para MP_{2,5} y 53 ppbv para NO₂) (MMA, 2022; Ministerio MINSEGPRES, 2011). Con la implementación de PPDA, el cual restringe uso de

vehículos y el funcionamiento de la industria según el estado de contaminación, se logró reducir a través de los años la concentración de NO_x , CO, $\text{MP}_{2,5}$ y MP_{10} , sin embargo, entre los años 2002 y 2012 todavía se sobrepasaba las concentraciones límites recomendadas por la OMS y definidas por el Ministerio del Medio Ambiente (MMA), estos resultados demuestran que una parte importante de las fuentes de emisiones de contaminantes son el transporte, lo cual coincide con el inventario de emisiones propuesto por el Departamento de Física de la Universidad de Santiago de Chile en el año 2014 (Toro A. et al., 2014; Troncoso et al., 2012; Universidad Santiago de Chile, 2014).

Uso de Software

Para el tratamiento de datos se utilizaron dos Software principales: Microsoft Excel 365 (Excel®, Microsoft Corporation®, 2020) y el lenguaje de programación R, un software gratuito (The R Foundation, 2018). En Microsoft Excel 365 se generó el primer set de datos agrupando los datos obtenidos en cada base de datos, mientras que en R se refino su tratamiento generando data frames finales para su análisis. El análisis atmosférico y la generación de gráficos se hizo con el paquete open air de R (Carslaw, 2019).

Bases de datos

En este trabajo se utilizó tres bases de datos distintas, una para la obtención de datos COVID-19 en Chile, la cual entrega la cantidad de casos y la fase del Plan Paso a Paso en que se encuentra cada comuna; otra base de datos que entrega el índice de movilidad de cada comuna; y de la última base de datos se obtiene las concentraciones horarias para los contaminantes estudiado.

La Base de Datos COVID-19 es desarrollada por el Ministerio de Ciencia, Tecnología, Conocimiento e Innovación del Gobierno de Chile en conjunto a la Mesa Social COVID19. El objetivo de esta base de datos es facilitar información para apoyar la investigación científica, clínica y epidemiológica del COVID-19 en Chile (Ministerio de Ciencia, Tecnología, Conocimiento e Innovación, 2021). Los datos son ingresados a través de archivos de Valores Separados por Coma (CSV) a la plataforma GitHub del Ministerio mencionado anteriormente. La información se separa principalmente por datos a nivel nacional, regional y comunal. Para este trabajo se utilizarán datos a nivel comunal, ya que el área estudiada equivale a 34 comunas de la Región Metropolitana y no la región completa. Para la cantidad de casos se utilizan los datos de la sección: “*Casos actuales por fecha de inicio de síntomas y comuna*” la cual indica la cantidad de casos confirmados actuales notificados en cada una de las comunas de Chile con una actualización de 2 a 3 días y comienzan a informarse desde el 14 de abril del 2020 (Ministerio de Ciencia, Tecnología, Conocimiento e Innovación, 2021). El otro uso de esta base de datos es para la obtención de cada etapa del Plan Paso a Paso, en donde se entrega en qué fase esta cada comuna de manera diaria. Aquí se presenta como Etapa 1: Cuarentena, Etapa 2: Transición, Etapa 3: Preparación, Etapa 4: Apertura inicial y Etapa 5: Apertura avanzada (Ministerio de Ciencia, Tecnología, Conocimiento e Innovación, 2021).

Los datos de movilidad se obtuvieron de la plataforma CovidAnalytics proporcionada por el Instituto Sistemas Complejos de Ingeniería (ISCI) (Instituto Sistemas Complejos de Ingeniería, 2021). Los datos de movilidad se presentan como un índice de movilidad que evalúa la evolución de movilidad de las personas a través del sistema de

telecomunicaciones determinando un flujo desde el hogar hacia otras zonas en horario laboral, dicho flujo puede ocurrir dentro de la misma comuna o hacia otras diferente al lugar de hogar. La zona de hogar se define, para este índice, como el lugar donde cada persona pernocta. Para el cálculo de dicho índice se utiliza como referencia las primeras dos semanas de marzo de 2020 (Instituto Sistemas Complejos de Ingeniería, 2021).

Finalmente, los datos de concentraciones horarias de contaminantes se obtienen a través de la red Sistema Información Nacional de Calidad del Aire (SINCA), la cual presenta distintos estaciones de monitoreo a través del territorio nacional (Ministerio del Medio Ambiente, 2021). En la AMS se encuentran 8 estaciones de monitoreo que miden los contaminantes estudiados en este trabajo, es decir: MP_{10} , $MP_{2,5}$, CO, NO, NO_2 , NO_x y O_3 , además de variables meteorológicas como la humedad relativa (HR), temperatura (T) y velocidad de viento (ws). Los puntos de monitoreo se identifican como Cerro Navia (CN), El Bosque (EB), Independencia (IN), La Florida (LF), Las Condes (LC), Puente Alto (PA), Pudahuel (PU) y Parque O'Higgins (SA por su ubicación en Santiago Centro). El monitoreo de cada contaminante es de manera horaria, mientras se ocupan los mismos métodos de análisis para cada estación, diferenciándose solo en el tipo de compuestos a analizar. Para el material particulado, se utiliza atenuación beta, para los óxidos de nitrógeno se utiliza quimioluminiscencia en fase gaseosa, para el monóxido de carbono y ozono se utiliza fotometría IR y UV respectivamente (Ministerio del Medio Ambiente, 2021). La técnica de atenuación beta consiste en transmitir radiación beta hacia un blanco y a un filtro expuesto a material particulado, siendo la diferencia de esta transmisión lo que representa la masa de material particulado acumulado en un filtro (Raja et al., 2017).

La quimioluminiscencia es hacer reaccionar los óxidos de nitrógenos para que estos puedan emitir luz la cual es medida, la intensidad de esta luz es la determinante en la concentración de los óxidos de nitrógenos (Skoog et al., 2008). La fotometría consiste en medir la absorbancia del gas a una determinada longitud de onda, siendo de 4,7 micrómetros para el CO y 256 nanómetros para el O₃ (Khan et al., 2019; Skoog et al., 2008). Para el desarrollo de este trabajo se extrajo la concentración de los contaminantes y los valores meteorológicos horarios desde el 1 de enero de 2017 al 31 de diciembre de 2021. Para una representación de toda la AMS en términos de concentraciones, se utilizó un promedio de todas las estaciones.

Finalmente, para poder hacer análisis de los distintos años, es decir del 2017 al 2021, se separan en tres periodos, periodo histórico: 2017 al 2019, año 2020 y año 2021. Esto es debido a que el periodo histórico se utiliza como línea base, así se podrá comparar los cambios en las concentraciones debido a las restricciones de movilidad (Toro A. et al., 2021).

Estrategia gradual: Paso a Paso

Para este trabajo se utiliza como un indicador de las medidas de encierro cada etapa del plan Paso a Paso, por esto, se procede a explicar en qué consiste dicho plan y que restricciones y libertades indican cada etapa.

Durante marzo del año 2020 se comienzan a tomar medidas de encierro como cuarentenas obligatorias en algunas comunas y en el resto cuarentenas preventiva, además de la aplicación de toque de queda durante las noches. No obstante, el 28 de julio se implementa

una estrategia gradual la cual busca generar un desconfinamiento de las medidas de encierro a través de criterios epidemiológicos donde se evalúa el soporte de la red asistencial de salud y la evolución de casos en cada comuna, con lo cual se asigna una de las 5 etapas del Plan Paso a Paso en cada comuna (Ministerio de Ciencia, Tecnología, Conocimiento e Innovación, 2021; Ministerio de Salud, 2020).

Cada etapa del Plan Paso a Paso tiene ciertas restricciones de movilidad y de actividades, en donde, al aumentar el número de etapa estas disminuyen, generando mayores libertades tanto en actividades como en movilidad. Cabe destacar que el 1 de octubre de 2021, se implementan cambios en el diseño de esta estrategia gradual, en donde se eliminan completamente las cuarentenas y el toque de queda nocturno y las etapas solo restringen aforo en actividades (ONAR & Ministerio Secretaría General de la Presidencia, 2021). Las cinco fases son Paso 1: Cuarentena, Paso 2: Transición, Paso 3: Preparación, Paso 4: Apertura inicial y Paso 5: Apertura Avanzada, aunque en el periodo estudiado no se registró el Paso 5 en alguna comuna del área de estudio (Ministerio de Ciencia, Tecnología, Conocimiento e Innovación, 2021; Ministerio de Salud, 2020). El Paso 1 consiste en cuarentena absoluta, siendo el estado más estricto de confinamiento restringiendo la movilidad de las personas, las cuales podrán realizar actividades con permisos individuales o colectivos; el Paso 2 libera de la cuarentena absoluta, teniendo solo cuarentena los fin de semanas y festivos; el Paso 3 es un estado en donde ya no existe cuarentena permitiendo reuniones sociales con un cierto aforo de personas; el Paso 4 aumenta el aforo de reuniones y permite la apertura de cines, restaurantes y semejantes

en donde se cumpla un protocolo COVID; y finalmente el Paso 5 consiste en aumentar el aforo de las actividades reabiertas en el Paso 4 (Ministerio de Salud, 2020).

Tratamiento de datos

Como se mencionó anteriormente, se utilizaron distintas bases de datos para la obtención de información, por esto, es necesario tratar dicha información para así realizar los distintos análisis que impliquen los objetivos de este trabajo.

En la base de datos COVID-19 se obtuvieron datos comunales, es decir, cada dato obtenido era un dato de la comuna. Estos son la etapa del Plan Paso a Paso y los casos actuales de COVID-19. Como los casos actuales de COVID-19 son un número total de casos de cada comuna, para poder aplicarla al área estudiada, es decir, el AMS, se sumó los casos actuales de cada comuna para cada fecha entregada en la base de datos, teniendo así una suma total de casos actuales de 34 comunas por fecha.

Las etapas del Plan Paso a Paso son asignadas para cada comuna, por lo que, cada comuna puede tener una fase del plan distinta, lo que conlleva a la siguiente pregunta: ¿Cómo se podría tomar un índice que reúna todas las comunas de la AMS? Para esto se propuso la ecuación (4), la cual entrega un Índice de fase para toda la AMS. Dicho índice de fase intenta representar el estado actual de las etapas de la pandemia en donde el valor máximo es 1, el cual representa que toda la AMS está en fase 1, mientras que el valor mínimo es 0,25 indicando que toda la AMS está en fase 4. Como las fases del Plan Paso a Paso comienzan a regir desde el 28 de julio de 2020, previo a esto se considera que no existe índice de fase, sin embargo entre el 15 de marzo y el 27 de julio se considera periodo de

encierro debido al cierre de colegios, universidades y algunos lugares de trabajo, además de la aplicación de cuarentenas preventivas en algunas comunas y obligatoria en otras (Toro A. et al., 2021). Este índice de fase desarrollado se pondrá a prueba a través del desarrollo del objetivo número 2, en donde se evaluará si sirve o no como indicador al relacionarlo con el índice de movilidad obtenido.

$$\begin{aligned}
 \text{Indice de fase} = \frac{1}{\text{Numero de total de comunas}} & \left(\frac{\text{Comunas en fase 1}}{1} \right. \\
 & + \frac{\text{Comunas en fase 2}}{2} + \frac{\text{Comunas en fase 3}}{3} \\
 & \left. + \frac{\text{Comunas en fase 4}}{4} \right)
 \end{aligned} \tag{4}$$

El índice de movilidad es entregado por comuna, por lo tanto, se utilizó un promedio por fecha entregada del total a comunas a estudiar, es decir un promedio de las 34 comunas de la AMS.

Como se explicó anteriormente se obtuvieron datos horarios de las concentraciones de los contaminantes MP₁₀, MP_{2,5}, NO, NO₂, NO_x, CO y O₃. Primero se validaron los datos de MP₁₀ y MP_{2,5}, en donde se eliminaron los datos en donde la concentración de MP_{2,5} fue mayor que la concentración de MP₁₀. Luego, ocurre lo mismo con NO, NO₂ y NO_x, en donde se eliminó los datos que al sumar NO y NO₂ el resultado es mayor que NO_x. Para terminar la limpieza de datos se eliminan los datos anómalos, es decir, los valores que escapan de una tendencia. Cabe destacar que los datos fueron dejados con un decimal,

truncando el resto de decimales como lo establece la Guía de manejo de datos de MP de la EPA (Cohen et al., 1999).

Cada set de datos obtenido, tanto de concentraciones de contaminantes, datos de COVID-19, movilidad y el índice de fase, fueron puesta a prueba su normalidad para determinar si usar estadística paramétrica o no paramétrica. El test usado fue de Anderson-Darling a través del paquete nortest de R (Gross & Ligges, 2015), se escoge dicho test debido a que permite aplicarlo a grandes set de datos ya que se exige que el set de datos tenga una cantidad mayor a 20 por variable (“Anderson--Darling Test,” 2008). Los resultados obtenidos sobre la prueba de normalidad arrojan que todas las variables poseen una distribución no normal, por lo que se procederá a utilizar estadística no paramétrica.

Diferencias de concentraciones entre periodo histórico, 2020 y 2021

Lo primero que se hizo para observar si existen diferencias significativas entre el periodo histórico, 2020 y 2021 fue realizar un gráfico timePlot, la cual muestra el valor de la concentración a través del tiempo. Seguido se calculan los promedios de los distintos periodos, con esto se calcula su cambio relativo en porcentaje y finalmente se verifica si existe diferencia significativa. La diferencia significativa se obtuvo a través de la prueba de Wilcoxon para datos no paramétricos (“Wilcoxon Test,” 2008). Finalmente se utilizó la función timeVariation del paquete openair, la cual indica la variabilidad horaria de los contaminantes. Esta variabilidad se hace a través del promedio e indica el intervalo de confianza con un 95% (Carslaw, 2019).

Para poder observar las diferencias entre el 2020, 2021 y el periodo histórico en los distintos periodos de la pandemia, es decir, pre encierro, encierro y post encierro, se utilizó los días ISO, para poder así establecer los días ISO de dichos periodos de cada año y así extrapolarlo al periodo histórico y demás años según corresponda. Los días ISO es tipo de numeración de los días de cada año hecha a partir de las semanas ISO, la cual se establece como la primera semana de cada año como la primera semana del año que contenga un jueves, de esta manera, se tiene un primer día para cada año del cual se comienzan a contar los días (International Standard Organization [ISO], 2019).

Periodos de encierro

Para visualizar cómo evolucionan los casos actuales en conjunto con el índice de movilidad y el índice de fase se elabora un gráfico timePlot. Luego, para verificar si existe una relación entre el índice de movilidad y el índice de fase, ambas variables son puesta a prueba elaborando un gráfico de correlación de Spearman (como se mencionó anteriormente, ambas muestras poseen una distribución no normal) (“Spearman Rank Correlation Coefficient,” 2008). Para definir que periodos serán de encierro a partir de los criterios de índice de movilidad e índice de fase se elabora un gráfico de variación a través del tiempo donde se incluye un límite para cada uno de los criterios. Cabe destacar que para elaborar este último grafico mencionado fue necesario normalizar el índice de movilidad, solo para poder observar de manera directa como se desarrollan ambos índices a través del tiempo. Finalmente, se desarrollan dos calendarios con la función calendarPlot del paquete open air, para poder visualizar que días del año 2020 y 2021

serían de encierro y desconfinamiento (encierro y apertura respectivamente), con un calendario por criterio de índice de fase e índice de movilidad.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Diferencias de concentraciones de contaminantes en 2017-2019, 2020 y 2021.

En la Figura 1 se muestra las concentraciones horarias entre los años 2017 y 2021, en donde se observa que existe una leve disminución de concentraciones para el MP₁₀ y el NO en el 2020 en comparación al resto de los años. En cambio, al observar el año 2021 no se logra distinguir una diferencia entre el periodo histórico, a pesar de que durante ese año se siguen tomando medidas de restricción de movilidad debido a la pandemia (Ministerio de Ciencia, Tecnología, Conocimiento e Innovación, 2021). Otro suceso para observar es que a través de los meses en los años 2020 y 2021 se siguen las mismas tendencias anuales que en el periodo histórico, es decir, que en los meses de otoño-invierno existe un aumento en las concentraciones de contaminantes y por consecuencia una disminución en meses de primavera-verano, esto quiere decir que la variación estacional también puede afectar en las concentraciones de contaminantes (Toro A. et al., 2014).

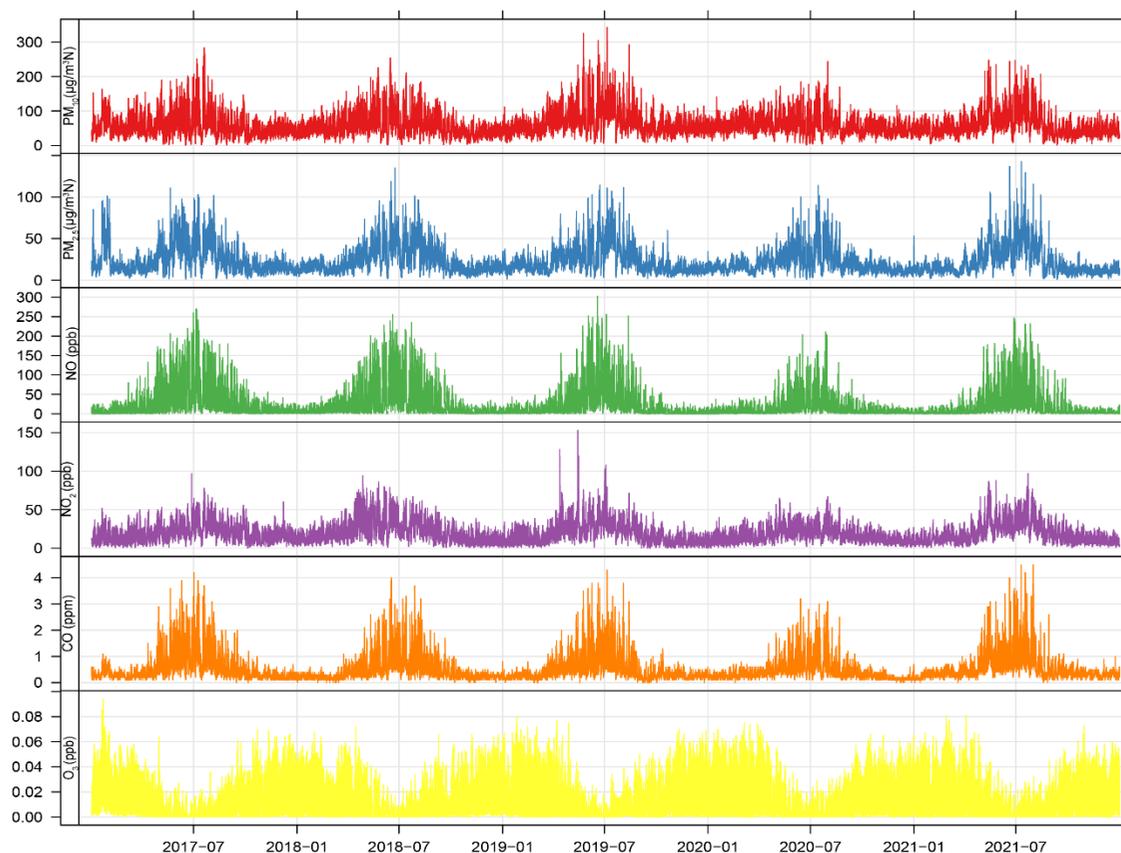


Figura 1: Grafico de variación horaria de concentraciones de MP_{10} , $MP_{2,5}$, NO, NO_2 , CO y O_3 entre los años 2017 al 2021.

En la Tabla I se obtienen los promedios de los distintos periodos: periodo histórico, 2020 y 2021. En esta tabla se tiene también el cambio relativo de las concentraciones de los contaminantes estudiados, así como de parámetros meteorológicos: temperatura, humedad relativa y velocidad de viento. Se observa que del periodo histórico al 2020 existe una disminución del 4,43% en MP_{10} sin ser significativa, 13,9% en $MP_{2,5}$, 52,8% en NO, 24,7% en NO_2 , 40,1% en NO_x y 19,6% en CO. Por el contrario, existe un aumento del 23,9% en concentración de O_3 . En el caso de los parámetros meteorológicos no existe un cambio significativo para la temperatura y la humedad relativa, pero si para la

velocidad del viento según el test de Wilcoxon, la cual disminuyó en un 1,35%, aunque esta disminución es muy menor, por lo que no se espera que la velocidad de vientos sea relevante en la dispersión de contaminantes. En Anexo 1 se muestra la tendencia anual de las concentraciones de los contaminantes a través de todo el periodo estudiado, en donde se exhibe que la tendencia para el NO es de -0,91 ppb por año, sin embargo, para el año 2020 se muestra una disminución, lo cual se podría relacionar con las medidas de restricción provocadas por la pandemia. Esto también ocurre con el NO₂, CO y MP_{2,5}.

Ahora, comparando el periodo histórico con el año 2021, se tiene que la disminución en la concentración de contaminantes fue menor que con el año 2020, teniendo una disminución del 5,6% para el MP_{2,5}, 32,0% en NO, 8,21% para NO₂ y un 21,5% para NO_x. En este caso también se dio un aumento en concentración del MP₁₀ del 0,16% aunque no logra ser significativo, y en el caso del CO y O₃ se da un aumento del 10,1% y 13,9% respectivamente. En este caso si existe una diferencia significativa en los parámetros meteorológicos, a excepción de la velocidad del viento, la temperatura que disminuyo un 5,10%, y en el caso de la humedad relativa aumentó un 6,18%. El caso de que no exista diferencias significativas con respecto a la velocidad del viento habla que la dispersión de contaminantes no varía mucho, mientras que la temperatura puede atribuirse a la altura de la capa de inversión térmica y la humedad relativa se puede relacionar con la formación de aerosoles, es decir, el material particulado. Sin embargo, estos dos parámetros solo cambiaron un 5,10 y 6,18%.

Finalmente, se comparan los años 2020 y 2021, en donde el resultado general es un aumento en las concentraciones, a excepción del O₃, el cuál disminuye su concentración

promedio en un 8,03%. A pesar de que existe un aumento en las concentraciones de MP_{10} y $MP_{2,5}$ estas no llegan a ser significativas. En cambio, en NO, NO_2 , NO_x y CO existe un aumento del 44,0%, 21,9%, 31,0% y 36,9% respectivamente. En ambos años existieron restricciones de movilidad, pero en el año 2021 existe un aumento de concentraciones para compuestos que tienen su principal fuente la combustión, como es el transporte y fuentes residenciales relacionada con la combustión de leña (Universidad Santiago de Chile, 2014). Sin embargo, con estos resultados no es posible obtener un panorama completo de la diferencia entre los promedios de las concentraciones entre los años, ya que existen periodos fríos donde la concentración de contaminantes aumenta debido a que la capa de inversión térmica disminuye su altura, producto de las bajas temperaturas, además de que en el 2020 y 2021 existen periodos de encierro donde aumentan las restricciones de movilidad.

Tabla I: Promedio de concentraciones de contaminantes diferenciados por periodo histórico, 2020 y 2021, con sus respectivos cambios relativos entre periodos. *No existe diferencia significativa con $p < 0,05$. **No existe diferencia significativa con $p < 0,001$.

Contaminante	A: Promedio 2017-2019	B: Promedio 2020	C: Promedio 2021	Cambio relativo 2017-2019 a 2020 (B-A) / A, %	Cambio relativo 2017- 2019 a 2021 (C-A) / A, %	Cambio relativo 2020 a 2021 (C-B) / B, %
PM10 ($\mu\text{g m}^{-3}$)	63,7	60,9	63,8	-4,43%*	0,165%*	4,81%*
PM2,5 ($\mu\text{g m}^{-3}$)	25,8	22,2	24,3	-13,9%	-5,65%	9,61%**
NO (ppb)	37,1	17,5	25,3	-52,8%	-32,0%	44,0%
NO2 (ppb)	23,3	17,6	21,4	-24,7%	-8,21%	21,9%
NOX (ppb)	60,4	36,2	47,4	-40,1%	-21,5%	31,0%
O3 (ppb)	0,0131	0,0162	0,0150	23,9%	13,9%	-8,03%
CO (ppm)	0,617	0,496	0,680	-19,6%	10,1%	36,9%
Temperatura (°C)	15,5	15,5	14,8	-0,577%*	-5,10%	-4,55%
HR (%)	57,0	57,6	60,5	0,978%*	6,18%	5,15%
Velocidad de viento (m s^{-1})	0,863	0,851	0,866	-1,35%	0,375%*	1,75%*

En la Figura 2 se observa la variabilidad horaria de las concentraciones de contaminantes durante cada periodo: periodo histórico, 2020 y 2021. Por medio de esta figura se pueden observar los cambios de los patrones en las concentraciones a través del día. En el caso de MP₁₀ se observa que en el periodo histórico se tienen solo dos máximos a lo largo del día, en la mañana (alrededor de las 9:00 horas) y en la tarde noche (cerca de las 20:00 horas). Desde el valor máximo de concentración de la mañana las concentraciones disminuyen de manera lineal hasta cerca de las 13:00 horas. En cambio, en los años 2020 y 2021 se tienen dos máximos de concentración durante la mañana, por lo que no se ve un decaimiento lineal hasta la tarde, lo que puede atribuirse a un cambio rutinario al uso de automóviles u otras fuentes de MP₁₀ debido a la pandemia. Sin embargo, como se mencionó anteriormente, no se evidencian diferencias significativas de concentraciones.

En el caso de $MP_{2,5}$ se mantienen los patrones horarios a lo largo de los años, no obstante, los valores de concentración variaron, en donde el periodo histórico posee concentraciones mayores, seguido por el 2021 y con concentraciones menores en el año 2020, lo cual tiene coherencia con lo anteriormente descrito. Esta variación es de una disminución del periodo histórico al año 2020 de un 13,9% y de un 5,65% entre el periodo histórico y el año 2021.

El CO presenta un patrón horario similar que el $MP_{2,5}$, donde existe un máximo cerca de las 13 horas y otro cerca de las 22 horas para todos los años estudiados. Si bien las concentraciones del año 2021 aumentaron, sobrepasando gran parte del día las concentraciones del periodo histórico coincidiendo con el aumento del 10,12%, no se observa un aumento durante el máximo cercano al mediodía. Por otra parte, el año 2020 fue el que presenta las menores concentraciones durante todo el día. Esta disminución puede deberse a una menor cantidad de uso del transporte, el cual es una de las fuentes principales de CO en la AMS (Universidad Santiago de Chile, 2014)

El NO presenta dos máximos de concentración durante el día, uno cerca del mediodía y otro cerca de la medianoche, siendo este de menor concentración. Se observa que no hubo diferencias en el patrón horario entre el periodo histórico, el año 2020 y el año 2021. Además, se observa que las concentraciones del periodo histórico son durante todo el día mayores que el resto de años, mientras que el año 2021 presenta mayores concentraciones que el año 2020, a excepción del mínimo ocurrido durante la tarde, donde las concentraciones se asemejan.

Llegando al NO_2 se observa un comportamiento similar al que mostro el $\text{MP}_{2,5}$, en donde se mantienen los patrones durante los años y se observa que existe una disminución en las concentraciones en los años 2020 y 2021 respecto al periodo histórico, en donde el año 2021 presenta concentraciones mayores que el año 2020. El aumento de NO y NO_2 entre el año 2020 y el año 2021 puede indicar un mayor uso del transporte durante el año 2021, ya que este es la principal fuente de emisión de óxidos de nitrógenos (Universidad Santiago de Chile, 2014).

Finalmente, el ozono presenta el mismo patrón a través de los años variando en su concentración, siendo la más alta en el 2020, seguido por el 2021 y finalmente el periodo histórico. Lo cual se podría explicar la disminución de las concentraciones de NO y NO_2 , ya que las concentraciones de O_3 tienen una relación inversa con las concentraciones de NO_x en áreas limitadas en COVs como lo es el AMS (Seguel et al., 2020)

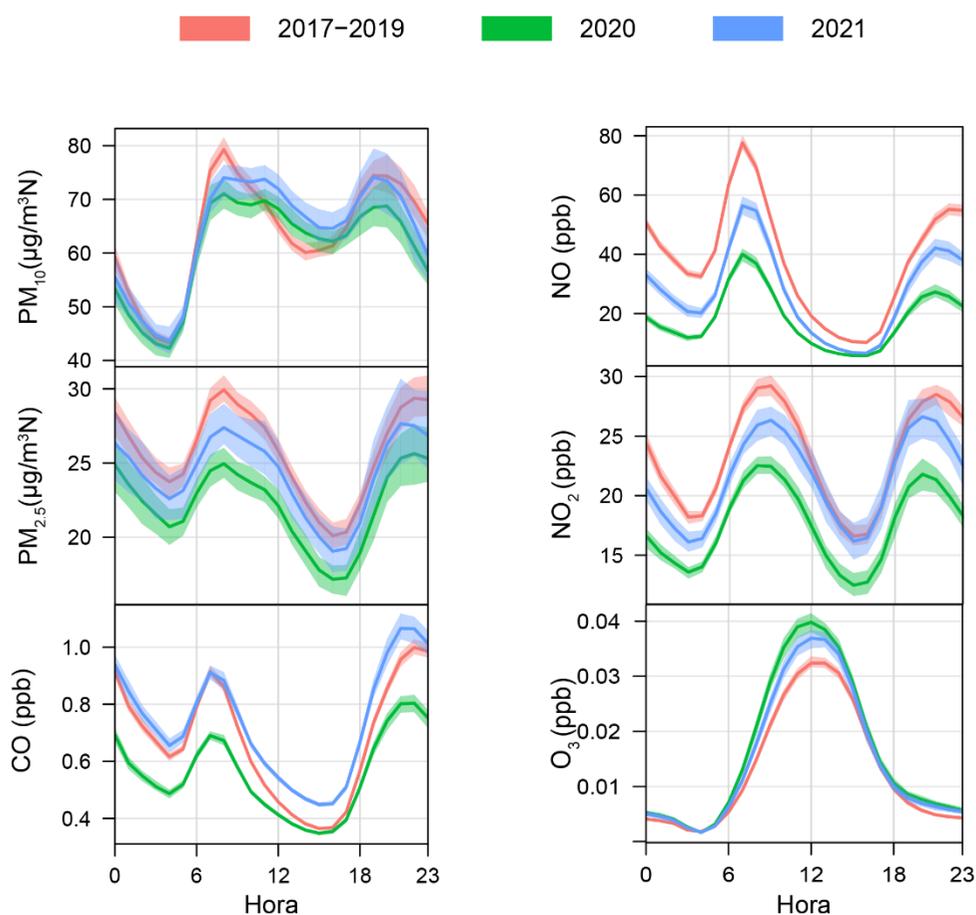


Figura 2: Concentraciones horarias para MP_{10} , $MP_{2,5}$, CO, NO, NO_2 y O_3 , para periodo histórico (rojo), 2020 (verde) y 2021 (azul), indicando el intervalo de confianza al 95% del promedio.

Caracterización de periodos en fases del plan Paso a Paso y variación de movilidad

Casos COVID-19, movilidad e índice de fase

En la Figura 3 se observa la variación de los casos de COVID-19, la movilidad y el índice de fase a través del tiempo. Con este grafico se puede observar que existe una relación entre las tres variables, ya que al aumentar los casos activos existe una disminución de

movilidad, así como con un aumento en el índice de fase, también existe una disminución de la movilidad. Otro punto que notar es que a pesar de que en junio de 2021 existe un máximo de casos, este no coincide con el mínimo de movilidad el cual ocurre entre abril y julio, sin embargo, coincide con el hecho de que se presenta un índice de fase 1 (es decir todas las comunas de la AGS están en cuarentena). Por otra parte, también se observa que existe una relación de los casos actuales con el índice de fase. Este resultado no es una coincidencia, ya que en la implementación de la estrategia gradual Paso a Paso se explica que existen diferentes criterios para decidir a qué fase pasará cada comuna (Ministerio de Salud, 2020). Uno de estos criterios es la disminución sostenida de casos actuales, por lo que al comenzar a disminuir los casos se observa que un tiempo después se disminuye el índice de fase, así como al aumentar los casos, un tiempo después aumenta el índice de fase. Finalmente, se logra observar que, al aumentar el índice de fase, se aumentan las restricciones y por esto, se cumple que exista una menor movilidad.

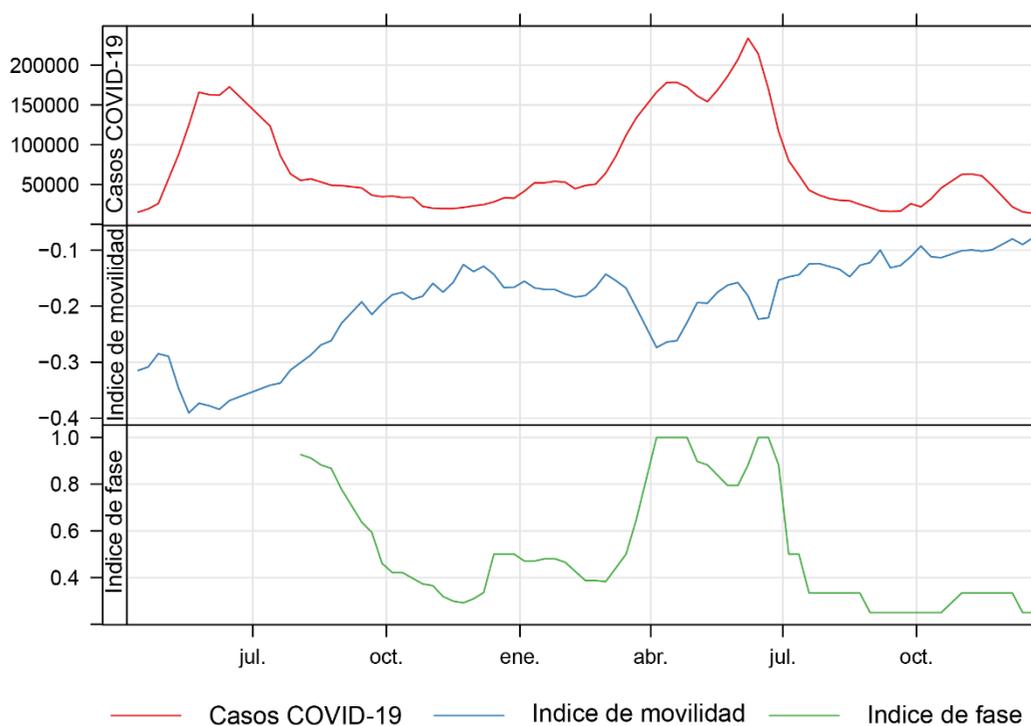


Figura 3: Gráfico semanal de casos actuales de COVID-19, índice de movilidad e índice de fase en la AMS desde el 13 de abril del 2020 hasta el 31 de enero de 2021.

Relación entre movilidad e índice de fase propuesto

En la Figura 4 se presenta el gráfico de correlación de Spearman donde se evalúa la correlación lineal entre el índice de fase y el índice de movilidad. En este gráfico se puede observar que existe una correlación negativa con $R = -0,83$, es decir, que al disminuir el índice de fase aumenta la movilidad y viceversa, lo cual es un resultado esperado, ya que al aumentar el índice de fase quiere decir que existen más comunas con restricciones de movilidad disminuyendo la movilidad. Cabe destacar que en la Figura 4 solo se presenta la correlación de estas dos variables en el periodo en que se implementa la estrategia

gradual Paso a Paso y no previo a esta, es decir, entre el 28-07-2020 y el 31-12-2021. Esto es debido a que previo a esta implementación en gran parte de la AMS existían cuarentenas preventivas y en algunas comunas obligatorias por lo tanto se obtendría un índice de fase bajo 0,25 (actual mínimo sin considerar ese periodo), lo cual no sería un valor representativo para dicho periodo (Ministerio de Ciencia, Tecnología, Conocimiento e Innovación, 2021). De esta manera, solo se busca la existencia de una correlación donde el índice de fase busque ser representativo para su comparación con los datos de movilidad, los cuales se obtienen a través de mediciones elaboradas por el ISCI. Con este resultado no solo se logra determinar una correlación entre la movilidad y el índice de fase, sino, que logra validar el índice de fase como un indicador de la AMS en su estado del plan Paso a Paso, de manera que es posible seguir utilizándolo como indicador en los próximos análisis.

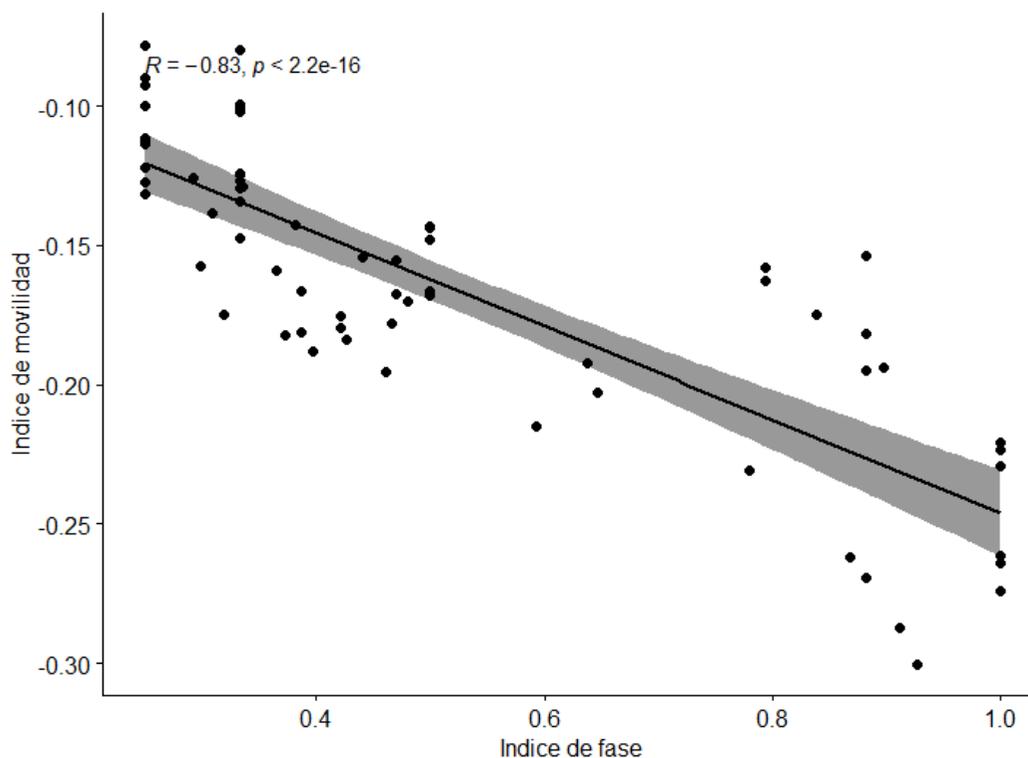


Figura 4: Grafico de correlación de Spearman del índice de fase con el índice de movilidad con datos desde el 28-07-2020 al 31-12-2021.

Periodos pre encierro, encierro y post encierro

En la Figura 5 se encuentra la variación del índice de fase y el índice de movilidad normalizado a través del tiempo. La normalización del índice de movilidad es para que se pueda visualizar en dicho gráfico y se realizó dividiendo cada dato de índice de movilidad en el mínimo absoluto de todo su set de dato ($-0,3906618$). Dicha normalización se hizo solo para facilitar la visualización del grafico de la Figura 5. Así se determina la fase de encierro mediante dos escenarios a través del 2020 y 2021: cuando el índice de fase es mayor a 0,7 o cuando el índice de movilidad normalizado es menor a $-0,5$ ($-0,1953309$ sin normalizar). El criterio del índice de fase se debe a que sobre un

índice del 0,7 siempre la fase 1 (cuarentena) tiene un porcentaje mayor al del 50% en las comunas del AMS, mientras que en la mayoría del tiempo el resto se distribuye en fase 2 y solo un breve periodo existe un 11,8% de comunas en fase 3 (en ese periodo las comunas de fase 1 contemplan un 55,9% y la fase 2 un 32,4%). Si se baja dicho criterio de 0,7 las comunas en fase 1 llegan a disminuir hasta un 38,2%, por lo que la mayoría de la AMS no se encontrará en cuarentena total obligatoria. De esta manera se podrá evaluar las concentraciones de contaminantes con ambos criterios, ya que al comparar la Figura 6 con la Figura 7, las cuales presentan de forma visual los periodos de encierro por cada criterio, se observa que existen diferencias tanto en la duración como en los inicios y términos de periodos de encierro para los criterios de índice de fase y movilidad. Destacando la caracterización por el índice de movilidad, se tienen pequeños periodos de encierro, una semana (14 al 20 de septiembre en 2020) y dos semanas (14 al 27 de junio del 2021).

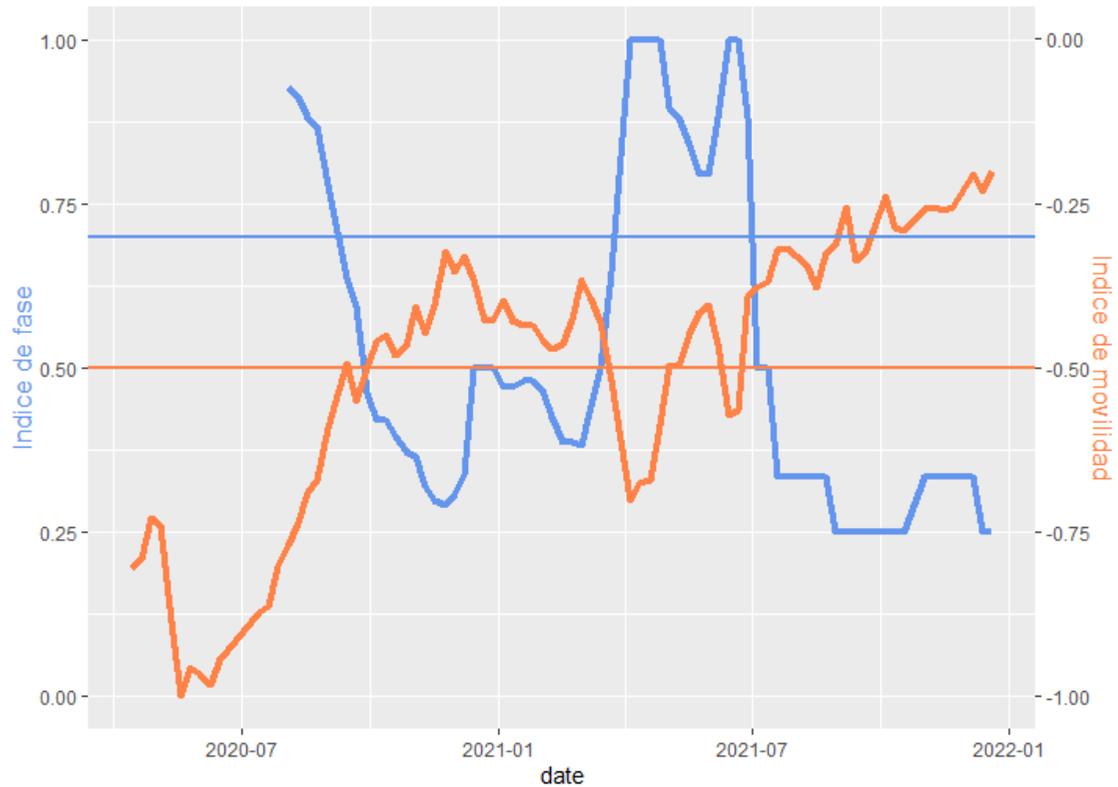


Figura 5: Grafico de índice de fase (azul) e índice de movilidad normalizado (anaranjado) a través del tiempo, con límite de 0,7 para índice de fase y límite en -0,5 para indice de movilidad.

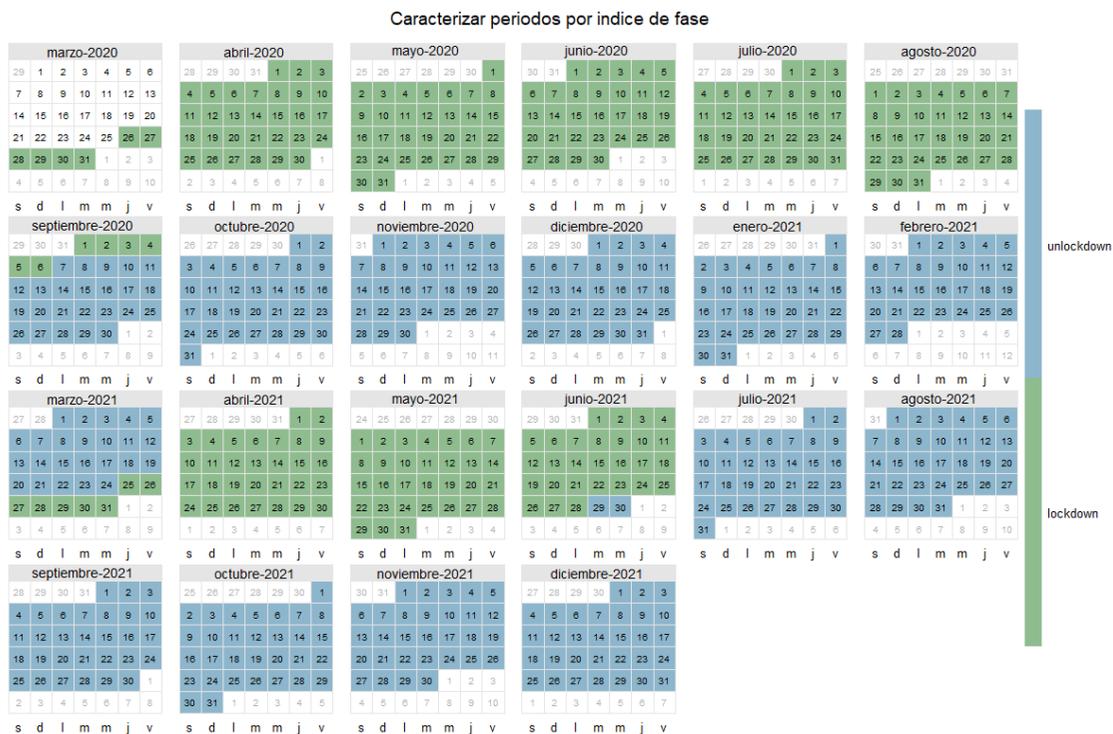


Figura 6: Calendario 2020 y 2021 con caracterización de encierro (verde) y apertura (azul) a través de índice de fase.

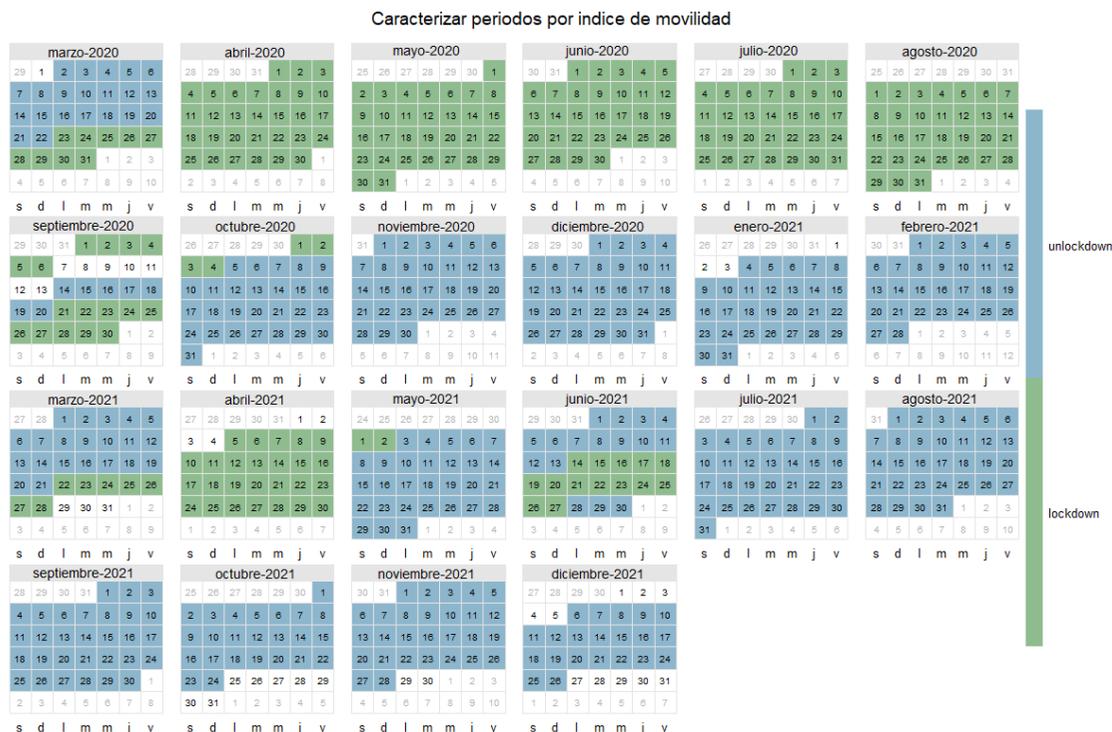


Figura 7: Calendario 2020 y 2021 con caracterización de encierro (verde) y apertura (azul) a través de índice de movilidad.

Si se estudia el periodo de años de 2020 y 2021 en conjunto se puede observar una diferencia máxima entre los dos criterios de 57 días, dada por el último periodo post encierro, en donde el criterio de movilidad entra primero a este periodo (03-05-2021) seguido por una disminución del índice de fase el 19-06-2021, como se muestra en la Tabla II. Esta diferencia se puede deber a que a pesar de que existan las medidas de encierro impuestas por el gobierno, como lo representa el índice de fase, la movilidad

puede actuar como una variable independiente, ya que es una medición del comportamiento de las personas frente a las medidas de encierro tomadas por el gobierno.

Con estos resultados se pueden establecer los periodos de encierro y apertura para comparar las concentraciones de contaminantes en los años del periodo histórico, 2020 y 2021. De esta manera se podrá evaluar que tanta incidencia tienen las medidas de encierro y su flexibilidad en la calidad de aire. Para esto se pretende presentar distintos periodos en los años 2020 y 2021, estos son: “pre encierro”, “encierro” y “post encierro” por cada año como se muestra en la Tabla II. Estos periodos tendrán distintas fechas y duración en el año 2020 y 2021, por lo que para comparar dichos años y periodos con los años históricos, se utilizará los días ISO de cada inicio y fin de periodo por cada año. Estos días ISO definirán los periodos a comparar en los años históricos, 2020 y 2021. Por ejemplo, se podrá tomar el periodo de encierro 2020 (periodo entre días ISO 88 y 252, a través del criterio de índice de fase) y extrapolarlo a los años históricos utilizando ese mismo periodo de días ISO de esos años, teniendo así cuatro criterios distintos: Criterio de fase 2020 (CF2020), criterio de movilidad 2020 (CM2020), criterio de fase 2021 (CF2021) y criterio de movilidad 2021 (CM2021), también se asumirá que existe un Criterio 2020 (C2020) que resume el CF2020 y CM2020, así como también un Criterio 2021 (C2021) que resume el CF2021 y CM2021. El detalle de que días ISO toma cada criterio se especifica en la Tabla II. De esta manera se podrá extrapolar los distintos periodos pre encierro, encierro y post encierro del 2020 al 2021 y viceversa, para así determinar cómo afectan las medidas de restricción de movilidad en la concentración de contaminantes atmosféricos.

Tabla II: Periodos de Pre-Encierro, Encierro y Post-Encierro según criterio de índice de fase (PIF) e índice de movilidad (PIM), con sus respectivas fechas (inicio y fin) y días ISO de dichas fechas. Se destaca la diferencia de días entre periodos.

	Periodos	Fechas (Criterio de índice de fase)	Días ISO (Criterio Índice de fase)	Fechas (Criterio Índice de movilidad)	Días ISO (Criterio Índice de movilidad)	Diferencias días entre criterios (PIF – PIM)
Periodo 2020-2021	1° Encierro	26-03-2020	88	23-03-2020	85	-31
		06-09-2020	252	04-10-2020	280	
	1° Post-Encierro	07-09-2020	253	05-10-2020	281	31
		24-03-2021	80	21-03-2021	77	
	2° Encierro	25-03-2021	81	22-03-2021	78	54
		28-06-2021	176	02-05-2021	119	
2° Post-Encierro	29-06-2021	177	03-05-2021	120	-57	
	31-12-2021	362	31-12-2021	362		
2020	Pre-Encierro	01-01-2020	3	01-01-2020	3	3
		25-03-2020	87	22-03-2020	84	
	Encierro	26-03-2020	88	23-03-2020	85	-31
		06-09-2020	252	04-10-2020	280	
Post-Encierro	07-09-2020	253	05-10-2020	281	31	
	31-12-2020	368	28-12-2020	368		
2021	Pre-Encierro	01-01-2021	369	04-01-2021	369	6
		24-03-2021	80	21-03-2021	77	
	Encierro	25-03-2021	81	22-03-2021	78	54
		28-06-2021	176	02-05-2021	119	
	Post-Encierro	29-06-2021	177	03-05-2021	120	-57
		31-12-2021	362	31-12-2021	362	

Comparar cambio de concentraciones a través de los periodos de encierro y apertura.

Variabilidad mensual a través de periodos pre encierro, encierro y post encierro.

En las Figura 8, Figura 9, Figura 10 y Figura 11 se muestra la variación mensual de concentraciones de contaminantes por periodo para el periodo histórico, 2020 y 2021. Cada grafico se diferencia por el criterio bajo el que está descrito el periodo de pre encierro, encierro y post encierro. En la Figura 8 se utiliza el criterio de CF2020, es decir, se extrapola los días ISO de los periodos pre encierro, encierro y post encierro del año 2020 hacia los otros años como se muestra en la Tabla II. De esta manera se tiene la misma cantidad de días por cada periodo, además de cubrir fechas iguales o similares, evitando así la comparación de periodos fríos con cálidos. En la Figura 9 se utiliza el CF2021 de la misma manera como se describió anteriormente. En la Figura 10 y Figura 11 se utiliza el criterio de CM2020 y CM2021 respectivamente. La razón de por qué se utilizan cuatro criterios distintos (fase 2020, fase 2021, movilidad 2020 y movilidad 2021), es a que con cada uno de los criterios los periodos pre encierro, encierro y post encierro varían en duración y en fechas, por lo que también permite comparar como afecta el criterio de movilidad y fase a las concentraciones de contaminación. En las Tabla III, Tabla IV y Tabla V se muestran los cambios relativos que existen entre los años históricos, 2020 y 2021.

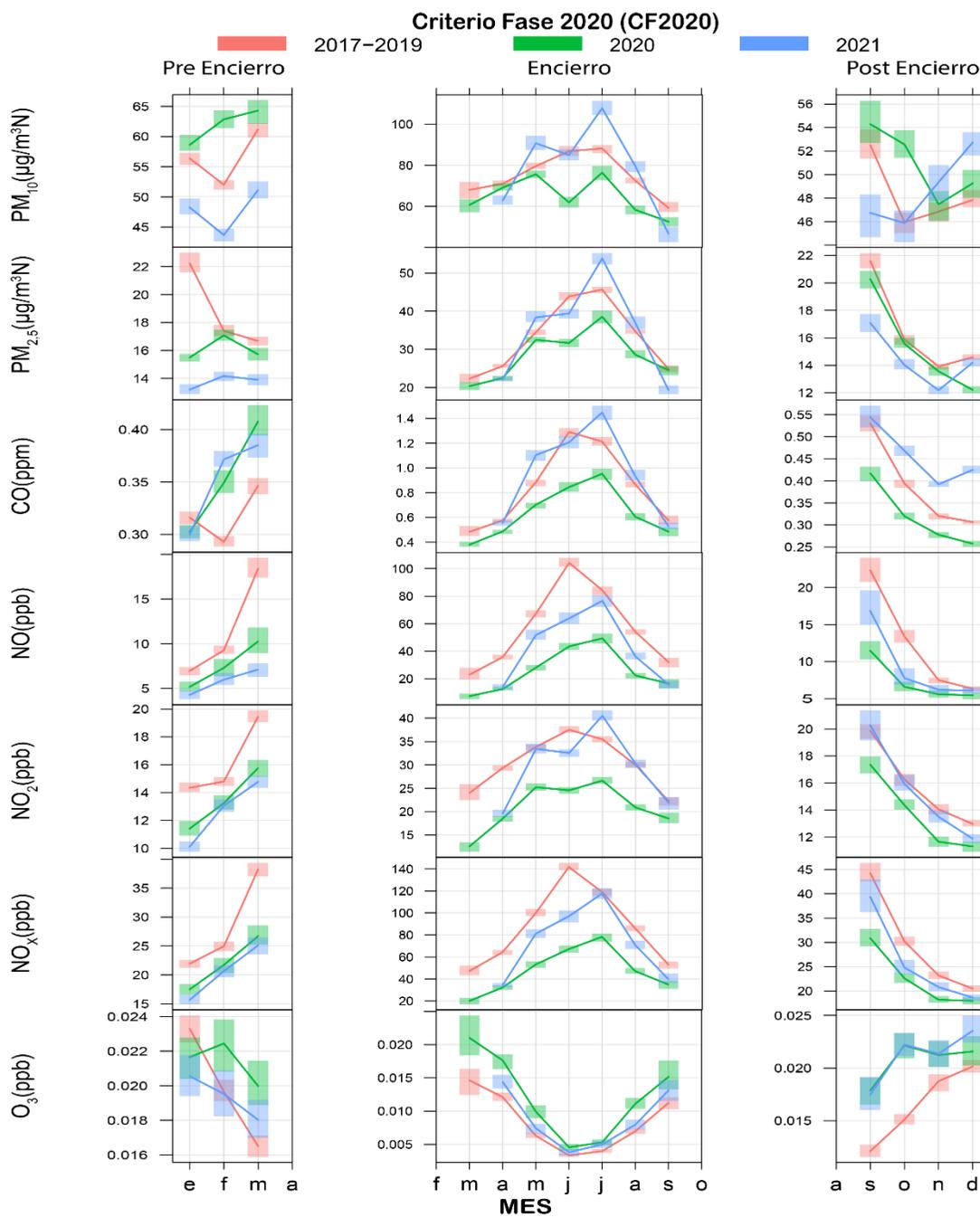


Figura 8: Variación de promedio mensual de concentraciones de contaminantes por periodo pre encierro, encierro y post encierro con criterio de fase del año 2020, con intervalo de confianza del 95%.

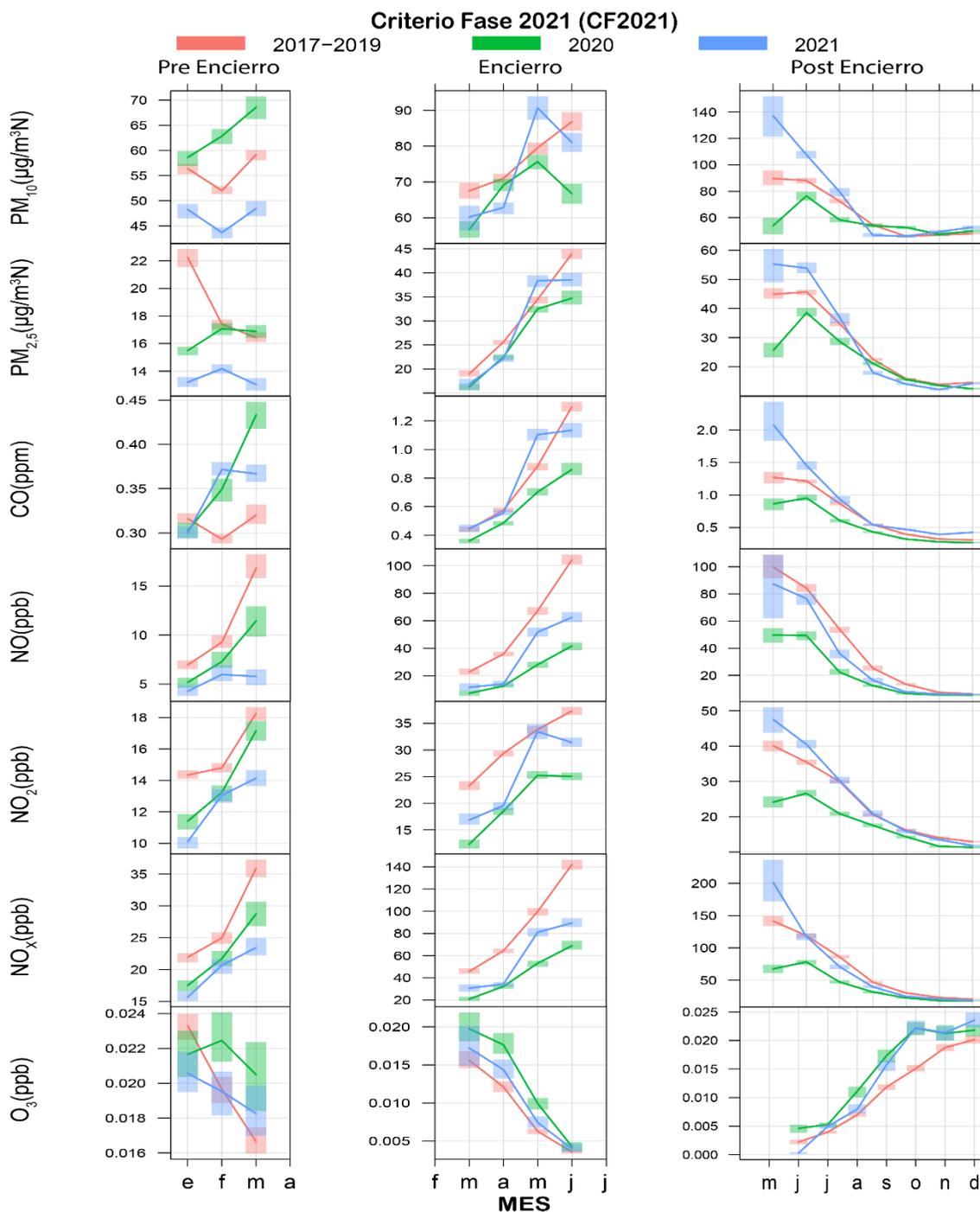


Figura 9: Variación de promedio mensual de concentraciones de contaminantes por periodo pre encierro, encierro y post encierro con criterio de fase del año 2021.

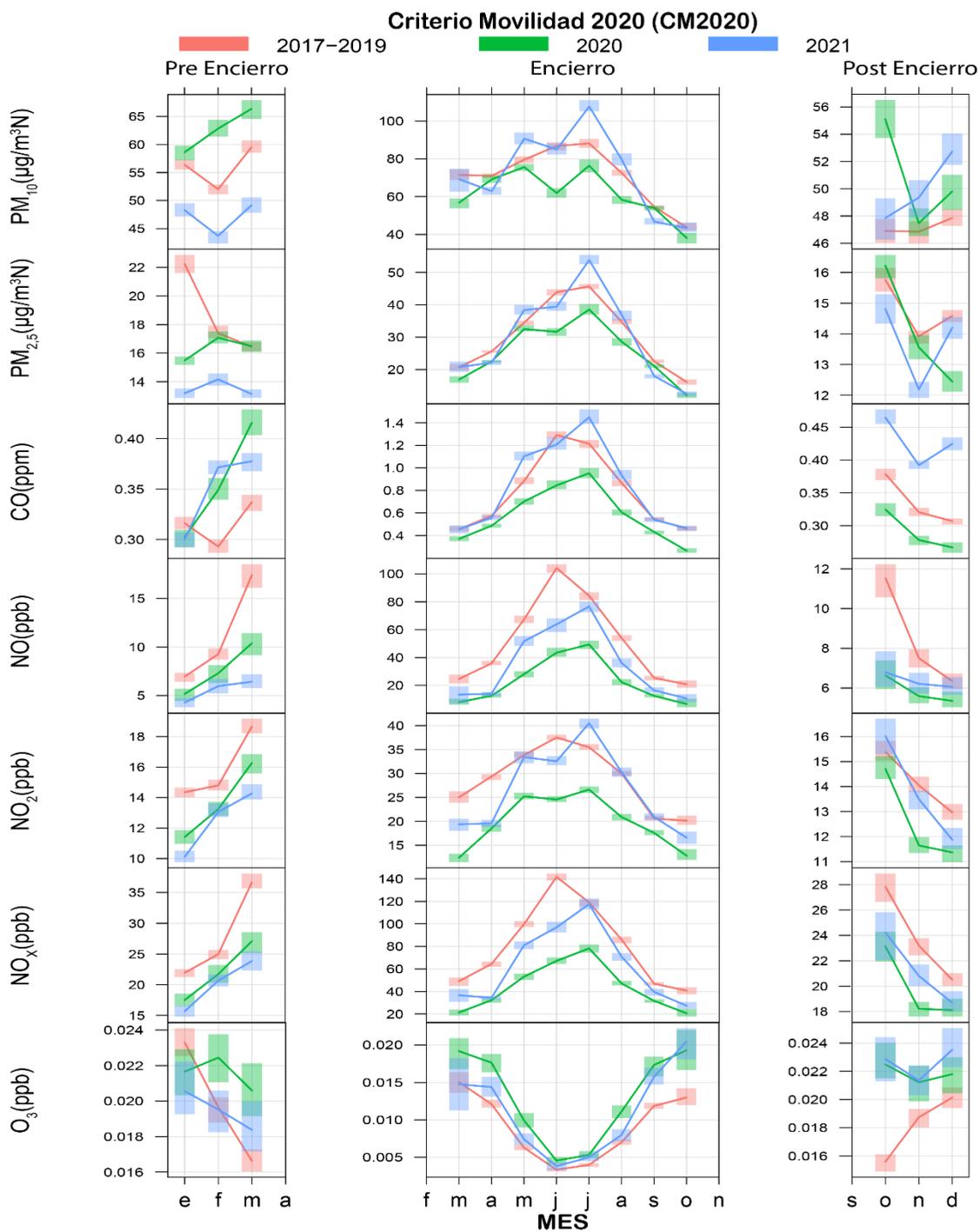


Figura 10: Variación de promedio mensual de concentraciones de contaminantes por periodo pre encierro, encierro y post encierro con criterio de movilidad del año 2020.

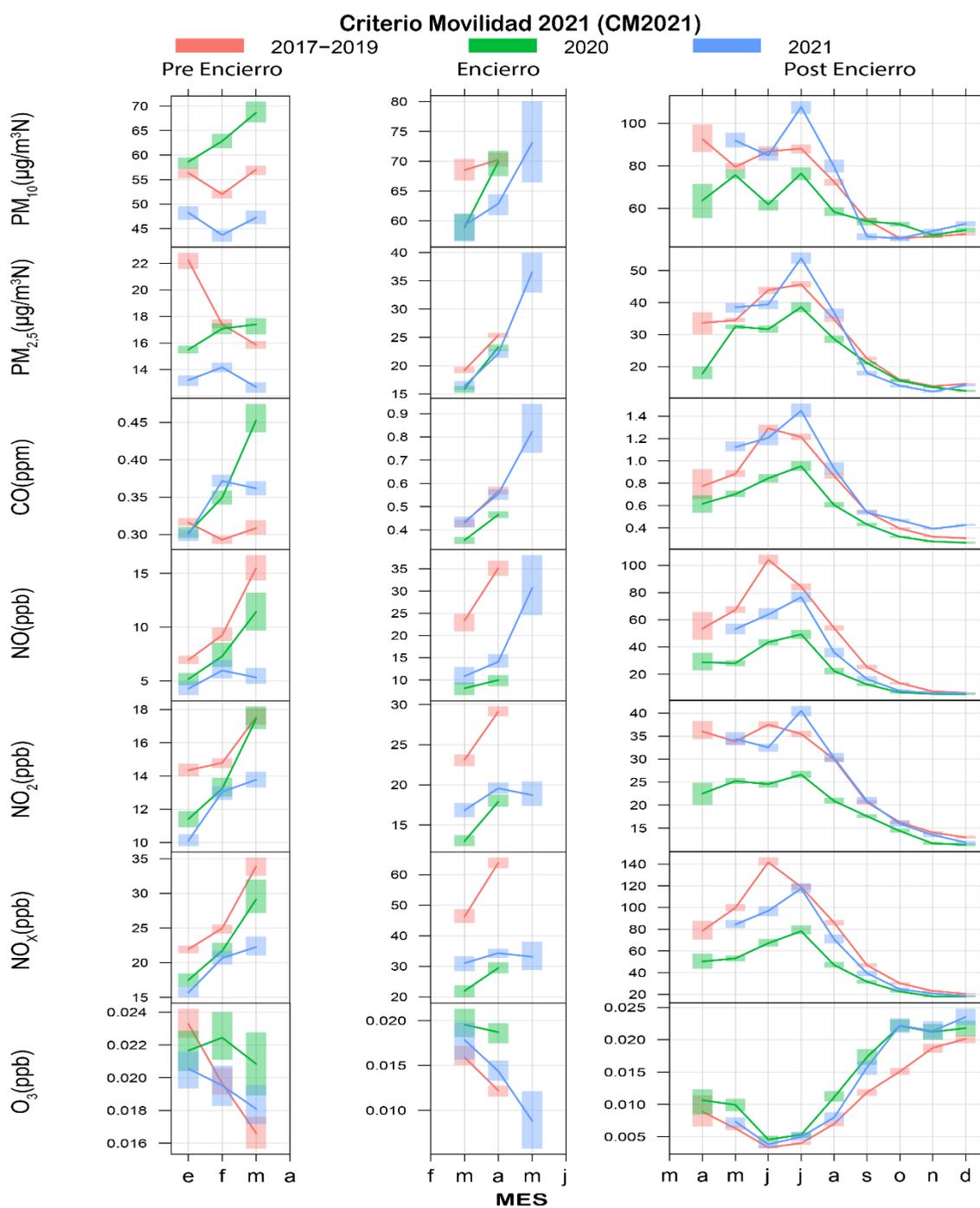


Figura 11: Variación de promedio mensual de concentraciones de contaminantes por periodo pre encierro, encierro y post encierro con criterio de movilidad del año 2021.

Periodo de pre encierro

Para el periodo de pre encierro, la diferencia de días es no mayor a 10 entre los distintos criterios, por lo que se procederá a analizarla independiente del criterio.

El MP₁₀ en periodo de pre encierro se observa que en el periodo historico y el año 2021 se presenta una disminución de las concentraciones entre enero y febrero y luego un aumento hacia marzo. En cambio, al año 2020 presenta un aumento en las concentraciones durante todo el periodo, teniendo además los mayores valores de concentración. En cambio, el año 2020 presenta un aumento de enero a marzo. En las gráficas que se presentan, se observa que el año 2020 presenta las mayores concentraciones, siendo entre un 22,6% y 25,6% más altas que el año 2021 y entre un 9,25% y 11,4% más altas que el periodo histórico como se muestra en la Tabla III. La disminución de las concentraciones del año 2021 puede estar dado a que, si bien se considera un periodo de pre encierro, existen medidas de restricción por la presencia del COVID-19, las que pueden variar entre fases 2, 3 y 4 del Plan Paso a Paso, lo que podría conllevar a disminuir las emisiones de este contaminantes relacionadas al transporte, siendo una de estas las que más contribuye según el último inventario de emisiones validado (Ministerio de Ciencia, Tecnología, Conocimiento e Innovación, 2021; Universidad Santiago de Chile, 2014).

Siguiendo con el pre encierro, se tiene que el MP_{2,5} se presenta una distribución semejante entre el año 2020 y 2021, ya que en ambos casos entre enero y febrero existe un aumento

de las concentraciones y luego una disminución para marzo. Por otra parte, el periodo histórico presenta una disminución de concentraciones durante el pre encierro. El periodo histórico presenta las mayores concentraciones, ya que al comparar el promedio del periodo histórico y el año 2020, se tiene una disminución entre el 14,7% y 13,6%, mientras que existe una disminución levemente mayor entre el 2020 y 2021, siendo entre el 14,6% y 18,7% indicado en la Tabla III, lo cual podría explicarse nuevamente a que el año 2021 existen medidas de restricción leves, las que pueden afectar en la emisión de $MP_{2,5}$ dada por el transporte al igual que sucede con el MP_{10} (Universidad Santiago de Chile, 2014).

En el periodo de pre encierro el CO presenta una distribución distintiva en el periodo histórico, donde existe una disminución entre enero y febrero, y luego un aumento entre febrero y marzo. En cambio, para el 2020 y 2021 existe un aumento constante en el periodo de pre encierro. Se observa que en general, las concentraciones de CO son más altas para el 2020 y 2021, lo cual también se sustenta en los cambios relativos presentados en la Tabla III, ya que del periodo histórico al 2020 existe un aumento entre 9,25% y 10,5%, mientras que del periodo histórico al 2021 el aumento es entre 11,1% y 11,4%. De la misma manera, no se observa un cambio relativo entre 2020 y 2021 para el periodo de encierro.

El NO durante el pre encierro en todos los años presenta un aumento, donde el periodo histórico presenta un aumento más pronunciado entre febrero a marzo (un aumento de más de 5 ppb). Dicho aumento, que no se observa el 2020, puede estar dado por la existencia de algunas medidas de restricción de movilidad, las cuales comienzan

aproximadamente el 15 de marzo, dichas medidas pueden haber afectado en la emisión de óxidos de nitrógeno, debido a que su fuente principal en la AMS es el transporte (Toro A. et al., 2021; Universidad Santiago de Chile, 2014). Se logra observar que las concentraciones del periodo histórico son mayores, seguidas por el año 2020 y finalmente el año 2021. En efecto, en promedio se observa que existe una disminución de por lo menos 31,7% del periodo histórico al 2020, y otra disminución del 20,9% del 2020 al 2021.

El NO_2 presenta el mismo patrón mensual que el NO , es decir, un aumento en todo el preencierro, mientras que el periodo histórico presenta un aumento mayor entre febrero y marzo. En este caso el NO_2 también presenta las mayores concentraciones en el periodo histórico seguido por el 2020 y luego 2021. Esto se evidencia en que existe una disminución de por lo menos 15,15% del periodo histórico al 2020. Al comparar el cambio relativo entre el 2020 y 2021 se obtiene que existe una disminución significativa usando C_{2021} , mientras que usando C_{2020} esta diferencia no es significativa, sin embargo, la disminución significativa es menor al 10% como se muestra en la Tabla III. Esta diferencia entre los criterios se puede dar en los últimos días del periodo como se describió anteriormente.

Como es de esperar, el NO_x presenta el mismo comportamiento al NO y el NO_2 teniendo un aumento constante en las concentraciones a través del periodo, sin embargo, se diferencia en que entre el 2020 y 2021 no presenta un cambio significativo, pero se observa que las concentraciones del periodo histórico nuevamente son las más altas.

Para finalizar el análisis del periodo de pre encierro, se tiene que el O_3 solo presenta un comportamiento distinto en el año 2020, donde existe un aumento de solo 0,002 pbb en febrero y luego disminuye hacia marzo. En cambio, en el periodo histórico y 2021 tiene una disminución a través del pre encierro. Esto último se puede relacionar con que el año 2020 presenta una leve disminución en la concentración de NO_x en el mes de febrero, perdiendo la linealidad observada en los otros años, esto podría provocar un aumento en las concentraciones de O_3 , dado que la AMS es un área limitada en COVs (Seguel et al., 2020). En los gráficos se puede observar que el intervalo de confianza es amplio, lo cual se refleja en la Tabla III, ya que no se observa ningún cambio significativo entre el periodo histórico, 2020 y 2021.

Tabla III: Cambio relativo de contaminantes y variables meteorológicas entre años históricos (Hist), 2020 y 2021 para el periodo pre encierro, con criterio de fase y movilidad. Cada cambio relativo es entre el o los años más antiguo respecto al más actual.

*No existe diferencia significativa con $p < 0,05$. **No existe diferencia significativa con $p < 0,01$. *** No existe diferencia significativa con $p < 0,001$.

Contaminante	Pre encierro: Cambio relativo (A-B)/A							
	Hist-2020		Hist-2021		2020-2021(2020)		2020-2021 (2021)	
	Fase (CF2020)	Movilidad (CM2020)	Fase (CF2021)	Movilidad (CM2021)	Fase (CF2020)	Movilidad (CM2020)	Fase (CF2021)	Movilidad (CF2021)
MP ₁₀ ($\mu\text{g m}^{-3}$)	9,25%	11,4%	-15,9%	-15,7%	-22,6%	-24,4%	-25,2%	-25,6%
MP _{2,5} ($\mu\text{g m}^{-3}$)	-14,7%	-13,6%	-29,0%	-29,3%	-14,5%	-17,2%	-17,8%	-18,7%
CO (ppm)	9,25%	10,5%	11,1%	11,4%	1,22%	0,18%**	-1,30%*	-2,06%*
NO (ppb)	-34,3%	-31,7%	-47,9%	-46,4%	-20,9%	-23,8%	-27,8%	-28,1%
NO ₂ (ppb)	-17,3%	-15,1%	-20,3%	-20,0%	-4,51%**	-6,62%***	-7,97%	-8,60%
NO _x (ppb)	-22,7%	-20,8%	-25,5%	-25,0%	-4,58%*	-6,86%*	-8,70%**	-10,0%**
O ₃ (ppb)	7,44%***	7,67%***	-3,85%*	-4,44%*	-9,84%**	-10,0%**	-10,0%**	-10,5%**
Temperatura (°C)	-0,11%*	-0,19%*	-9,96%	-9,98%	-10,2%*	-9,86%	-10,1%	-10,2%
HR (%)	-1,94%*	-1,85%*	20,7%	20,4%	22,6%	21,7%	24,2%	24,8%
Velocidad de viento (m s^{-1})	-2,53%**	-2,45%**	-7,37%	-7,42%	-4,79%*	-5,13%*	-4,85%*	-4,62%*

Periodo de encierro

Para analizar lo que ocurre en el periodo de encierro, será necesario utilizar distintos criterios para definir la extensión de dicho periodo como se explicó anteriormente, por lo que los resultados se espera que sean diferentes. Algo para tener en cuenta, bajo C2020 el periodo de encierro abarca meses fríos y cálidos, ya que se toma entre los días ISO 85 y 280, lo que contempla los meses de marzo a octubre, en cambio con C2021 se tiene solo

meses fríos, ya que abarca los días ISO entre 78 y 176, es decir se toma los meses de marzo a junio, como se indica en la Tabla II.

Para el MP_{10} se observa que con C2020 en las Figura 8 y Figura 10 se tiene un aumento constante en las concentraciones del periodo historico hasta julio, para luego disminuir estas concentraciones. En cambio, los años 2020 y 2021 presentan un aumento a traves del periodo de encierro interrumpido por el mes de junio, donde existe una disminución en las concentraciones, luego estas vuelven a aumentar en julio, y luego a disminuir al igual que en el periodo historico. Por otra parte, se observa que terminando el periodo de encierro con C2020, las concentraciones para el periodo historico, 2020 y 2021 tienden a igualarse. Bajo el C2020 las concentraciones más altas pertenecen al año 2021 de forma general, luego el periodo historico y finalmente el año 2020 presenta las menores concentraciones. De esta manera se tiene que las concentraciones entre el periodo historico y el año 2020 disminuyeron un 13,8% para CF2020 y un 12,5% CM2020, mientras que entre el año 2020 y el año 2021 existió un aumento de las concentraciones del 22,3% para CF2020 y un 18,6% para CM2020. Ahora, con C2021 mostrado en las Figura 9 y Figura 11, se tiene un periodo de hasta 3 meses con CM2021, en donde se muestra que las concentraciones del año 2021 son menores que las concentraciones del periodo historico, a excepción del mes de junio, sin embargo, estas concentraciones bajan en el mes de julio. De esta manera se tiene que existe una disminución de concentraciones entre el periodo historico y el año 2021 de 10,4% con CM2021, no obstante, con CF2021 no existe diferencia significativa. Por otra parte, al comparar este periodo de encierro con el año 2020 se tiene que existió un aumento del 11,5% con CF2021 y una disminución

del 4,90% con CM2021. Estas diferencias entre criterios de índice de fase y la movilidad puede ser un indicador de que en el año 2021 las concentraciones de MP10 fueron mayormente afectadas por la movilidad que por la fase en que se encuentre cada comuna. En cambio, el año 2020 se vio afectada por ambas variables. La afección de la movilidad y las restricciones de movilidad se podría explicar en que la fuente principal de MP10 es el transporte, seguida por las fuentes residenciales (Universidad Santiago de Chile, 2014).

Para el MP_{2,5} con C2020 en las Figura 8 y Figura 10 nuevamente se tiene un aumento a través de los meses en las concentraciones para el periodo histórico, aunque esta vez también ocurre en el año 2021, mientras que el año 2020, presenta nuevamente una disminución en el mes de junio, para luego aumentar a julio y disminuir para el resto del periodo. De forma general, bajo C2020 solo se logra distinguir en los gráficos que el año 2020 posee las menores concentraciones, sin embargo, el año 2021 durante el mes de julio presenta las mayores concentraciones, no obstante, durante ese mes, dicho año no estaba en un periodo de encierro. Entre el periodo histórico y el año 2020 existe una disminución del 16,0% para CF2020 y una disminución del 15,5% para CM2020, mientras que entre el año 2020 y el año 2021 existe un aumento del 22,0% para CF2020 y del 18,6% para CM2020. Por otra parte, con C2021, mostrado en las Figura 9 y Figura 11, se tiene que todos los años analizados presentan un aumento en las concentraciones a través del periodo, en donde se observa que las concentraciones del año 2020 y el año 2021 tienen concentraciones semejantes al inicio del periodo superadas por el periodo histórico, luego se observa que las concentraciones del año 2021 son más altas entre el mes de mayo y junio, en donde también las concentraciones del periodo histórico son más altas que en el

2021. En efecto, a través de los cambios relativos presentados en la Tabla IV se muestra que entre el periodo histórico y el año 2021 las concentraciones disminuyen un 2,61% para CF2021 y un 8,68% para CM2021, mientras que entre el año 2020 al 2021 existe un aumento de las concentraciones del 14,8% para CF2021 y del 4,97% para CM2021. Estos resultados podrían explicarse en que nuevamente la movilidad para el año 2021 tiene una mayor incidencia en las concentraciones de MP2,5, mientras que el año 2020 tanto las restricciones impuestas como la movilidad se relacionan de semejante manera con las concentraciones.

Para el CO mediante C2020, indicado en las Figura 8 y Figura 10, se tiene un aumento de las concentraciones hasta el mes de junio para el periodo histórico, mientras que para el año 2020 y 2021 las concentraciones aumentan hasta julio. El año que presenta un máximo más alto es el 2021, seguido por el periodo histórico y el más bajo es durante el año 2020. Cabe destacar que, en julio, el año 2021 no se encontraba en periodo de encierro, lo que podría indicar un aumento en las emisiones de CO de fuentes móviles como el transporte. Por otra parte, gran parte del periodo de encierro se observa que las concentraciones del año 2021 son las mayores y las menores son del año 2020. El cambio relativo entre el periodo histórico y el año 2020, presentado en la Tabla IV, indica una disminución del 25,6% para CF2020 y 25,3% para CM2020, mientras que se muestra un aumento entre el año 2020 y 2021 del 45,3% y 44,0% para CF2020 y CM2021 respectivamente. Por otra parte, con C2021 (en las Figura 9 y Figura 11), se tiene un comportamiento similar al C2020, donde las concentraciones del año 2021 son mayores a excepción del mes de junio, donde las concentraciones del periodo histórico son

mayores. Asimismo, se evidencia un aumento de las concentraciones de CO entre el periodo historico y el año 2021, en la Tabla IV, del 4,96% y 2.61% para CF2021 y CM2021, siendo un cambio significativo según el test de Wilcoxon, ahora, entre el año 2020 y 2021, se tiene un aumento del 43,7% y 27,1% para CF2021 y CM2021. Este resultado indica la incidencia de la movilidad en el año 2021 para las concentraciones de CO, ya que, cuando se considera un periodo de encierro a través del índice de fase las concentraciones aumentan una menor cantidad. El hecho de relacionar las concentraciones de CO con la movilidad es por el uso del transporte, ya que el transporte es la principal fuente de emisión de CO (Universidad Santiago de Chile, 2014).

El NO a través de C2020, que se muestra en las Figura 8 y Figura 10, presenta un aumento en las concentraciones hasta junio en el periodo historico, mientras que en los años 2020 y 2021 este aumento es hasta julio. No obstante, durante todo el periodo de encierro las concentraciones del periodo historico son mayores, seguidas por el año 2021 y luego 2020. Entre el periodo historico y el año 2020 existe una disminución del 54,7%, mientras que del 2020 al 2021 existe un aumento del 55,1% para CF2020 y 54,0% para CM2020, dicho aumento se puede explicar a que durante el encierro 2020 se toma en cuenta meses, como julio, agosto, septiembre y octubre, que no se encuentra en periodo de encierro durante el 2021. Al analizar el NO mediante C2021, en las Figura 9 y Figura 11, se muestra que existe un aumento de las concentraciones a través del periodo de encierro en todos los años estudiados, donde, nuevamente las concentraciones del periodo historico son mayores, seguidas por el año 2021 y 2020. Entre el periodo historico al 2021 se tiene una disminución del 35,1% en CF2021 y del 55,3% en CM2021, mientras que entre el

2020 y el 2021 se tiene un aumento del 71,3% para CF2021 y del 52,5% para CM2021. Nuevamente se obtiene una diferencia marcada entre el CF2021 y el CM2021, lo cual se relaciona a que el año 2021 la movilidad tiene una mayor incidencia en la concentración del NO respecto a las restricciones de movilidad indicadas por el índice de fase. Esto toma relevancia especial en los óxidos de nitrógenos, ya que cerca del 76% de las emisiones de estos contaminantes provienen del transporte en el AMS (Universidad Santiago de Chile, 2014).

Siguiendo con el NO₂, se observa que a través de C2020 (Figura 8 y Figura 10), se tiene un aumento de las concentraciones a través del periodo, llegando a su máximo el mes de julio para los años 2020 y 2021, mientras que el máximo para el periodo histórico se presenta el mes de junio, cabe destacar, que durante ese mes existe una disminución en las concentraciones para 2020 y 2021 comparando con el mes de mayo. Previo al mes de julio, las concentraciones del periodo histórico son mayores, seguidas por el 2021 y luego el 2020. Durante el mes de julio las concentraciones del 2021 son mayores y luego tienden a igualarse al periodo histórico. Entre el periodo histórico y el 2020, las concentraciones de NO₂ disminuyen un 30,3% para CF2020 y un 29,3% para CM2020. Ahora, al analizar el NO₂ a través de C2021, se tiene que en gran parte del tiempo las concentraciones del 2021, por esto, se observa que en la Tabla IV se tiene una disminución del periodo histórico al 2021 del 15,2% para CF2021 y del 30,8% para CM2021. En cambio, entre el 2020 y el 2021 existe un aumento en las concentraciones del 28,0% y 17,8% para CF2021 y CM2021.

Los NO_x , presentan un comportamiento similar al NO , esto es debido a que las concentraciones de NO son más altas que las de NO_2 durante el periodo de encierro, lo cual puede atribuirse a que principalmente se evalúan meses fríos (Jacob et al., 1999; Kondo et al., 2004). En este caso, nuevamente se tiene que el periodo histórico presenta mayores concentraciones, seguido por el año 2021 y luego el año 2020. Esto también se refleja en la Tabla IV, donde del periodo histórico al año 2020, se tiene una disminución del 45,6% para el CF2020 y 44,8% para el CM2020. Mientras que, si se compara el periodo histórico con el año 2021, también se logra observar una disminución del 30,6% y 42,7% para el CF2021 y CM2021 respectivamente. Ahora, comparando el año 2020 y 2021, se tiene que las concentraciones aumentan: un 44,5% y 42,5% para CF2020 y CM2020 respectivamente, y un 42,3% y 25,8% para CF2021 y CM2021. Estas diferencias entre los criterios también son observables en los gráficos, y también podría darse a que con C2020 se toman meses y días donde el año 2021 no está en el periodo de encierro.

Finalmente, el O_3 presenta un comportamiento similar en todos los años, diferenciándose solo en los valores de concentraciones, donde se logra observar que el año 2020 presenta las mayores concentraciones, seguido por el año 2021 y luego el periodo histórico. En la Tabla IV, se tiene que del periodo histórico al 2020 existe un aumento del 48,5% para el CF2020 y 46,5% para el CM2020. Así como también se tiene una disminución del año 2020 al 2021, siendo esta del 21,36% y 15,76% para los CF2020 y CM2020. Mientras que con CF2021 y CM2021 la disminución es del 43,0% y 27,1% respectivamente. Estas diferencias de concentraciones que se da entre los años se puede atribuir de manera

indirecta a la pandemia, ya que la concentración de O_3 se relaciona con las concentraciones de NO_x , donde una disminución de NO_x en un área limitada a COVs, como lo es el AMS (Seguel et al., 2020), generará un aumento en las concentraciones de O_3 como se muestra en estos resultados (Jacob et al., 1999).

Para finalizar el análisis del periodo de encierro, es necesario destacar algo que se observa con C2021, se tiene que el CM2021 presenta menores disminuciones entre el año 2020 y 2021, lo cual podría considerarse que el criterio de movilidad en el año 2021 tiene una mayor relación con las fuentes de contaminantes, lo cual también se sustenta en que el periodo de encierro en función del índice de fase dura más tiempo que si se establece el encierro en función de la movilidad, lo cual indica que la movilidad aumenta a pesar de que las restricciones de movilidad existan. Esto se infiere a que en el año 2020 las diferencias entre estos criterios no son tan alta como en el 2021. Otro punto para acotar es que, como muestran los resultados, el año 2021 presentó mayores concentraciones de contaminantes respecto al año 2020, lo cual se podría relacionar a que, durante el año 2021, hubo una mayor movilidad que en 2020 como se muestra en la Figura 3.

Tabla IV: Cambio relativo de contaminantes y variables meteorológicas entre años históricos (Hist), 2020 y 2021 para el periodo encierro, con criterio de fase y movilidad. Cada cambio relativo es entre el o los años más antiguo respecto al más actual. *No existe diferencia significativa con $p < 0,05$. **No existe diferencia significativa con $p < 0,01$. ***No existe diferencia significativa con $p < 0,001$

Contaminante	Encierro: Cambio relativo (A-B)/A							
	Hist-2020		Hist-2021		2020-2021(2020)		2020-2021 (2021)	
	Fase (CF2020)	Movilidad (CM2020)	Fase (CF2021)	Movilidad (CM2021)	Fase (CF2020)	Movilidad (CM2020)	Fase (CF2021)	Movilidad (CF2021)
MP ₁₀ ($\mu\text{g m}^{-3}$)	-13,8%	-12,5%	-0,74%*	-10,4%	22,3%	18,6%	11,5%	-4,90%
MP _{2,5} ($\mu\text{g m}^{-3}$)	-16,0%	-15,5%	-2,61%*	-8,68%	22,0%	18,6%	14,8%	4,97%
CO (ppm)	-25,6%	-25,3%	4,96%	2,61%	45,3%	44,0%	43,0%	27,1%
NO (ppb)	-54,7%	-54,7%	-35,1%	-55,3%	55,1%	54,0%	71,3%	52,5%
NO ₂ (ppb)	-30,3%	-29,3%	-15,2%	-30,8%	35,5%	33,3%	28,0%	17,8%
NO _x (ppb)	-45,6%	-44,8%	-30,6%	-42,7%	44,5%	42,5%	42,3%	25,9%
O ₃ (ppb)	48,5%	46,5%	11,1%	11,9%***	-21,4%	-15,7%	-24,8%	-21,5%
Temperatura (°C)	-0,06%*	0,47%*	-4,26%	-10,6%	-2,82%	-2,65%*	-7,37%*	-12,4%
HR (%)	2,15%	1,23%**	6,04%	12,6%	-0,11%	-0,17%*	5,54%*	12,3%
Velocidad de viento (m s^{-1})	-1,22%*	0,24%*	-2,36%*	-1,54%*	8,78%	11,4%	1,35%*	-0,18%*

Periodo post encierro

En este caso, debido a que es el periodo que continúa cada año luego del encierro, también será necesario analizar respecto a cada criterio ya que existirá una variación entre estos, donde C2020 solo presenta meses cálidos, siendo de octubre a diciembre, mientras que C2021 presentan meses cálidos y fríos, desde julio hasta diciembre. Debido a esto, se espera que exista una diferencia en las concentraciones dado estos criterios.

En el periodo post encierro el MP_{10} presenta un comportamiento distinto para cada año. Si se observa a través de C2020, se tiene que el mes de octubre presenta las menores concentraciones para el año 2021 y el periodo histórico, mientras que el año 2020 presenta las menores concentraciones el mes de noviembre. Ahora, con C2021, se tiene que las concentraciones comienzan a disminuir pasando el mes de julio, sin embargo, el mes de julio el año 2021 presenta las concentraciones más altas. Al observar la Tabla V, se tiene que entre el periodo histórico el año 2020 existe un aumento en las concentraciones del 5,92% para el CF2020 y 7,38% para el CM2020, lo cual se puede observar en la Figura 8 y en la Figura 10, que esta diferencia está dada por el mes de octubre y diciembre principalmente. Algo semejante ocurre entre el periodo histórico y el 2021, donde se tiene un aumento del 6,95% para CF2021 y 6,20% para CM2021, sin embargo, este aumento puede estar dado principalmente por las concentraciones de julio, agosto y septiembre por lo que se observa en las Figura 9 y Figura 11. Si se compara el año 2020 con el año 2021, se tiene que existe una disminución con CF2020, mientras que con CM2020 no existe un cambio significativo, esto podría explicarse a que en ambos años se encuentran en un periodo de post encierro, en cambio con C2021, se tiene un aumento, lo cual podría atribuirse a que durante ese periodo el año 2020 estaba en encierro.

El $MP_{2,5}$ presenta un comportamiento diferente dependiendo el criterio utilizado. Con C2020, se tiene que todos los años poseen un comportamiento similar, disminuyendo a través de todo el periodo, con un aumento en las concentraciones en diciembre, a excepción del 2020, donde dicho aumento no se presenta. Mediante CF2021, el año 2021 tiene una disminución a través de todo el periodo, mientras que con CM2021 se presenta

el máximo de concentración dado en julio para luego disminuir las concentraciones. Se logra observar que durante el periodo de post encierro las concentraciones del 2020 no se diferencian mucho del periodo histórico, a excepción de diciembre, con lo que podría explicar porque en la Tabla V se muestra una disminución del 5,78% para CF2020, mientras que para CM2020 no existe un cambio significativo. Para el caso del 2021, se tiene que a principio del periodo las concentraciones son las más altas y luego disminuyen, lo que explicaría por que existe un cambio tan bajo en las concentraciones al compararlas con el periodo histórico, siendo un aumento de 0,12% para el CF2021 y una disminución del 0,31% para CM2021, sin embargo, estos cambios si se consideran significativos según el test de Wilcoxon, lo que se podría explicar mediante el grafico presentado en las Figura 9 y Figura 11, ya que el test de Wilcoxon calcula la diferencia significativa entre dos poblaciones ordenándolas y luego calcula la diferencia entre cada par ordenado. Como se puede observar en los graficos mencionados, la distribución de las concentraciones entre el periodo historico y el año 2021 es diferente, ya que en un momento las concentraciones del año 2021 son mayores y luego son menores que las del periodo historico, es por esto por lo que el promedio se acerca bastante, sin embargo, la distribución si presenta un cambio significativo (“Wilcoxon Test,” 2008). Sin embargo, esto solo ocurre en este caso particular. Ahora al comparar el 2020 con el 2021, se tiene una disminución significativa con CF2020, siendo del 7,12%, en cambio, se tiene un aumento en las concentraciones del 15,09% y 16,65% para CF2021 y CM2021 respectivamente. Nuevamente se observa un aumento con C2021, lo cual se asocia a que el año 2020 en ese periodo estaba en periodo de encierro, ya que, en el caso que ambos

años estén en periodo post encierro (C2020) se tiene una disminución de las concentraciones.

Ahora, en el caso del CO se observan comportamientos más similares entre los criterios, obviando el aumento que existe en julio para C2021. Se tiene que las concentraciones tienen una disminución a lo largo del post encierro, donde se muestra que las concentraciones más altas las presenta el año 2021. En efecto, al comparar el periodo histórico con el año 2021 se tiene un aumento del 13,9% con CF2021 y de 11,0% con CM2021, luego entre el 2020 y 2021 se tienen aumentos entre el 42,9% y 46,6%, dependiendo del criterio. Por el contrario, el año 2020 presenta las menores concentraciones, teniendo una disminución del 16,7% y 13,2%, a través de CF2020 y CM2020, al compararlo con el periodo histórico. Para atribuir el cambio de las concentraciones de CO, es necesario evaluar la fuente de emisión. La principal fuente de emisión del CO proviene del transporte (Universidad Santiago de Chile, 2014), por lo que se podría indicar que en la fase de apertura en el año 2021 existe un uso mayor del transporte lo que tiene sentido al observar la Figura 3, donde se evidencia una mayor movilidad al finales del año 2021 que el año 2020, dando así mayores concentraciones de este contaminante.

Siguiendo con el NO, se tiene que luego del máximo dado en julio, todos los criterios y años presentan una disminución en sus concentraciones. Esta disminución es importante debido a que en el mes de julio se tiene un rango de concentración de 100 ppb, para luego disminuir a un rango máximo 12 ppb en octubre. En todos los casos se presenta que las concentraciones más altas son del periodo histórico, seguida por el 2021 y luego 2020. El

NO logra disminuir un 39,7% y 29,2% en CF2020 y CM2020, desde el periodo histórico al 2020, mientras que disminuye un 25,7% y 28,6% en CF2021 y CM2021 entre el periodo histórico y el año 2021. También se tiene que bajo CF2020, no se aprecia un aumento significativo entre 2020 y 2021. En cambio, con CM2020 se tiene un aumento del 7,31%. Esto se podría deber al tipo de distribución que presentan estos sets de datos comparados. Si se utiliza CF2021 y CM2021, se tiene que existe un aumento del 40,2% y 51,8% respectivamente. Nuevamente esto se explica a que en criterio 2020 ambos años están en post encierro, mientras que con criterio 2021, no, por lo que se estaría comparando un periodo de mayor movilidad (2021) con otro de menor movilidad (2020).

Para el NO₂ se observa que a través de C2020 (en las Figura 8 y Figura 10) existe una disminución de las concentraciones en el periodo de post encierro, donde se muestra que las mayores concentraciones se presentan en el periodo historico y el año 2021, siendo estas concentraciones muy similares, y las concentraciones mas bajas se dan el año 2020. Al observar la Tabla V, se tiene una disminución entre el periodo historico y el 2020 del 12,8% para CF2020 y 11,0% para CM2020. Ahora, bajo C2021 (Figura 9 y Figura 11) se tiene que existe un máximo de concentraciones para el año 2021 en el mes de julio, el cual es una concentración mayor respecto a la que se presenta en el periodo historico, sin embargo, desde este mes las concentraciones comienzan a disminuir y el periodo historico con el año 2021 presentan concentraciones semejantes, lo cual se evidencia al calcular el cambio relativo entre el periodo historico y el año 2021, donde no se encuentran cambios significativos.

Continuando con los óxidos de nitrógeno, el NO_x también muestra una disminución a través del post encierro, donde se exhibe la principal diferencia en CF2021, ya que, a inicios del periodo, el año 2021 tiene mayores concentraciones y luego estas son menores que el periodo histórico. Nuevamente se muestra que el año 2020 tiene las menores concentraciones en todo el periodo, dando una disminución, desde el periodo histórico, del 22,5% y 16,3% para el CF2020 y CM2020. Asimismo, el año 2021 también presenta unas disminuciones desde el periodo histórico, siendo estas del 12,7% y 18,3%, diferenciándose del NO_2 , la cual no presento diferencias significativas, de manera que esta diferencia se puede atribuir principalmente al NO , o sea, al periodo de invierno, donde la proporción de NO/NO_2 es mayor (Kondo et al., 2004). En los graficos de C2021 (Figura 9 y Figura 11) se aprecia que existe un aumento en las concentraciones del 2020 al 2021, siendo estas del 33,8% y 38,8% para CF2021 y CM2021. En cambio, al analizar el C2020, se tiene que no existen diferencias significativas entre estos años. Esto se puede explicar a que bajo C2020 ambos años están en un periodo post encierro, por lo tanto, la movilidad y las restricciones de movilidad se asemejan, por lo que las emisiones de NO_x asociadas al transporte tienden a ser semejantes.

Finalmente, el O_3 presenta un comportamiento similar en los años 2020 y 2021, donde muestra una baja de concentraciones entre octubre y noviembre y luego un aumento de noviembre a diciembre, lo que no ocurre en el periodo histórico, el cual aumenta constantemente a través del periodo post encierro. En este caso, se tiene que existe un aumento en las concentraciones de los años de pandemia respecto al periodo histórico. Entre el periodo histórico y el 2020 el aumento es de 23,7% y 18,8% para CF2020 y

CM2020, mientras que entre el periodo histórico y el 2021 el aumento es del 26,6% y 25,5%. Entre el 2020 y 2021, no existen diferencias significativas con C2020, sin embargo, con C2021 se tiene una disminución del 1,09% y 4,17% con CF2021 y CM2021, lo cual se puede relacionar con las diferencias presentadas en las concentraciones de NO_x, ya que la formación de O₃ en la troposfera tiene una relación inversa con los NO_x en áreas limitadas en COVs como lo es el AMS (Seguel et al., 2020).

Tabla V: Cambio relativo de contaminantes y variables meteorológicas entre años históricos (Hist), 2020 y 2021 para el periodo post encierro, con criterio de fase y movilidad. Cada cambio relativo es entre el o los años más antiguo respecto al más actual.

*No existe diferencia significativa con $p < 0,05$. **No existe diferencia significativa con $p < 0,01$. *** No existe diferencia significativa con $p < 0,001$

Contaminante	Post encierro: Cambio relativo (A-B)/A							
	Hist-2020		Hist-2021		2020-2021(2020)		2020-2021 (2021)	
	Fase (CF2020)	Movilidad (CM2020)	Fase (CF2021)	Movilidad (CM2021)	Fase (CF2020)	Movilidad (CM2020)	Fase (CF2021)	Movilidad (CF2021)
MP ₁₀ (µg m ⁻³)	5,92%	7,38%	6,95%	6,20%	-3,62%	-1,16%*	13,9%	16,5%
MP _{2,5} (µg m ⁻³)	-5,78%	-4,70%***	0,12%	-0,31%	-7,12%	-2,40%*	15,1%	16,6%
CO (ppm)	-16,7%	-13,2%	13,9%	11,0%	42,9%	44,3%	44,7%	46,6%
NO (ppb)	-39,7%	-29,2%	-25,7%	-28,6%	18,9%***	7,31%	40,1%	51,8%
NO ₂ (ppb)	-12,8%	-11,0%	1,34%*	-1,91%***	10,1%	6,4%**	28,7%	29,5%
NO _x (ppb)	-22,5%	-16,3%	-12,7%	-18,3%	10,9%**	4,00%*	33,8%*	38,8%
O ₃ (ppb)	23,7%	18,8%	26,6%	25,6%	3,35%**	3,54%**	-1,09%	-4,17%
Temperatura (°C)	-1,29%*	-1,99%**	-3,54%	-1,84%***	-0,14%*	1,25%*	-1,53%*	-1,07%*
HR (%)	1,01%*	3,29%***	1,47%**	1,61%***	1,43%*	3,16%***	-0,69%*	-0,30%*
Velocidad de viento (m s ⁻¹)	-0,83%*	-2,33%**	5,68%	3,86%	5,78%***	3,37%**	5,56%	4,05%

Analizando los resultados de variación mensual, se observa que las diferencias principales entre los años estudiados son en periodo de encierro y post encierro, donde se observa que las concentraciones para los años 2020 y 2021 disminuyen para cada periodo de encierro respectivo. Sin embargo, solo el año 2020 presenta menores concentraciones en el periodo post encierro, mientras que el año 2021 se observa que las concentraciones aumentan respecto al periodo historico, a excepción del NO, donde se observa una disminución. Cabe destacar, que tanto en periodos de encierro como en post encierro las concentraciones de O₃ aumentaron. Por otra parte, se realizo un analisis de como varía están concentraciones en periodos semejantes a los de pre encierro, encierro y post encierro entre los años 2017 a 2018 y 2018 y 2019, esto para poder establecer si estos cambios de concentración son una tendencia entre los años independiente de la pandemia. Estos resultados se muestran en el Anexo 2 y Anexo 3. Estos resultados indican que en el periodo semejante al pre encierro no existen cambios significativos entre los años 2017 y 2018 para el MP₁₀, NO_x y O₃, mientras que el MP_{2,5}, el CO, NO y NO₂ no presentan una tendencia clara. El periodo de encierro el MP_{2,5}, NO, NO_x y O₃ no presentan cambios a traves del periodo historico, mientras que el MP₁₀, CO y NO₂ no presentan una tendencia clara, lo que indica que los cambios presentados por el NO, NO_x, MP_{2,5} y O₃ durante los años 2020 y 2021 en el periodo de encierro son atribuibles a la pandemia. En el periodo post encierro, se tiene entre el año 2017 y 2018 no existen cambios significativos en ninguno de los contaminantes analizados, en cambio, entre el 2018 y el 2019 todos los contaminantes presentan un cambio significativo, por lo que no se observa una tendencia clara, para poder compararlos con el post encierro del 2020 y 2021.

Diferencias en la variación horaria

En las Figura 12, Figura 13: Variación horaria de contaminantes para el periodo de encierro bajo criterio de fase 2020 (CF2020), criterio de fase 2021 (CF2021), criterio de movilidad 2020 (CM2020) y criterio de movilidad 2021(CM2021). y Figura 14: Variación horaria de contaminantes para el periodo de post encierro bajo criterio de fase 2020 (CF2020), criterio de fase 2021 (CF2021), criterio de movilidad 2020 (CM2020) y criterio de movilidad 2021 (CM2021). Se muestra la variación horaria de contaminantes para los periodos de pre encierro, encierro y post encierro respectivamente. En cada figura, para cada contaminante se muestran cuatro gráficos, estos se diferencian en el criterio para el periodo CF2020, CM2020, CF2021 y CM2021, de esta manera se puede observar cómo varía el comportamiento entre criterios tanto para el año del mismo criterio como el de los otros a analizar.

Periodo de pre encierro

En la Figura 12 se muestra la variabilidad horaria para el periodo de pre encierro, aquí se observa que no existen mayores diferencias entre los criterios, lo cual tiene coherencia, ya que la diferencia de días entre estos criterios es baja. Llegando a analizar cada contaminante, se da cuenta de que para el MP_{10} , $MP_{2.5}$, NO, NO_2 y NO_x el año 2021 presenta las menores concentraciones de forma general, esto podría ser explicado, que durante ese periodo de tiempo, a pesar de considerarse pre encierro por la baja cantidad de restricciones de movilidad, estas aún existen, sin embargo, el año 2020 no presenta concentraciones similares al periodo histórico, siendo menores que este periodo para el

caso de $MP_{2,5}$, NO, NO_2 y NO_x , por lo que esta baja de concentraciones del año 2020, no necesariamente se puede dar por esta baja de movilidad.

En el caso de MP_{10} se tiene que el año 2020 presenta las mayores concentraciones durante todo el día, seguido por el periodo histórico. En el caso de este contaminante, entre los años solo varía el valor de las concentraciones, ya que el comportamiento horario es similar. Esto también ocurre con el $MP_{2,5}$. El MP_{10} presenta un aumento de las concentraciones cerca de las 6 horas, luego baja levemente, donde se mantiene alta hasta cerca de las 18 horas, para luego bajar a su mínimo diario.

El $MP_{2,5}$ presenta un aumento pasado las 6, donde mantiene estas concentraciones hasta cerca de las 12, luego disminuye. Cabe destacar que el periodo histórico presenta un leve aumento entre las 18 y 23 horas, lo cual no se observa en los años 2020 y 2021. Esto se puede relacionar con el cambio de los patrones de movilidad por el efecto de la pandemia, donde existe un menor uso de transporte el cual es una de las fuentes principales del $MP_{2,5}$ (Bedoya-maya et al., 2022; Universidad Santiago de Chile, 2014).

El NO tiene un patrón similar en todos los años, donde existe una concentración constante durante el día donde solo existe un máximo cerca de las 6 horas, por otra parte, se observa que solo el periodo histórico presenta un leve aumento de concentraciones cerca de las 23 horas, en cambio, para el año 2020 y 2021 este aumento no es observable. En el máximo de concentración es donde se logra observar diferencias entre el periodo histórico, el año 2020 y 2021, donde el periodo histórico presenta las mayores concentraciones, seguidas

por el año 2020 y luego el año 2021, durante la madrugada también se logra observar dicha diferencia.

Siguiendo con el NO_2 , se tiene que para todos los años estudiados existe un comportamiento similar se diferencia en los valores de concentraciones, como se explicó anteriormente, principalmente en el momento donde se acerca a los dos máximos diarios es donde se observa una mayor diferencia entre las concentraciones del periodo histórico, 2020 y 2021. El comportamiento observado es un aumento de las concentraciones pasado las 6 horas, donde estas concentraciones comienzan a disminuir hasta pasado las 13 horas, donde se encuentra un mínimo de concentración, y luego comienza a aumentar. También se observa que existe un aumento de las concentraciones cerca de las 23 horas, donde se tiene que en el año 2021 tiene un leve desplazamiento de este máximo.

En el caso de los NO_x se tiene que al comparar los años históricos con el 2020 y 2021, existe un desplazamiento del máximo a través del día, donde el valor máximo diario de los 2020 y 2021 ocurre aproximadamente cerca de las 5 horas, mientras que el máximo dado en el periodo histórico es cerca de las 6 horas. Esto además de que se visualiza una diferencia de concentraciones como se mencionó anteriormente.

Para el caso del CO se tiene que durante todos los años el máximo de concentración ocurre cerca de las 6 horas, luego disminuyen las concentraciones hasta un mínimo entre las 12 y 18 horas. Es durante esta disminución donde se logra observar diferencias de concentraciones entre los años, donde el año 2021 presenta las mas altas concentraciones, seguidas por el año 2020 y luego el periodo histórico presenta las menores

concentraciones. La diferencia dada entre el periodo historico y los años 2020 y 2021, puede estar explicada en la emisión de CO residenciales, ya que esta contribuye cerca de un 20% de las emisiones anuales de CO, por lo que, al disminuir la movilidad por las leves restricciones de movilidad dadas en este periodo podría conllevar a un aumento en las emisiones de CO (Universidad Santiago de Chile, 2014)

Finalmente, el O₃ posee concentraciones y comportamientos similares para todos los años, solo se logra distinguir que las concentraciones más altas son durante el 2020, lo que se puede relacionar con las menores concentraciones de NO_x durante el año 2020, ya

que al disminuir el NO_x ocurre un aumento de O_3 (Seguel et al., 2020). El máximo de las concentraciones en todos los años ocurre cerca del mediodía.

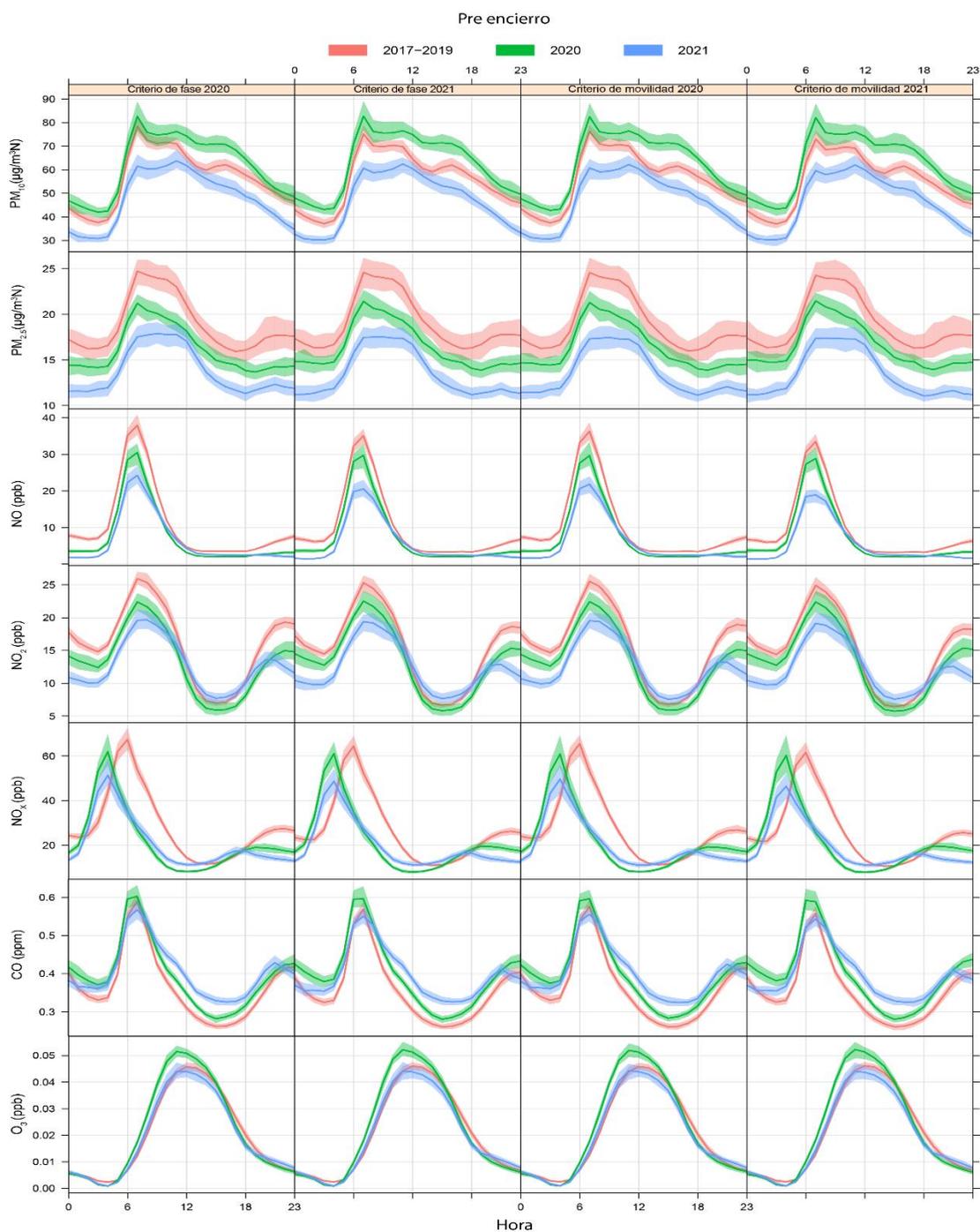


Figura 12: Variación horaria de contaminantes para el periodo de pre encierro bajo criterio de fase 2020 (CF2020), criterio de fase 2021 (CF2021), criterio de movilidad 2020 (CM2020) y criterio de movilidad 2021 (CM2021).

Periodo de encierro

En la Figura 13 se muestra la variación horaria de los contaminantes en periodo de encierro, bajo distintos criterios de tiempo para encierro. Para el CF2020 el encierro contempla desde el día ISO 88 hasta el día 252, es decir se toman meses desde marzo hasta septiembre, mientras que para el CF2021 el encierro es del día ISO 81 hasta el 176, o sea desde el mes de marzo hasta junio. Para el CM2020 el encierro comienza el día ISO 85 terminando el 280, es decir desde marzo hasta octubre, el CM2021 abarca el periodo del 78 al 119, tomando marzo y finales de abril o principio de mayo dependiendo el año. Teniendo esto en cuenta, es esperable que existan diferencias entre C2020 y C2021.

El MP_{10} presenta dos máximos durante el día, uno entre las 12 y 18 horas, y otro cerca de las 21 horas, siendo este de mayor concentración. En los distintos criterios presentados se observa que las menores concentraciones pertenecen al año 2020, aunque con CM2021 se observa que las concentraciones del año 2021 y 2020 son similares, aunque con CF2021 solo presentan una diferencia en el máximo alcanzado durante la noche, donde las concentraciones del 2021 se acercan a las concentraciones del periodo historico. De esta misma manera, con C2020 las concentraciones del periodo historico y el año 2021 se asemejan.

Siguiendo con el $MP_{2,5}$, nuevamente se presenta que CM2021 posee un comportamiento distinto a los demás criterios, además de presentar concentraciones menores. Este comportamiento solo se diferencia que el máximo de dicho criterio ocurre durante la mañana, manteniendo esta concentración hasta el mediodía, presentando un mínimo, que se presenta en los demás criterios, cerca de las 18 horas, para luego aumentar hasta las 22 aproximadamente. Los otros criterios presentan el máximo es durante la noche. Los cambios que se presentan a través de los distintos criterios se pueden atribuir principalmente a los meses que evalúa cada uno, debido a que el CF2020 presenta concentraciones de julio, al igual que el CM2020, sin embargo, este criterio también evalúa un tiempo en octubre en donde se presentan menores concentraciones, por lo que el promedio generado tenderá a bajar como se observa al comparar CF2020 y CM2020. Otro cambio que se puede observar en la variación horaria es que el año 2020 presenta las menores concentraciones en la mayoría de los criterios. En criterios CM2020, CF2021 y CF2021, se tiene que el año 2021 posee concentraciones similares al periodo histórico, en cambio, en CM2021 las concentraciones del año 2021 se acercan más al año 2020. Esto se puede deber a que con C2020 el año 2021 presenta un periodo de aproximadamente de tres meses que no se encuentra en encierro, por lo que el material particulado asociado a transporte como fuente de emisión, tendera a aumentar, y aproximarse mas tiempos donde no existían restricciones de movilidad, como el periodo historico. Por otra parte, con CF2021, también se tiene una similitud de las concentraciones de $MP_{2,5}$ con el periodo historico, lo cual se podría asociar a que a pesar

de que existan restricciones de movilidad, esta igual aumenta como se observa en la Figura 3.

Con el NO se tiene nuevamente que se sigue un patrón horario en el periodo de encierro, donde existen dos máximos de concentraciones, uno pasado las 12 del día y otro cerca de las 21 horas. También se observa que existe una disminución desde el primer máximo hasta cerca de las 17 horas, en dicha disminución también se observa que el año 2020 y 2021 posee concentraciones similares. Con C2020 y CF2021 se tiene que entre el año 2020 y 2021 existe un aumento de las concentraciones, aunque estas no llegan a ser mayores que las del periodo histórico. En cambio, con CM2021 las concentraciones del 2020 y 2021 son similares.

Siguiendo con el NO₂ se observa que se presenta el mismo comportamiento durante todos los años y criterios, pero con diferencia de los valores en las concentraciones entre los años. Con C2020, se tiene que la menor concentración fue del año 2020, mientras que el resto de los años presentaron concentraciones semejantes, mientras que con CF2021 las concentraciones del año 2021 fueron levemente menor que el periodo histórico. Con CM2021, se observa que la concentración del periodo histórico fue más alta que los dos años de pandemia y el año 2020 con el 2021 tiene concentraciones similares, con un leve aumento para el año 2021.

Para seguir con los NO_x, es necesario tener en cuenta que durante el periodo de encierro las concentraciones de NO en general fueron mayores que NO₂. Los NO_x exhiben un patrón diario que se repite a lo largo de los años y criterios, en donde se tiene que los

valores de concentración difieren entre años principalmente. Se observa que existe un desplazamiento de las concentraciones máximas en los años 2020 y 2021, donde el valor máximo ocurre levemente más temprano. Otro punto para destacar es que nuevamente el CM2021 presenta diferencias notorias, dada por los valores de concentración, en donde en este último criterio son menores. De forma general, se tienen dos máximos durante el día, cercano a las 6 y 18 horas.

Para el CO, se tiene que todos los años poseen un patrón horario similar, donde existe un máximo cerca de las 22 horas, luego una disminución previa a las 6, donde comienza a aumentar nuevamente hasta cerca de las 9 horas, para luego disminuir hasta antes de las 18 horas para aumentar hasta su máximo mencionado. En los distintos criterios presentados se observa que las menores concentraciones son del año 2020. Con C2020 las concentraciones del 2021 son levemente mayores al periodo histórico durante el día. Por otra parte, esto también ocurre con C2021, sin embargo, se observa que existe una disminución de las concentraciones del 2021 en comparación al periodo histórico durante el máximo presentado en la noche. La diferencia observada entre el periodo histórico, el año 2020 y el año 2021, se puede asociar a la movilidad, ya que es un factor en el uso de transporte y a las emisiones residenciales, ya que ambas fuentes son las principales fuentes de CO en la AMS (Universidad Santiago de Chile, 2014). Esto tiene mayor sentido al comparar solo el año 2020, ya que es la que siempre presenta menores concentraciones y es la que presenta una menor movilidad en el periodo de encierro.

El O₃ presenta un comportamiento similar en todos los periodos, en donde se observa un máximo diario cercano a las 12 del día. En todos los casos se observa que las mayores

concentraciones son, levemente, del año 2020 seguido por el 2021. También se observa que las concentraciones bajo el CM2021 son mayores, sin embargo, esto puede estar dado por que, bajo este criterio, el periodo de encierro no contempla periodos fríos, por lo que existirá una mayor actividad fotoquímica en la atmosfera que promueva la formación de O_3 (Rubio & Lissi, 2014). El hecho de que existan mayores concentraciones en el año 2020 y 2021 se puede deber a que durante esos años existen menores concentraciones de óxidos de nitrógenos, por lo que, en un área limitada en COVs, como lo la AMS, una disminución de NO_x provocara un aumento de O_3 como se indica en la ecuación (3) (Jacob et al., 1999; Seguel et al., 2020).

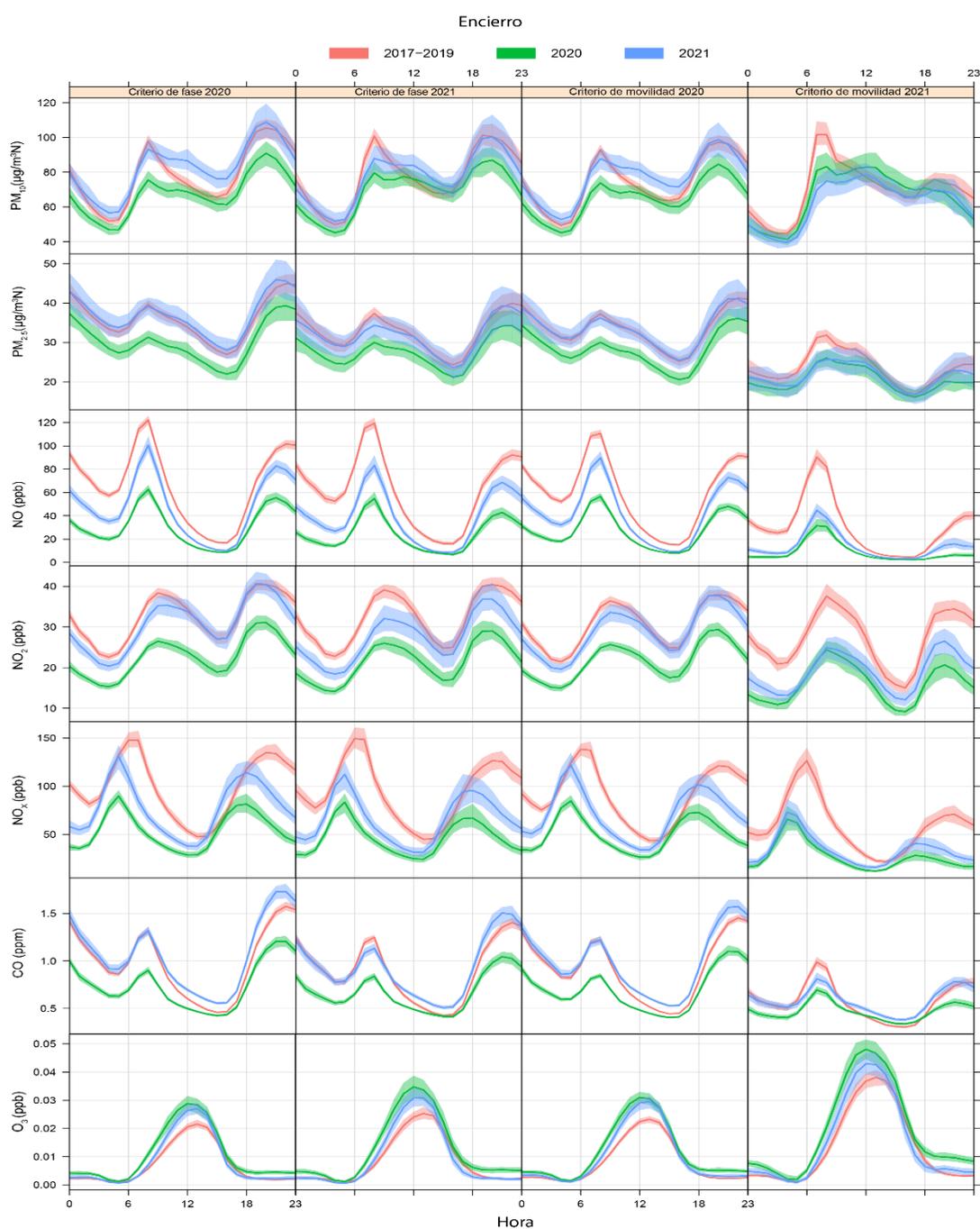


Figura 13: Variación horaria de contaminantes para el periodo de encierro bajo criterio de fase 2020 (CF2020), criterio de fase 2021 (CF2021), criterio de movilidad 2020 (CM2020) y criterio de movilidad 2021 (CM2021).

Periodo post encierro

En la Figura 14 se muestra la variación horaria de contaminantes para el periodo post encierro bajo distintos criterios. Cabe destacar que, bajo CF2020 y CM2020 se tiene solo temporadas cálidas (primavera y verano), mientras que con CF2021 y CM2021 contempla ambos tipos de temporadas. Con esto se puede esperar que existan diferencias entre estos dos criterios, principalmente en los niveles de concentración de contaminantes debido a que estas aumentan en periodos fríos a excepción del O₃ (Schmitz, 2005; Toro A. et al., 2014).

El MP₁₀ muestra un comportamiento distinto dependiendo del criterio, sin embargo, cabe destacar que en todos los criterios existe una concentración mínima que se da previo a las 6 horas, para luego aumentar. Con CF2020, es decir, donde tanto 2020 y 2021 están en un periodo post encierro, se muestra que no existe un máximo como tal, sino que las concentraciones se mantienen altas durante el día y van cayendo a través de la tarde-noche para llegar el mínimo mencionado anteriormente. Con los CF2021 y CM2021 se tiene que existen dos máximos durante el día, entre los cuales solo baja levemente la concentración de MP₁₀, lo cual no se logra distinguir en CF2020 y CM2020. En CF2021 y CM2021 solo el año 2021 está en periodo post encierro y durante ese periodo el comportamiento de las concentraciones del año 2020 es similar a los demás años con la diferencia que el máximo presentado en el periodo histórico es más pronunciado, por lo tanto, dicho comportamiento no se puede atribuir a las medidas de restricción.

Con el MP_{2,5} ocurre algo semejante con el MP₁₀, donde se destacan las diferencias entre los C2020 y C2021. Bajo los criterios 2020 se tienen menores concentraciones y solo un

aumento no mayor a $20 \mu\text{g m}^{-3}$ durante el día, lo cual ocurre en todos los años estudiados, siendo el 2021 el año con menores concentraciones. Con el criterio de fase 2021 se tienen mayores concentraciones, además de que existen dos máximos, uno entre las 6 y 12 y otro entre las 18 y 24 horas, donde estos máximos no se diferencian mucho entre sus valores. Cabe destacar que solo C2021 se observa que las concentraciones del año 2020 son las menores, lo cual se puede deber a que durante ese tiempo el año 2020 todavía se considera en periodo de encierro.

Para el NO se observa que independiente del criterio del periodo post encierro, las concentraciones del periodo historico se mantienen mayores. Por otra parte, con C2020 no se logra observar una diferencia en las concentraciones entre el año 2020 y 2021, mientras que con C2021 las concentraciones del año 2020 son menores que las del año 2021, lo cual, nuevamente se puede explicar por el hecho que con C2020 ambos años están en un periodo post encierro, a diferencia que con C2021, donde el año 2020 presente un breve periodo de encierro. Otro punto por analizar es que con C2020 se tiene solo un máximo durante el día, alrededor de las 12 horas, para luego disminuir las concentraciones y mantenerse constantes. En cambio, con C2021 se observan dos máximos, uno durante las 12 y otro cerca de las 22 horas. Esto se puede explicar por el hecho de que con C2021 se toman periodos fríos, donde se observaron también este comportamiento en el analisis del periodo de encierro mostrado en la Figura 11.

El NO₂ no presenta una diferencia notoria entre los criterios en términos de comportamiento, sin embargo, con C2020 se observan concentraciones menores que con C2021, además de que en C2021 se observa que el año 2020 presenta concentraciones

menores que el periodo histórico y el 2021. Esto podría estar relacionado con la movilidad reducida ocurrida en el 2020, ya que con el C2021 se tienen meses que en 2020 están en periodo de encierro. En cambio, si se observa el C2020 no se logra apreciar las diferencias de concentraciones entre años. Evaluando el comportamiento de este contaminante se observa que posee dos máximos a través del día, uno cercano a las 6 y otro entre las 18 y 23 horas.

En el caso de los NO_x se observa que posee un comportamiento más cercano al NO que al NO_2 , ya que se muestran dos máximos diarios con C2021 y solo un máximo con C2020, sin embargo, se observa un desplazamiento de los máximos en los años 2020 y 2021 con respecto al periodo histórico. En este caso se logra observar menores concentraciones para C2020. Bajo C2021 se tiene una menor concentración del año 2020, esta diferencia entre los criterios se puede asociar a la movilidad, ya con C2020 se tiene que en ambos años se está en el periodo post encierro, en cambio, con C2021, el año 2020 presenta un breve periodo de encierro, lo cual indicaría una menor emisión de contaminantes (NO_x en este caso) debido a las restricciones de movilidad.

Para el CO se tiene bajo cualquier criterio las concentraciones del año 2021 son las mayores, seguidas por el periodo histórico y luego el año 2020. Por otra parte, se tienen cambios en los patrones asociados a la diferencia entre C2020 y C2021, donde en C2021 se presentan dos máximos, mientras que con C2020 se tiene un máximo cerca de las 12 que baja durante el día para nuevamente aumentar cerca de las 22 horas. Esto se asocia a que bajo C2020 es un periodo cálido, donde las concentraciones son menores y por lo tanto su variación durante el día también será menor.

El O_3 presenta un comportamiento similar bajo todos los criterios, donde no se llega a identificar diferencias de concentraciones entre los años. Solo se puede identificar que bajo los criterios 2021 las concentraciones son menores, lo cual puede ser atribuido a menores temperaturas o a mayores concentraciones de NO_x ya que la AMS se considera un área limitada por VOC, por lo que un aumento en las concentraciones de NO_x existirá una disminución en las concentraciones de O_3 (Rubio & Lissi, 2014; Seguel et al., 2020).

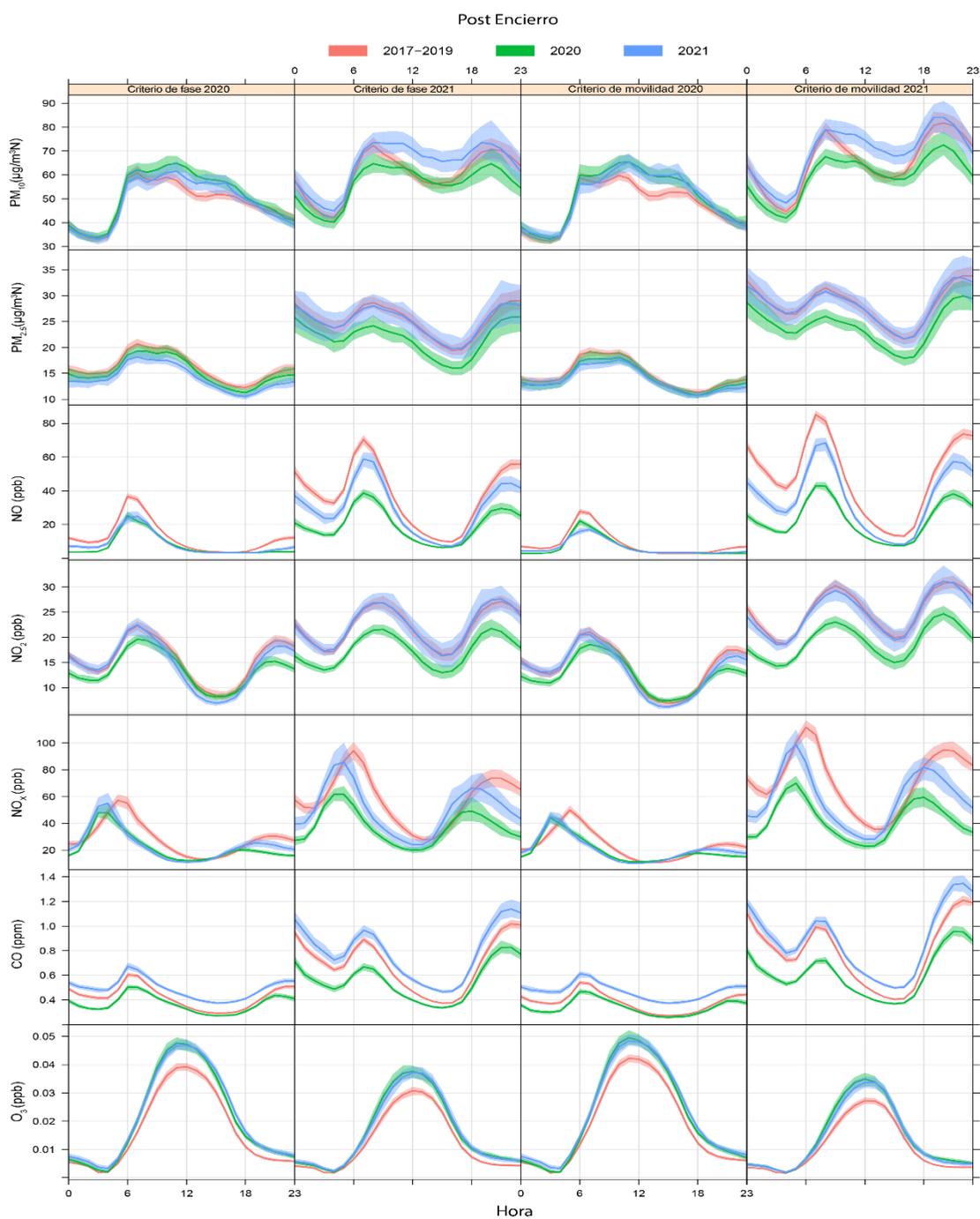


Figura 14: Variación horaria de contaminantes para el periodo de post encierro bajo criterio de fase 2020 (CF2020), criterio de fase 2021 (CF2021), criterio de movilidad 2020 (CM2020) y criterio de movilidad 2021 (CM2021).

Finalizando el análisis de estos resultados, se tiene que en general el año 2020 es el año que presenta menos concentraciones en periodos de encierro y post encierro, a excepción del O₃, el cual presenta un aumento en las concentraciones, lo cual concuerda con varios estudios que analizan el comportamiento del año 2020 producto de la pandemia, y se explica por lo mencionado anteriormente: con una disminución de las concentraciones de NO_x se tiende a aumentar las concentraciones de O₃ debido a que se encuentra en un arena limitada en COVs, como el AMS (Albayati et al., 2021; Jacob et al., 1999; Khan et al., 2022; Kotnala et al., 2020; Seguel et al., 2020).

Otro aspecto para destacar de los resultados es que, a través de la pandemia y el periodo de encierro descrito, se observa que las concentraciones de los contaminantes aumentan en épocas frías, a pesar de que existen mayores restricciones de movilidad en el caso del año 2020, por lo tanto, las concentraciones de contaminantes no solo son afectadas por la movilidad, sino también por la variabilidad estacional que posee la AMS. Este aumento en las concentraciones en épocas frías se debe a la geografía de la AMS, en donde esta rodeada de cerros, principalmente la cordillera de los Andes hacia occidente y la cordillera de la Costa hacia el oriente, por lo que en periodos fríos al bajar de altura la capa de inversión térmica, produciendo un efecto conocido como “tapa de olla”, en donde los contaminantes no superan dicha altura y su dispersión se ve reducida, provocando altas concentraciones como se observó en los resultados (Schmitz, 2005; Toro A. et al., 2014).

Con el análisis de la variación de concentraciones del año 2021 se logra demostrar que, efectivamente, en periodos de encierro existe una menor concentraciones de

contaminantes, a excepción del CO y el O₃, los cuales se mantuvieron altos en este periodo comparando con el periodo histórico. Lo anterior se establece debido a que al finalizar el periodo de encierro en el año 2021 se tiene un aumento de las concentraciones, siendo mayores que en el periodo histórico. Esto se podría relacionar con la pandemia, en donde para evitar el contacto en el transporte público se optó por usar medios privados de transporte aumentando el flujo vehicular, tal como se ha registrado en otros países como India y Bangladesh, con esto la emisión de contaminantes relacionados a estos, como material particulado, CO y NO_x (Paul et al., 2022; Universidad Santiago de Chile, 2014)

Con la formulación de distintos criterios para establecer los periodos de pre encierro, encierro y post encierro, se logró comparar como estos criterios tienen relación con la movilidad, el índice de fase y las concentraciones de contaminantes. Entre CF2020 y CM2020 no se identificaron mayores diferencias en el comportamiento horario, por lo que se tiene que ambos criterios fueron equivalentes, a pesar de que varían en duración por cada periodo. En cambio, el CF2021 y CM2021 presentaron diferencias, donde las concentraciones del año 2021 fueron menores en el periodo de encierro dadas por CM2021. Esto podría indicar que la relación entre movilidad y fase en el año 2021 fue menor que en el año 2020, lo cual, tendría sentido, ya que al mirar la Figura 3, se observa que la movilidad en el año 2021 en general fue mayor que en el 2020.

CONCLUSIONES

A través de la estimación de la significancia de las diferencias entre las concentraciones del periodo histórico (2017 a 2019), el año 2020 y 2021, se logra identificar que existe una diferencia de concentraciones de contaminantes entre estos años de forma general, donde se determinó que el año 2020 es el que presenta las menores concentraciones para NO, NO₂, NO_x y CO y las mayores concentraciones para O₃. En el caso de MP₁₀ no se logró identificar diferencias significativas entre los años estudiados, mientras que el MP_{2,5} si presentó una disminución entre el periodo histórico y los años de pandemia. Por otra parte, se vio un aumento del CO en el año 2021 al compararlo con el periodo histórico.

Para poder estudiar como las restricciones de movilidad (es decir la aplicación del Plan Paso a Paso) y la movilidad tuvieron relación con las concentraciones de contaminantes, se determinó y caracterizó los distintos periodos de pre encierro, encierro y post encierro para el año 2020 y 2021. Esta caracterización se logró a través de la formulación de un índice de fase, que resume de forma general, la etapa del Plan Paso a Paso aplicada a todo el AMS. Este índice de fase se relacionó con el índice de movilidad, evidenciando una correlación inversa, es decir que al aumentar el índice de fase (aumentando restricciones de movilidad) disminuye la movilidad. Sin embargo, al determinar condiciones de encierro por movilidad e índice de fase, se tiene que existen una gran diferencia de días entre ambos criterios (57 días entre el criterio de fase y movilidad para el periodo post encierro 2021), por lo que, para estudiar la afección de los periodos de post encierro, encierro y pre encierro en los contaminantes atmosféricos, se establecieron distintos criterios.

Con la determinación de los periodos de pre encierro, encierro y post encierro, se logró comparar como varía las concentraciones horarias y mensuales entre el periodo histórico, el año 2020 y el año 2021. Con esto se determinan las diferencias de comportamiento mensual de los contaminantes, evidenciando un cambio en los meses de mayor contaminación entre los años de la pandemia y el periodo histórico, debido a que en el periodo histórico las concentraciones más altas se dan, en general, en el mes de junio, mientras que en los años de pandemia esta se da en julio y en algunos casos en mayo. Esta diferencia se relaciona con las restricciones de movilidad dadas por el brote de COVID-19. También se identifica que la variabilidad estacional tiene una alta influencia en los valores de concentración, donde los meses fríos presentan las concentraciones de contaminantes más altas, a excepción del O₃. Esto en conjunto y con el fin de periodo de encierro, se dio un aumento general en las concentraciones en el año 2021. El aumento de las concentraciones del periodo post encierro para el año 2020 no se logra identificar, esto debido a que las restricciones de movilidad disminuyen en periodos cálidos, por lo que se observó concentraciones de contaminantes bajas en comparación al periodo de encierro. Sin embargo, si se encuentran concentraciones menores en el periodo de encierro al comparar los años 2020 y 2021 con el periodo histórico (2017 al 2019). Por otra parte, los cambios respecto al patrón horario se dan principalmente en que existen menores concentraciones para el año 2020 y 2021 en su respectivo periodo de encierro, siendo el año 2020 el de menores concentraciones.

Los resultados obtenidos en este estudio permiten caracterizar un comportamiento diferente de los contaminantes en el año 2020 y 2021 al periodo histórico, lo cual se puede

relacionar con las restricciones de movilidad provocadas por la pandemia, lo que también conlleva a un cambio rutinario en la movilidad, tanto para actividades laborales como otras. Por otra parte, a través de la investigación y exploración de distintas metodologías para la evaluación de la afección de la pandemia y sus restricciones de movilidad en la concentración de contaminantes, se logra establecer una metodología comparativa en las restricciones de movilidad y la movilidad en su afección con la contaminación atmosférica para los años 2020 y 2021.

BIBLIOGRAFÍA

- Albayati, N., Waisi, B., Al-Furaiji, M., Kadhom, M., & Alalwan, H. (2021). Effect of COVID-19 on air quality and pollution in different countries. In *Journal of Transport and Health* (Vol. 21). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.jth.2021.101061>
- Anderson--Darling Test. (2008). In *The Concise Encyclopedia of Statistics* (pp. 12–14). Springer New York. https://doi.org/10.1007/978-0-387-32833-1_11
- Bedoya-maya, F., Calatayud, A., & Giraldez, F. (2022). *Urban mobility patterns and the spatial distribution of infections in Santiago de Chile*. 163(July), 43–54. <https://doi.org/10.1016/j.tra.2022.06.011>
- Canals L, M. (2020). Concepts for good decision-making in the COVID-19 pandemic in Chile. *REVISTA CHILENA DE INFECTOLOGIA*, 37(2), 170–172.
- Carslaw, D. C. (2019). *The openair manual — open-source tools for analysing air pollution data*. November.
- Cohen, J., Fitz-Simons, T., & Wayland, M. (1999). *Guideline on data handling conventions for the PM NAAQS*.
- Cresswell, T. (2021). Valuing mobility in a post COVID-19 world. *Mobilities*, 16(1), 51–65. <https://doi.org/10.1080/17450101.2020.1863550>
- Dantas, G., Siciliano, B., França, B. B., da Silva, C. M., & Arbilla, G. (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.

<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.139085>

Excel®, M., & Microsoft Corporation®. (2020). *Software de hojas de cálculo Microsoft Excel / Microsoft 365*. <https://www.microsoft.com/es-ww/microsoft-365/excel>

Filonchyk, M., Hurynovich, V., & Yan, H. (2021). Impact of Covid-19 lockdown on air quality in the Poland, Eastern Europe. *Environmental Research*, 198(November 2020), 110454. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2020.110454>

Gross, J., & Ligges, U. (2015). *Package ‘nortest’* (pp. 1–10).

Harantová, V., Hájnik, A., Kalašová, A., & Figlus, T. (2022). The Effect of the COVID-19 Pandemic on Traffic Flow Characteristics, Emissions Production and Fuel Consumption at a Selected Intersection in Slovakia. *Energies*, 15(6). <https://doi.org/10.3390/en15062020>

Hwang, H., & Lee, J. Y. (2022). Impacts of COVID-19 on Air Quality through Traffic Reduction. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 19(3). <https://doi.org/10.3390/ijerph19031718>

Instituto Nacional de Estadísticas, C. (2018). *SINTESIS DE RESULTADOS CENSO 2017* (Vol. 1). <https://www.censo2017.cl/descargas/home/sintesis-de-resultados-censo2017.pdf>

Instituto Sistemas Complejos de Ingeniería. (2021). *Visor Movilidad - Covidanalytics*. <https://covidanalytics.isci.cl/movilidad/visor-movilidad/>

ISO - ISO 8601-1:2019 - Date and time — Representations for information interchange

— Part 1: Basic rules. (n.d.). ISO Standard.

<https://www.iso.org/standard/70907.html>

Jacob, D. J., Amazon.com, & Press, P. U. (1999). *Introduction to Atmospheric Chemistry*.

Princeton University Press. <https://books.google.cl/books?id=14whM9fEOzsC>

Kellerman, A. (2022). Personal Spatial Mobilities after the COVID-19 Pandemic: A

Speculative View. *Journal of Urban Technology*, 0(0), 1–14.

<https://doi.org/10.1080/10630732.2022.2044743>

Khan, S., Dahu, B. M., & Scott, G. J. (2022). A Spatio-temporal Study of Changes in Air

Quality from Pre-COVID Era to Post-COVID Era in Chicago, USA. *Aerosol and*

Air Quality Research, 22(8), 220053. <https://doi.org/10.4209/aaqr.220053>

Khan, S., Newport, D., & Le Calvé, S. (2019). Gas Detection Using Portable Deep-UV

Absorption Spectrophotometry: A Review. *Sensors*, 19(23).

<https://doi.org/10.3390/s19235210>

Kondo, Y., Nakamura, K., Chen, G., Takegawa, N., Koike, M., Miyazaki, Y., Kita, K.,

Crawford, J., Ko, M., Blake, D. R., Kawakami, S., Shirai, T., Liley, B., Wang, Y.,

& Ogawa, T. (2004). Photochemistry of ozone over the western Pacific from winter to spring. *Journal of Geophysical Research D: Atmospheres*, 109(23), 1–19.

<https://doi.org/10.1029/2004JD004871>

Kotnala, G., Mandal, T. K., Sharma, S. K., & Kotnala, R. K. (2020). Emergence of Blue

- Sky Over Delhi Due to Coronavirus Disease (COVID-19) Lockdown Implications. *Aerosol Science and Engineering*, 4(3), 228–238. <https://doi.org/10.1007/s41810-020-00062-6>
- Lee, H., Park, S. J., Lee, G. R., Kim, J. E., Lee, J. H., Jung, Y., & Nam, E. W. (2020). The relationship between trends in COVID-19 prevalence and traffic levels in South Korea. *International Journal of Infectious Diseases*, 96(2020), 399–407. <https://doi.org/10.1016/j.ijid.2020.05.031>
- Mashayekhi, R., Pavlovic, R., Racine, J., Moran, M. D., Manseau, P. M., Duhamel, A., Katal, A., Miville, J., Niemi, D., Peng, S. J., Sassi, M., Griffin, D., & McLinden, C. A. (2021). Isolating the impact of COVID-19 lockdown measures on urban air quality in Canada. *Air Quality, Atmosphere and Health*, 14(10), 1549–1570. <https://doi.org/10.1007/s11869-021-01039-1>
- Ministerio de Ciencia, Tecnología, Conocimiento e Innovación, C. (2021). *Base de Datos COVID-19*. <https://www.minciencia.gob.cl/covid19/>
- Ministerio de Salud, C. (2020). *Estrategia Gradual*. 1–22. www.gob.cl/coronavirus/pasoapaso/
- Ministerio del Medio Ambiente, C. (2012). Decreto 31: ESTABLECE PLAN DE PREVENCIÓN Y DESCONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA PARA LA REGIÓN METROPOLITANA DE SANTIAGO. In *Biblioteca del Congreso Nacional de Chile*. <http://bcn.cl/2jf1a>

- Ministerio del Medio Ambiente, C. (2021). *Sistema Información Nacional de Calidad del Aire (SINCA)*. <https://sinca.mma.gob.cl/>
- Ministerio del Medio Ambiente, C. (2022). *Decreto 12 ESTABLECE NORMA PRIMARIA DE CALIDAD AMBIENTAL PARA MATERIAL PARTICULADO FINO RESPIRABLE MP 2,5*.
- Ministerio Secretaria General de la Presidencia, C. (2011). Decreto 114 ESTABLECE NORMA PRIMARIA DE CALIDAD DE AIRE PARA DIOXIDO DE NITROGENO (NO₂). *Biblioteca Del Congreso Nacional de Chile*, 114(2002), 17–20. https://www.mineducacion.gov.co/1759/articles-103099_archivo_pdf.pdf
- MINSEGPRES. (2010). Ley 19300. In *Biblioteca del Congreso Nacional de Chile*. <https://www.bcn.cl/leychile/navegar?idNorma=30667>
- Muhammad, S., Long, X., & Salman, M. (2020). COVID-19 pandemic and environmental pollution: A blessing in disguise? *Science of the Total Environment*, 728, 138820. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.138820>
- ONAR, & Ministerio Secretaria General de la Presidencia, C. (2021). *Actualización plan “Paso a Paso” comienza a regir el 1 de octubre y pone término al Estado de Catástrofe*. <https://www.onar.gob.cl/actualizacion-plan-paso-a-paso-comienza-a-regir-el-1-de-octubre-y-pone-termino-al-estado-de-catastro/>
- Pandis, S. N., & Seinfeld, J. H. (2016). *Atmospheric Chemistry and Physics: From Air Pollution to Climate Change*. Wiley.

<https://books.google.com.ec/books?id=MfHbCwAAQBAJ>

- Parr, S., Wolshon, B., Renne, J., Murray-Tuite, P., & Kim, K. (2020). Traffic Impacts of the COVID-19 Pandemic: Statewide Analysis of Social Separation and Activity Restriction. *Natural Hazards Review*, 21(3), 04020025. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)nh.1527-6996.0000409](https://doi.org/10.1061/(asce)nh.1527-6996.0000409)
- Patel, A., Patel, S., Fulzele, P., Mohod, S., & Chhabra, K. G. (2020). *Quarantine an effective mode for control of the spread of COVID19? A review*. 3867–3871. <https://doi.org/10.4103/jfmpe.jfmpe>
- Paul, T., Chakraborty, R., & Anwari, N. (2022). Impact of COVID-19 on daily travel behaviour: a literature review. *Transportation Safety and Environment*, 4(2). <https://doi.org/10.1093/tse/tdac013>
- Raja, S., Chandrasekaran, S. R., Lin, L., Xia, X., Hopke, P. K., & Valsaraj, K. T. (2017). Analysis of beta attenuation monitor filter rolls for particulate matter speciation. *Aerosol and Air Quality Research*, 17(1), 14–23. <https://doi.org/10.4209/aaqr.2016.03.0122>
- Rubio, M. A., & Lissi, G. E. (2014). Temperature as thumb rule predictor of ozone levels in Santiago de Chile ground air. *Journal of the Chilean Chemical Society*, 59(2), 2427–2431. <https://doi.org/10.4067/S0717-97072014000200006>
- Schmitz, R. (2005). Modelling of air pollution dispersion in Santiago de Chile. *Atmospheric Environment*, 39(11), 2035–2047.

<https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2004.12.033>

Seguel, R. J., Gallardo, L., Fleming, Z. L., & Landeros, S. (2020). Two decades of ozone standard exceedances in Santiago de Chile. *Air Quality, Atmosphere and Health*, *13*(5), 593–605. <https://doi.org/10.1007/s11869-020-00822-w>

Silva, A. C. T., Branco, P. T. B. S., & Sousa, S. I. V. (2022). Impact of COVID-19 Pandemic on Air Quality: A Systematic Review. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, *19*(4). <https://doi.org/10.3390/ijerph19041950>

Skoog, D. A., Crouch, S. R., Holler, F. J., & Anzures, M. B. (2008). *Principios de analisis instrumental / Principles of Instrumental Analysis*. Cengage Learning. <https://books.google.cl/books?id=MgvRwAEACAAJ>

Spearman Rank Correlation Coefficient. (2008). In *The Concise Encyclopedia of Statistics* (pp. 502–505). Springer New York. https://doi.org/10.1007/978-0-387-32833-1_379

The R Foundation. (2018). *R: The R Project for Statistical Computing*. <https://www.r-project.org/>

Toro A., R., Catalán, F., Urdanivia, F. R., Rojas, J. P., Manzano, C. A., Seguel, R., Gallardo, L., Osses, M., Pantoja, N., & Leiva-Guzman, M. A. (2021). Air pollution and COVID-19 lockdown in a large South American city: Santiago Metropolitan Area, Chile. *Urban Climate*, *36*(February).

<https://doi.org/10.1016/j.uclim.2021.100803>

Toro A., R., Morales S., R. G. E., Canales, M., Gonzalez-Rojas, C., & Leiva G., M. A. (2014). Inhaled and inspired particulates in Metropolitan Santiago Chile exceed air quality standards. *Building and Environment*, 79, 115–123.

<https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2014.05.004>

Troncoso, R., De Grange, L., & Cifuentes, L. A. (2012). Effects of environmental alerts and pre-emergencies on pollutant concentrations in Santiago, Chile. *Atmospheric Environment*, 61, 550–557. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2012.07.077>

Universidad Santiago de Chile. (2014). *Actualización del inventario de emisiones de contaminantes atmosféricos en la región metropolitana 2014. Informe final*. 153. https://sustempo.com/website/wp-content/uploads/2015/07/Inventario-de-emisiones-RM_USACH_2014.pdf

Velayarce, D., Bustos, Q., García, M. P., Timaná, C., Carbajal, R., Salvatierra, N., Horna, D., & Murray, V. (2022). Air Quality Analysis in Lima, Peru Using the NO₂ Levels during the COVID-19 Pandemic Lockdown. *Atmosphere*, 13(3), 1–16.

<https://doi.org/10.3390/atmos13030373>

Wilcoxon Test. (2008). In *The Concise Encyclopedia of Statistics* (pp. 575–578). Springer New York. https://doi.org/10.1007/978-0-387-32833-1_427

Zhu, H., Wei, L., & Niu, P. (2020). *The novel coronavirus outbreak in Wuhan* ., 6, 2019–2021.

ANEXO

Anexo 1: Tendencia por año de cada contaminante calculada mediante Theil-Sen en el periodo de 2017 a 2021, con su respectivo intervalo de confianza y valor P para cada contaminante.

Contaminante	Tendencia (unidad/año)	Intervalo de confianza	Valor P
MP ₁₀ (µg m ⁻³)	0,89	[-0,39, 2,19]	No trend
MP _{2,5} (µg m ⁻³)	-0,73	[-1,12, -0,29]	<0,01
CO (ppm)	0	[-0,02, 0,02]	No trend
NO (ppb)	-3,16	[-4,42, -2,02]	<0,001
NO ₂ (ppb)	-0,81	[-1,55, -0,2]	<0,01
NO _x (ppb)	-3,37	[-4,89, -2,33]	<0,001
O ₃ (ppb)			

Anexo 2: Cambio relativo entre 2017 y 2018 separados por cuatrimestres de dichos dos años. * p < 0,05, **p < 0,01, ***p < 0,001.

2017-2018: primer cuatrimestre				
Contaminante	A: Promedio 2017	B: Promedio 2018	Diferencia de promedios (A-B)	Cambio relativo (B-A) /A, %
PM ₁₀ (µg m ⁻³)	59,8	58,3	1,48	-2,48%*
PM _{2,5} (µg m ⁻³)	22,6	18,4	4,19	-18,5%***
NO (ppb)	18,2	18,8	-0,639	3,51%
NO ₂ (ppb)	17,4	21,0	-3,62	20,8%
NO _x (ppb)	37,8	40,0	-2,19	5,80%**
O ₃ (ppb)	0,0188	0,0165	0,00228	-12,1%**
CO (ppm)	0,413	0,341	0,0724	-17,53%
Temperatura (°C)	20,6	20,0	0,642	-3,12%*
HR (%)	48,5	52,8	-4,29	8,83%
Velocidad de viento (m s ⁻¹)	0,819	1,16	-0,337	41,2%
2017-2018: segundo cuatrimestre				

PM ₁₀ (µg m ⁻³)	74,4	75,8	-1,43	1,92%*
PM _{2,5} (µg m ⁻³)	40,0	40,79	-0,780	1,95%*
NO (ppb)	81,7	74,7	6,98	-8,54%*
NO ₂ (ppb)	31,6	36,4	-4,76	15,1%
NO _x (ppb)	114,2	114,2	0,0628	-0,055%*
O ₃ (ppb)	0,00455	0,00553	-0,000971	21,3%*
CO (ppm)	1,16	0,996	0,164	-14,1%
Temperatura (°C)	9,81	10,5	-0,701	7,14%**
HR (%)	72,1	64,4	7,67	-10,6%
Velocidad de viento (m s ⁻¹)	0,471	0,598	-0,126	26,7%
2017-2018: tercer cuatrimestre				
PM ₁₀ (µg m ⁻³)	46,8	44,7	2,15	-4,59%***
PM _{2,5} (µg m ⁻³)	17,3	17,3	-0,0143	0,0830%*
NO (µg m ⁻³)	14,4	14,7	-0,295	2,04%***
NO ₂ (ppb)	17,8	16,8	0,990	-5,55%*
NO _x (ppb)	32,8	33,4	-0,563	1,72%*
O ₃ (ppb)	0,0155	0,0155	5,96E-05	-0,382%*
CO (ppm)	0,394	0,378	0,0150	-3,81%*
Temperatura (°C)	16,8	16,4	0,407	-2,42%*
HR (%)	55,7	54,7	1,00	-1,80%*
Velocidad de viento (m s ⁻¹)	1,06	1,06	-0,000366	0,035%*

Anexo 3: Cambio relativo entre 2018 y 2019 separados por cuatrimestres de dichos dos años. * p < 0,05, **p < 0,01, ***p < 0,001.

2018-2019: primer cuatrimestre				
Contaminante	A: Promedio 2017	B: Promedio 2018	Diferencia de promedios (A-B)	Cambio relativo (B-A) /A %
PM ₁₀ (µg m ⁻³)	58,3	61,5	-3,17	5,43%**
PM _{2,5} (µg m ⁻³)	18,4	20,9	-2,49	13,6%
NO (µg m ⁻³)	18,8	16,9	1,88	-10,0%***
NO ₂ (ppb)	21,0	20,3	0,780	-3,71%*
NO _x (ppb)	40,0	37,0	2,95	-7,37%*
O ₃ (ppb)	0,0165	0,0180	-0,00152	9,24%*

CO (ppm)	0,340	0,416	-0,0754	22,1%
Temperatura (°C)	20,0	19,1	0,839	-4,20%***
HR (%)	52,8	51,4	1,41	-2,67%*
Velocidad de viento (m s ⁻¹)	1,16	0,973	0,183	-15,8%
2018-2019: segundo cuatrimestre				
PM ₁₀ (µg m ⁻³)	75,8	94,6	-18,8	24,7%
PM _{2,5} (µg m ⁻³)	40,8	38,1	2,70	-6,63%***
NO (µg m ⁻³)	74,7	72,3	2,42	-3,24%*
NO ₂ (ppb)	36,4	34,1	2,21	-6,07%
NO _x (ppb)	114,2	106,1	8,16	-7,14%**
O ₃ (ppb)	0,00553	0,00560	-8,29E-05	1,50%
CO (ppm)	0,996	1,04	-0,0417	4,18%*
Temperatura (°C)	10,5	10,0	0,499	-4,75%*
HR (%)	64,4	64,6	-0,128	0,199%*
Velocidad de viento (m s ⁻¹)	0,598	0,562	0,0358	-5,99%*
2018-2019: tercer cuatrimestre				
PM ₁₀ (µg m ⁻³)	44,7	54,2	-9,53	21,3%
PM _{2,5} (µg m ⁻³)	17,3	15,5	1,77	-10,2%
NO (µg m ⁻³)	14,8	9,19	5,56	-37,7%
NO ₂ (ppb)	16,8	12,8	4,00	-23,7%
NO _x (ppb)	33,4	24,6	8,83	-26,4%
O ₃ (ppb)	0,0155	0,0186	-0,00312	20,1%
CO (ppm)	0,378	0,393	-0,0144	3,80%
Temperatura (°C)	16,4	17,1	-0,684	4,17%*
HR (%)	54,7	48,0	6,70	-12,2%
Velocidad de viento (m s ⁻¹)	1,06	1,01	0,0515	-4,85%*