



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

Escuela Politécnica Superior de Gandia

Estudio del impacto del Plan de Aire Limpio (2018-2022) y
del COVID-19 en la calidad del aire de Shanghai.

Trabajo Fin de Grado

Grado en Ciencias Ambientales

AUTOR/A: Cheng , Yilun

Tutor/a: Gómez Benito, Carmen

Cotutor/a: Catalá Icardo, Mónica

CURSO ACADÉMICO: 2022/2023

Resumen:

El riesgo que supone la contaminación del aire, tanto para la salud como para el medioambiente, es bien conocido. Shanghái es la ciudad más poblada y extensa de China, en la que se concentran grandes centros financieros, actividad industrial, e incluso agrícola. En las últimas décadas, la política del Gobierno chino se ha concretado en distintos planes para mejorar la calidad del aire, clave en diversos objetivos de desarrollo sostenible. En Shanghái, este año concluye el "Plan de Aire Limpio de Shanghái (2018-2022)", cuyo impacto se ha estudiado en este trabajo. El estudio de los datos de concentración de los contaminantes registrados en la red de vigilancia de la calidad del aire de Shanghái, ha permitido constatar una disminución de los niveles de contaminación. No obstante, los niveles de partículas en suspensión, NO₂ y O₃, siguen superando los valores guía recomendados por la OMS. Si bien esta es una tendencia generalizada en todas las grandes ciudades del planeta, nos permite afirmar que aún queda mucho por hacer. Por otra parte, un análisis de las consecuencias de las restricciones de la actividad humana por la crisis del COVID-19, ha mostrado que todos los contaminantes, excepto el ozono, pueden disminuir con bastante rapidez cuando se restringe la actividad antropogénica.

Palabras claves:

Contaminación atmosférica; Plan de Aire Limpio de Shanghái; COVID-19; Calidad del aire.

Abstract:

The risk posed by air pollution both to health and environment is well known. Shanghai is the largest and most populous city in China, where great financial centres, industrial activity and agriculture are concentrated. In recent decades, the Chinese Government's policy has given rise to different plans to improve air quality, key to various sustainable development goals. In Shanghai, this year concludes the "Shanghai Clean Air Plan (2018-2022)", whose impact has been studied in this work. The study of the concentration data of pollutants registered in the Shanghai air quality monitoring network has revealed a decrease in pollution levels. However, the levels of suspended particles, NO₂ and O₃ continue to exceed the guideline values recommended by the WHO. Even though this is a general trend in all large cities on the planet, it allows us to affirm that there is still much to be done. On the other hand, an analysis of the consequences of restrictions on human activity due to the COVID-19 crisis has shown that all pollutants, except ozone, can decrease quite rapidly when anthropogenic activity is restricted.

Keywords:

Atmospheric pollution; Shanghai Clean Air Plan; COVID-19; Air quality.

ÍNDICE

1. Introducción	1
1.1. Shanghái	1
1.2. Problemática de la calidad del aire en Shanghái	3
1.3. Legislación sobre contaminación atmosférica en China	5
1.4. Plan de aire limpio de Shanghái 2018-2022	9
2. Objetivos	14
3. Materiales y métodos	14
3.1. Adquisición de datos	14
3.2. Test de Daniel	15
4. Resultados y discusión	15
4.1. Evolución de la calidad del aire en Shanghái entre 2017 y 2021	15
4.1.1. Partículas en suspensión PM2.5	16
4.1.2. Partículas en suspensión PM10	19
4.1.3. Monóxido de carbono (CO)	22
4.1.4. Dióxido de nitrógeno (NO₂)	24
4.1.5. Dióxido de azufre (SO₂)	27
4.1.6. Ozono (O₃)	31
4.1.7. Índice de Calidad del Aire (AQI)	34
4.2. Análisis del efecto del COVID-19 en la calidad del aire de Shanghái	36
4.2.1. COVID-19 y Fiesta del Año Nuevo Chino en Shanghái	36
4.2.2. Análisis del impacto del COVID-19 en la calidad del aire	38
5. Conclusiones	44
6. Bibliografía	46

1. Introducción

1.1. Shanghái

Shanghái es la ciudad más poblada de China, con una población total de 24.237.800 habitantes. También es la ciudad con mayor superficie, 6.340,5 Km², de los cuales la zona urbana ocupa 2.648,6 Km² [1].

Es un municipio que depende directamente del Gobierno Central de la República Popular China y es el centro económico, financiero, comercial y naviero de China. En la Figura 1, se muestra la situación de la ciudad dentro de China.



Figura 1. Situación del municipio de Shanghái dentro de China. Fuente. WIKIPEDIA (2001) [1].

Shanghái está dividida en 16 distritos urbanos, tal y como se muestra en la Figura 2, cada uno de los cuales tiene su propio núcleo urbano. El distrito de Fengxian, en la zona sur, y el de Baoshan, en el extremo norte, son las zonas industriales más importantes de Shanghái. El centro de la ciudad está formado por ocho distritos -Zhabei, Yangpu, Hongkou, Putuo, Changning, Xuhui, Jing'an y Huangpu- y es la zona más próspera y transitada de la ciudad. En el distrito de Huangpu se encuentran el gobierno de la ciudad y las principales unidades administrativas de la misma. Los otros distritos se pueden considerar suburbanos o rurales.

Toda Shanghái es una llanura aluvial, con sólo algunos montículos volcánicos en el suroeste.

Está situada en la ruta de los tifones del océano Pacífico occidental y suele verse afectada por éstos cada verano, lo que provoca fuertes vientos y precipitaciones. No está en una zona sísmica importante, por lo que no hay amenaza de terremotos u otros desastres de tipo geológico. Sin embargo, debido a su proximidad al mar y a su baja altitud, es vulnerable a las amenazas de tsunami.

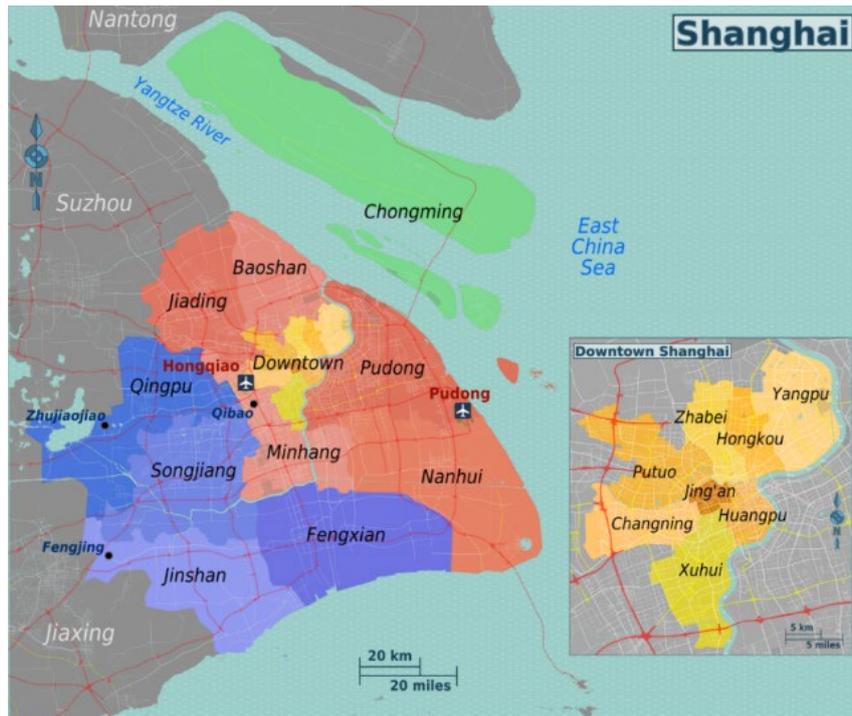


Figura 2. Shanghá y los 16 distritos en que se organiza. Detalle del centro. Fuente. WIKIPEDIA (2001) [1].

La ciudad se encuentra en la desembocadura del río Yangtze, aproximadamente en el centro del litoral chino. El río Huangpu, afluente del Yangtze, la atraviesa y divide en dos partes, la oriental y la occidental (se puede observar su desembocadura en la Figura 2, entre los distritos de Baoshan y Pudong).

La isla de Chongming, en el lado oriental del continente, tiene grandes humedales y marismas, que son hábitats importantes para las aves migratorias y una importante barrera ecológica para Shanghá, siendo esta la zona más rural de la ciudad.

Shanghá tiene un clima monzónico subtropical. Es calurosa y lluviosa en verano, y templada y menos lluviosa en invierno, con cuatro estaciones bien diferenciadas. La temperatura media anual es de 18 °C. La primavera (abril-mayo) y el otoño (octubre-noviembre) son más cortos, que el invierno (diciembre-marzo) y el verano (junio-septiembre).

Los periodos lluviosos son primavera, verano y otoño. En particular, en verano son más abundantes las precipitaciones, lo que hace que el periodo entre mayo y septiembre sea la temporada de inundaciones en Shanghá, con alrededor del 60% de las precipitaciones anuales.

Cada año, con el mes de julio comienza la temporada más calurosa con una temperatura media de 28,7°C y una media de 8,7 días al año con una temperatura máxima superior a 35°C. Enero es el mes más frío del año, con una temperatura media de 4,8°C. Pueden producirse heladas ocasionales debido al aire frío procedente de la meseta de Mongolia y de Siberia en el norte. Si llega un fuerte aire frío y se encuentra con corrientes de aire cálido y húmedo, pueden producirse nevadas en Shanghá.

1.2. Problemática de la calidad del aire en Shanghái

La contaminación atmosférica pone en peligro la salud humana y animal, afecta al crecimiento de las plantas y repercute en la vida cotidiana de las personas, afectando incluso a los materiales y causando importantes pérdidas económicas cada año. Con la rápida industrialización, el aumento de la densidad de población y el incremento del consumo de recursos, la calidad del aire se ha convertido en un grave problema en las ciudades de todo el mundo. Según la Organización Mundial de la Salud (OMS), la contaminación atmosférica es uno de los principales riesgos medioambientales para la salud. Reducir los niveles de contaminación atmosférica, implica reducir la cantidad de afectados por problemas cerebrovasculares, cáncer de pulmón o enfermedades pulmonares crónicas y agudas, incluida el asma. Según estimaciones del 2016, la mala calidad del aire en las ciudades y zonas rurales de todo el mundo provoca cada año 4,2 millones de muertes prematuras [2].

En los últimos años, China ha experimentado un importante crecimiento económico (estimado en un 6% anual entre 2015 y 2019), a la vez que la calidad del aire de sus ciudades ha disminuido un promedio de 6,9% anual, un 8,1% en las grandes ciudades [3].

En la Figura 3, se comparan los valores guía actualizados de los indicadores de la calidad del aire anuales establecidos por la OMS, publicados el 22 de septiembre de 2021, y que representan los niveles que permiten a los seres humanos vivir sin poner en riesgo su salud, con las concentraciones medias diarias en China y en Shanghái en 2021.

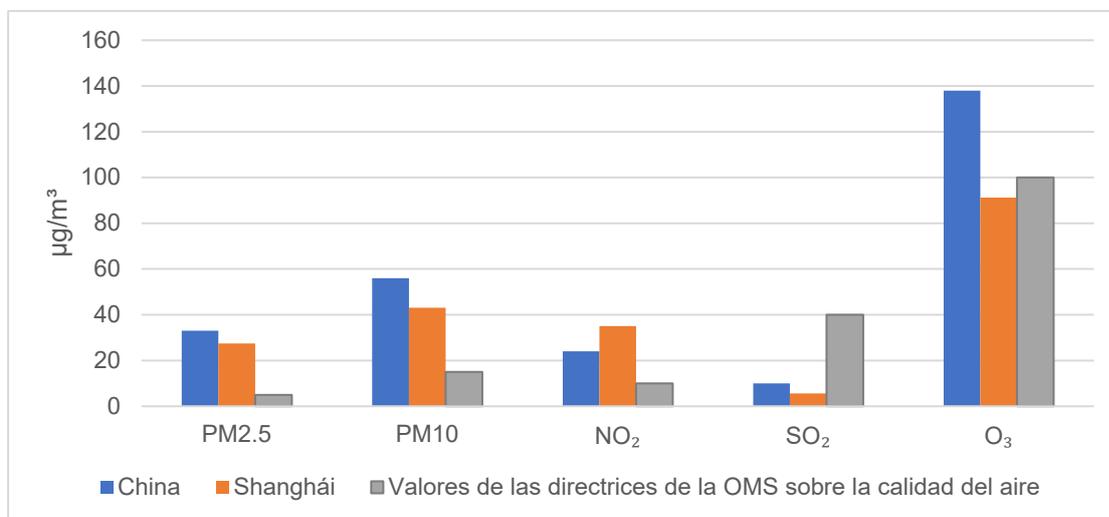


Figura 3. Comparación de medias anuales de contaminantes en China y Shanghái en 2021, y directrices de calidad del aire de la OMS. En el caso de la OMS el valor establecido para el SO₂ corresponde al promedio de 24 h y para el O₃ al percentil 99 del máximo diario de periodos de 8 h). Fuente. Elaboración propia a partir de OMS [2] y Boletín Nacional de Medio Ambiente de Shanghái [16]

Como se puede ver, en estos momentos Shanghái tiene una situación sustancialmente mejor respecto a la calidad del aire que el conjunto de China, ya que los niveles de todos los contaminantes presentan valores inferiores de concentración con la excepción del NO₂. Sin embargo, si se comparan con los valores guía de calidad del aire de la OMS, se comprueba que las concentraciones de todos los contaminantes, a excepción del dióxido de azufre, son

peores. Aunque en el caso del SO₂ hay que señalar que, el valor de la OMS corresponde a una media diaria y no anual, por lo que no son completamente comparables. Por tanto, los resultados mostrados en la gráfica para los diferentes contaminantes nos indican que, pese a todos los esfuerzos realizados en los últimos años, el aire de Shanghái todavía sigue siendo perjudicial para la salud humana según los estándares mundiales, y es una ciudad altamente contaminada.

En la actualidad, Shanghái se enfrenta a tres retos principales en cuanto a la calidad del aire ambiente ^[4]. En primer lugar, la cantidad total de emisiones contaminantes sigue superando la capacidad medioambiental, y las emisiones totales de todos los tipos de contaminantes atmosféricos siguen siendo elevadas. En segundo lugar, la estructura industrial de Shanghái está dominada por la industria pesada, como la siderúrgica y la química. La base energética es principalmente el carbón y el gas natural. En cuanto al transporte, el principal problema lo origina el transporte de mercancías por carretera. La actividad portuaria también es una fuente importante de contaminación. Si no se actúa en estos sectores claves, los problemas de calidad del aire de Shanghái se encontrarán con un cuello de botella insalvable. En tercer lugar, la composición de la contaminación atmosférica es compleja. Hay un gran número de factores que la determinan, que incluyen las emisiones locales, pero también factores de transmisión regional. Al mismo tiempo, condiciones meteorológicas y topográficas desfavorables pueden producir una acumulación de la contaminación y una pobre dispersión, lo que dificulta la mejora en la calidad del aire.

Efectivamente, en la actualidad las principales fuentes de contaminación en Shanghái son la industria y el transporte ^[4], distribuidas como se muestra en la Figura 4. La industria incluye las emisiones de los procesos industriales (15%), las emisiones de las calderas y hornos industriales (10%), y las emisiones de las centrales eléctricas (7%). Las emisiones generadas por el transporte corresponden principalmente a vehículos de motor, barcos y aviones, con un 26%. En la categoría de otros se considera el polvo fugitivo, correspondiente a partículas en suspensión principalmente minerales provenientes del suelo (11%), contaminantes orgánicos volátiles provenientes de pinturas principalmente (5%), agricultura y biomasa (3%), aerosol marino y vegetación (1%). Cabe destacar que el 22% de las fuentes de contaminación en Shanghái proceden de emisiones producidas en zonas externas al propio Shanghái. Este último dato demuestra la importancia del aporte interregional y pone de manifiesto que la calidad del aire es un problema que no se puede resolver únicamente con medidas locales.

Como se observa, los procesos de combustión están en la base de gran parte de las emisiones contaminantes, como ocurre en la mayoría de las ciudades de todo el mundo. Hay que tener en cuenta además que, en el caso de China, según datos del 2020, el 56,8% de la energía es producida a partir de carbón ^[5], uno de los combustibles más contaminantes.

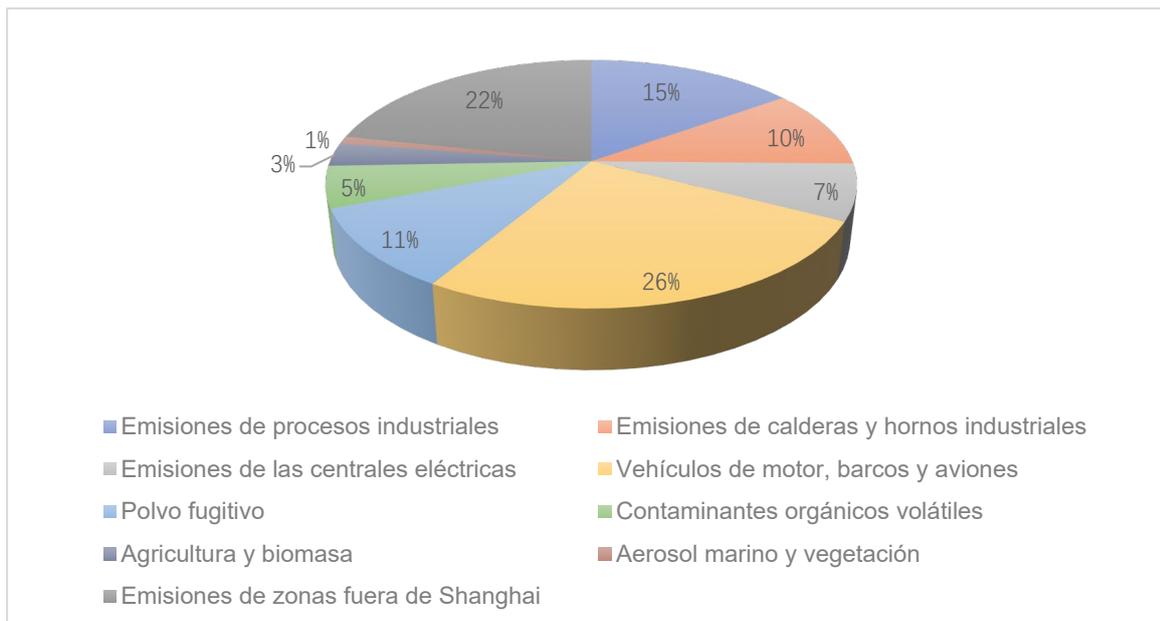


Figura 4. Principales fuentes de contaminación en Shanghái.

Fuente. Elaboración propia a partir de Web de Ciudades de China ^[4]

Como uno de los centros económicos y financieros de China y una de las ciudades más densamente pobladas, Shanghái se encuentra entre las primeras ciudades de China tanto en términos de consumo de energía per cápita como de consumo de energía por unidad de área. Su consumo total de energía aumentó de 106,71 millones de toneladas de carbón en 2010 a 117,12 millones de toneladas en 2016 ^[6].

1.3. Legislación sobre contaminación atmosférica en China

En 2012 China publicó los nuevos estándares de calidad del aire ambiental (GB3095-2012) que reclasificaron las zonas funcionales atmosféricas de las tres categorías originales en dos nuevas categorías ^[7]. Las reservas naturales, los atractivos turísticos y otras áreas que requieren protección especial pertenecen a la primera categoría, denominada Zona de Categoría I, en la que se aplica el límite de concentración correspondiente al Nivel I que se muestra en la Tabla 1. Las áreas comerciales, los parques industriales y las áreas rurales pertenecen a la segunda categoría, denominada Zona de Categoría II, en las que se aplica el límite de concentración del Nivel 2 recogido en dicha tabla ^[7].

De acuerdo con esta normativa, las ciudades chinas deben cumplir como mínimo el Nivel 2 durante al menos el 70% de los días del año para que se considere que cumplen la norma; de lo contrario, se considera que la suspenden.

Por otra parte, desde 2013 China utiliza oficialmente el índice de calidad del aire (AQI) para indicar la calidad del aire, siguiendo los estándares de la Agencia de Protección Ambiental de EEUU (EPA). Este índice, con algunas variaciones, se usa actualmente en la mayoría de los países desarrollados.

Contaminantes	Valor promedio	Umbral		Unidad
		Nivel 1	Nivel 2	
Dióxido de azufre(SO ₂)	Promedio anual	20	60	μg/m ³
	Promedio 24 horas	50	150	
	Promedio por hora	150	500	
Dióxido de nitrógeno(NO ₂)	Promedio anual	40	40	μg/m ³
	Promedio 24 horas	80	80	
	Promedio por hora	200	200	
Partículas(PM10)	Promedio anual	40	70	μg/m ³
	Promedio 24 horas	50	150	
Partículas(PM2.5)	Promedio anual	15	35	μg/m ³
	Promedio 24 horas	35	75	
Ozono(O ₃)	Máximo diario de periodos de 8 horas *percentil 99	100	160	μg/m ³
	Promedio por hora	160	200	
Óxido carbónico(CO)	Promedio 24 horas	4	4	mg/m ³
	Promedio por hora	10	10	

Tabla 1. Estándares de calidad del aire ambiental en China

Fuente. Ministerio de Ecología y Medio Ambiente de la República Popular China [7].

El índice de calidad del aire (AQI por las siglas en inglés “Air Quality Index”) es un indicador genérico de la calidad del aire que indica el nivel de contaminación existente, los posibles efectos sobre la salud y las precauciones a tomar. Es un índice no lineal y adimensional que se calcula a partir de los índices individuales de PM2.5, PM10, CO, NO₂, SO₂ y O₃, que a su vez dependen de sus respectivas concentraciones. Cuanto más alto es el valor de AQI, mayor es la contaminación del aire y peor es su calidad.

Para facilitar la interpretación de este índice, se usan seis categorías, a cada una de las cuales se le asigna un color para ayudar a identificar si una población está experimentando niveles insalubres de contaminación del aire [8], tal y como se muestra en la Tabla 2.

El color verde se asigna para AQI ≤ 50, y se corresponde con una calidad del aire saludable, mientras que el color amarillo se usa en caso de que 51 ≤ AQI ≤ 100, e indican, una calidad del aire aceptable, pero que podría ser moderadamente preocupante para algunas personas más sensibles. Y así sucesivamente se puede interpretar la tabla.

La relación entre la concentración de cada uno de los contaminantes y los índices de calidad del aire individuales se recogen en la Tabla 3, a partir de los cuales se calcula el AQI.

En respuesta a los niveles de contaminación del aire, y con la finalidad de establecer medidas concretas que ayuden a mejorar la calidad del aire en China, en los últimos años se han implementado diversas políticas de “aire limpio”. Sin ánimo de hacer una revisión exhaustiva, se comentan a continuación algunos de los planes más recientes en relación a las medidas que afectan a la contaminación atmosférica. Los objetivos del XI Plan Quinquenal (2006-2010), en este ámbito, fueron dos: la reducción del consumo energético por unidad de PIB en un 20% y la reducción de emisiones de los principales contaminantes en un 10%. En el XII Plan

Quinquenal (2011-2016) se buscó disminuir la contaminación atmosférica haciendo un uso más eficiente de las fuentes energéticas e impulsando actividades e industrias menos contaminantes. Este plan se centró en las emisiones de NOx y SO₂, dejando fuera a las de partículas en suspensión de menos de 2.5 µm (PM2.5) altamente perjudiciales para la salud.

Índice calidad del aire	Nivel de calidad	Valor numérico	Significado
Verde	Bueno	0 a 50	La calidad del aire se considera satisfactoria y la contaminación atmosférica presenta un riesgo escaso o nulo.
Amarillo	Moderado	51 a 100	La calidad del aire es aceptable pero para algunos contaminantes podría existir una preocupación moderada para la salud de un grupo muy pequeño de personas excepcionalmente sensibles a la contaminación ambiental.
Naranja	Insalubre para grupos sensibles	101 a 150	Los miembros de grupos sensibles pueden padecer efectos en la salud. Probablemente no afectará a las personas en general.
Rojo	Insalubre	151 a 200	Todos pueden comenzar a padecer efectos en la salud y los miembros de grupos sensibles pueden padecer efectos más graves.
Morado	Muy insalubre	201 a 300	Advertencias sanitarias de condiciones de emergencia. Son mayores las probabilidades de que toda la población esté afectada.
Granate	Peligroso	301 y superior	Alerta sanitaria: todos pueden padecer efectos sanitarios más graves.

Tabla 2. Clasificación de los niveles del índice de la calidad del aire. Fuente. AirNow [8].

IAQI	PM2.5(µg/m ³)	PM10(µg/m ³)	CO(mg/m ³)	NO ₂ (µg/m ³)	SO ₂ (µg/m ³)	O ₃ (µg/m ³)
0	0	0	0	0	0	0
50	35	50	2	40	50	100
100	75	150	4	80	150	160
150	115	250	14	180	475	215
200	150	350	24	280	800	265
300	250	420	36	565	1600	800
400	350	500	48	750	2100	
500	500	600	60	940	2620	

Tabla 3. Concentración de contaminantes correspondientes a cada índice de calidad del aire individual (IAQI). Fuente. WIKIPEDIA [30].

En 2013, se puso en marcha el Plan de Acción para el Control y la Prevención de la Contaminación Atmosférica, lo que permitió reducir entre 2013 y 2017 la concentración de PM2.5 entre un 30-40% y, con ello, reducir del 7-17% las muertes prematuras relacionadas con este contaminante [9]. Como continuación de este plan, en 2018 se inició una segunda fase, “Plan de acción de tres años para ganar la guerra del cielo azul”, que ha demostrado tener un efecto significativo en la calidad del aire [9]. No obstante, como se ha comentado, aún queda mucho por hacer y un nuevo plan quinquenal, el XIV (2021-2026) ya ha sido aprobado (ver Figura 5). Algunos de los objetivos de este plan incluyen reducir las emisiones de CO₂ por unidad de PIB al 18% o incrementar al 87,5% los días con calidad de aire buena en las ciudades [31].



Figura 5. Desarrollo temporal de los diferentes planes de calidad del aire en China.

Desde 2018, el Ministerio de Protección Medioambiental (MPM) es el principal responsable en materia de contaminación atmosférica en China, encargándose de elaborar y decidir los principios legislativos. De este Ministerio depende el Centro Nacional para la Monitorización del Medioambiente en China (CNMMC), que es el organismo responsable de compilar, analizar, agregar y publicar los datos de los diferentes indicadores de calidad del aire. Hoy en día, los datos que se recogen en las distintas estaciones de muestreo distribuidas por todo el país, están en abiertos y se publican diariamente en chino a través de su página web ^[10].

En la Figura 6 se muestran las 19 estaciones en las que se monitoriza la calidad de aire en Shanghái, una por cada uno de los 16 distritos del municipio de Shanghái, más tres estaciones adicionales en el distrito de Pudong, dada su elevada superficie (cuenta con una estación próxima al centro urbano y otras tres distribuidas por el resto de la zona rural).



Figura 6. Situación de las 19 estaciones de control de la calidad del aire en Shanghái.

Fuente. Elaboración propia a partir de Oficina de Medio Ambiente Ecológico de Shanghái ^[15]

1.4. Plan de aire limpio de Shanghái 2018-2022

Por su parte, el Gobierno Municipal de Shanghái, con el fin de mejorar progresivamente la calidad del aire de la ciudad y proteger la salud de las personas, en 2018 formuló el "Plan de Aire Limpio de Shanghái (2018-2022)" dentro del marco del XIII Plan Quinquenal Chino de Protección del Medio Ambiente ^[11]

El objetivo de este plan de Aire Limpio de Shanghái es “centrarse en la industria y el transporte, la construcción, la vivienda y la agricultura, y profundizar en la prevención y el control de la contaminación atmosférica; aplicar el doble control de la energía total y del carbón, acelerar el ajuste estructural de las regiones e industrias clave, optimizar el sistema de transporte y establecer un sistema de control total de los compuestos orgánicos volátiles (COVs); tener en cuenta el control de la contaminación por ozono (O₃), partículas finas (PM_{2,5}), óxidos de nitrógeno (NOx) y COVs, y promover el control sinérgico y la reducción de las emisiones de varios contaminantes atmosféricos” ^[11].

El plan busca mejorar continuamente la calidad del aire ambiente de la ciudad, y en concreto destaca la necesidad de reducir la concentración de PM_{2,5} en la atmósfera, frenar la tendencia a la contaminación por O₃ y proteger la salud de la población. Para ello, se marcó como metas que:

- En 2020, la concentración media anual de PM_{2,5} debería ser inferior a 37 µg·m⁻³, el AQI alcanzar niveles verdes o amarillos durante el 80% del año, y eliminar los periodos con AQI con nivel granate.
- En 2022, la concentración media anual de PM_{2,5} debería situarse por debajo de los 35 µg·m⁻³ y el AQI seguir mejorando.

Entre las medidas que este plan propone se encuentran ^[11]:

(1) Aplicar controles sobre la energía y el carbón. Este último se limita a 124 millones de toneladas, lo que supone una reducción de más de un 5% respecto a 2015, y la proporción del carbón como energía primaria se reduce a menos del 30%, aumentando el del gas natural a valores superiores al 12%; la proporción de energía no fósil en el consumo de energía primaria aumentará a cerca del 14%. Se regulariza, además, la calidad del carbón y se prohíbe la construcción de nuevas instalaciones con carbón. Para finales de 2019 las pequeñas y medianas calderas de gasóleo han de completar el tratamiento de las emisiones de NOx y se prohíbe de carbón, aceite pesado, aceite residual, coque de petróleo y otros combustibles altamente contaminantes (excepto para las calderas de las centrales eléctricas y los hornos de fundición de acero).

2) Optimizar y ajustar la estructura industrial, profundizando en la prevención y el control de la contaminación que genera. Se reestructura y moderniza el sector industrial clave, gran parte basado en procesos que emplean metales pesados, y se eliminan o transforman empresas altamente contaminantes. También se controla la cantidad total de COVs emitidos en todas las etapas del proceso productivo, incluyendo el almacenamiento de los mismos.

(3) Acelerar la construcción de sistemas de transporte urbano ecológico y reducir las emisiones contaminantes de fuentes móviles. Para ello, se incrementan las líneas ferroviarias y se incrementa a un 60% para el 2022 la proporción de transporte público en el centro de la

ciudad, a la par que se refuerza la construcción de sistemas de transporte para peatones y ciclistas. Se incrementa la promoción de vehículos de nueva energía, que ya alcanza un porcentaje del 80% en los vehículos oficiales nuevos y actualizados. Por otra parte, se aplican normas más estrictas para los nuevos vehículos y productos petrolíferos, aplicándose medidas más restrictivas para los vehículos antiguos y reforzando los sistemas de inspección. También se refuerza la prevención y el control de la contaminación de los buques portuarios, del aeropuerto y de máquinas móviles no de carretera.

(4) Promover las pinturas de bajo contenido en COV en el sector de la construcción y reforzar el control de la contaminación por partículas. Estas medidas incluyen la promoción de los edificios verdes y energéticamente eficientes, la aplicación de pinturas y adhesivos con bajo contenido de COV y la reducción de emisiones de polvo en las obras de construcción, vertederos y terminales de gránulos secos de la ciudad, así como en las carreteras mediante su limpieza, para evitar la resuspensión de partículas.

(5) Profundizar en la mejora de las actividades de los servicios de restauración, del sector de reparación de automóviles, reciclado de petróleo y gas en las gasolineras y otros servicios.

(6) Fomentar la reestructuración de la actividad ganadera y agrícola, y aplicación de proyectos de reducción del amoníaco y uso integral de la paja.

(7) Aplicar la regulación y el control de la contaminación estacional para reducir picos de contaminación, para lo cual se aplicarán controles de las emisiones contaminantes en invierno (noviembre-febrero) para las empresas clave y se reforzarán las medidas de control de las emisiones.

Como se ha indicado, el plan se centra en la industria y el transporte, que son las dos fuentes principales de contaminantes atmosféricos en Shanghái. Por este motivo, se comentarán a continuación algunas de las medidas que se han considerado clave en ambos sectores

Normas de emisión de contaminantes de vehículos de motor

Shanghái cuenta con un parque de vehículos de motor enorme que aumenta cada año (ver Figura 7). Según el Anuario Estadístico de Shanghái 2021 ^[12], entre 2016 y 2020 el número de vehículos de motor en Shanghái aumentó de 3.594.800 a 4.713.900, una tasa de crecimiento en 5 años del 23,7%. Los vehículos a motor son una fuente muy importante de emisiones de partículas en suspensión, CO y NO₂, por lo que la mejora en la regulación de las normas de emisión podría ser muy eficaz para limitar el impacto de las emisiones de los vehículos en la calidad del aire.

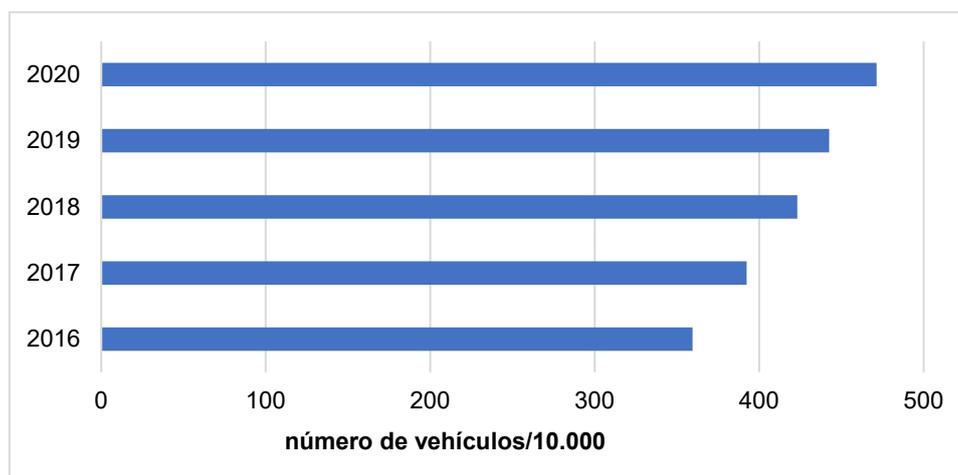


Figura 7. Evolución en el número de automóviles en Shanghái en el periodo 2016-2020.

Fuente. Elaboración propia a partir de Anuario Estadístico de Shanghái 2021 ^[12].

Desde el 1 de junio de 2019, los coches urbanos de Shanghái están sujetos a la denominada norma de la fase 6, que regula la composición de los combustibles en China, y que sustituye a la fase 5 de aplicación hasta dicha fecha. En la Tabla 4, se resumen los valores que se establecen en ambas normas en cuanto a la calidad del combustible, tanto para los vehículos de gasolina como para los diéseles. Se incluye en la misma tabla la norma vigente en la Unión Europea (UE) con fines comparativos.

Gasolina				
		Fase 5	Fase 6	Unión Europea (2007)
Número de octano	≥	82/82/95	82/92/95	95
Contenido de S(mg/kg)	≤	10	10	10
Contenido de benceno(%)	≤	1	0.8	1
Contenido de olefina(%)	≤	24	18/15	18
Contenido de hidrocarburos aromáticos(%)	≤	40	35	35
T50(°C)	≤	120	110	46-71(E100)
Diésel				
Índice de cetano	=	51/49/47	51/49/47	51/49/47
Contenido de S(mg/kg)	≤	10	10	10
Contenido de PAH(%)	≤	11	7	8
Punto de inflamabilidad(°C)	≥	55/50/45	60/50/45	55
T90(°C)	≤	350	350	>85(E350)
Total de contaminantes(mg/kg)	≤	/	24	24

Tabla 4. Normas de calidad de los combustibles de la fase 5, la 6 en China y en la UE (2007)

Fuente. Elaboración propia a partir de Ministerio de Ecología y Medio Ambiente, China ^[32] y European Enviroment Agency ^[33]

Como es lógico, las normas de la fase 6 son más estrictas que las de la fase 5. En el caso de la gasolina, se endurecen las normas relativas al benceno, las olefinas, los hidrocarburos aromáticos y el T50. En el caso del diésel, se han endurecido valores como los de HAP (hidrocarburos aromáticos policíclicos) o el punto de inflamación. La mayoría de las normas de la fase 6 coinciden o se acercan a las normas de la UE.

Como se muestra en la Tabla 5, en las pruebas en las que se aplicaron las normas de la fase 6 para los vehículos, se produjeron reducciones significativas de todos los contaminantes en las emisiones de los vehículos en comparación con las emisiones que se obtenían cuando se aplicaban las normas de la fase 5. Con la aplicación de la nueva legislación (fase 6), las emisiones totales de CO, hidrocarburos totales (THC) y óxidos de nitrógeno (NOx, que corresponde a la suma de NO y NO₂) se redujeron en más de un 50%. Además, la norma añade un nuevo límite correspondiente a la cantidad total de partículas.

	CO (mg/km)	THC (mg/km)	NO _x (mg/km)	Masa de partículas (mg/km)	Cantidad de partículas (unidad/km)
Fase 5	1000	100	60	4.5	/
Fase 6	500	50	35	3	6*10 ¹¹
Disminución(%)	50.00%	50.00%	41.67%	33.33%	

Tabla 5. Comparación de las emisiones de contaminantes para los vehículos con las normas de la fase 6 y 5 en el arranque en frío a temperatura ambiente. Fuente. Zheng y col. ^[13]

Zheng y col. ^[13], del Instituto de Investigación y Pruebas de Vehículos de Chongqing Co Ltd, informaron de que, tras la aplicación oficial de la norma de la fase 6, los contaminantes emitidos se redujeron entre un 45% y un 50% en el caso de los vehículos de gasolina y entre un 70% y un 81% en el caso de los vehículos diésel. Esto permite asegurar que la aplicación de la norma de la fase 6 puede tener un efecto significativo en las concentraciones de inmisión de PM_{2.5}, PM₁₀, CO y NO₂ en Shanghái.

Normativa sobre el carbón

La combustión industrial de carbón en Shanghái sigue siendo una fuente a tener en cuenta al considerar las emisiones de PM_{2.5}, PM₁₀, CO, NO₂ y SO₂.

En 2018, se comenzaron a prohibir nuevas instalaciones de carbón, a reducir la cantidad total de carbón utilizado como materia primaria para combustión directa, en la industria química, del acero y en la petroquímica. En 2020, el consumo de carbón estándar en todo Shanghái fue de 111 millones de toneladas ^[13], lo que supone solo un 1,3% menos que en 2016. La disminución es muy limitada, ya que la estructura industrial de Shanghái, dominada por la generación de energía térmica con carbón y un elevado número de industrias secundarias, es difícil de cambiar en poco tiempo. Por lo tanto, la política de restricción de la combustión de carbón es solo una razón secundaria para explicar posibles variaciones en los niveles de PM_{2.5}, PM₁₀, CO, NO₂ y SO₂ en Shanghái.

Regulación de los compuestos orgánicos volátiles (COV)

A partir de 2018, el Plan de Aire Limpio de Shanghái (2018-2022) incluye disposiciones para acelerar la eliminación de la producción y el uso de disolventes altamente volátiles.

Entre 2020 y 2021, grandes empresas de Shanghái, entre las que se encuentran la industria siderúrgica, la industria química, la fabricación de automóviles, el embalaje y la impresión, la industria del mueble, la fabricación de contenedores y las industrias de la construcción, debían

haber completado la sustitución de los COVs empleados en sus actividad por otros productos con bajo contenido en COV, al menos en un 80% ^[14], lo que supone una reducción significativa de las emisiones de COVs en Shanghái. Sin embargo, habrá que esperar a próximos informes para saber si estos objetivos se han cumplido.

Aunque los COVs no se miden en las estaciones de la red de vigilancia de Shanghái, son contaminantes importantes, no sólo por su toxicidad, sino también por su contribución a problemas medioambientales como el smog fotoquímico. Este se puede definir como la mezcla de sustancias que se genera cuando en la atmósfera se encuentran simultáneamente NOx y COVs en presencia de luz, lo que induce una serie de reacciones fotoquímicas que generan ozono y otros oxidantes fotoquímicos, que producen irritación de ojos y garganta, atacan a plantas y materiales como el caucho, producen olores y disminuyen la visibilidad. Por tanto, una disminución en las concentraciones de NO₂ y COVs permitirá reducir la cantidad de ozono troposférico, un contaminante importante en la mayoría de las ciudades de todo el mundo desarrollado.

Medidas para la prevención y el control de la contaminación por la actividad portuaria

El puerto marítimo de Shanghái es el mayor puerto de contenedores del mundo, con un rendimiento de 43,5 millones de TEUs en 2020 ^[1] (TEU, siglas correspondientes a Twenty-foot Equivalent Unit, corresponde a la capacidad de carga que tiene un contenedor estándar de 20 pies, es decir 38,51 m³).

De acuerdo con la disposición unificada del Ministerio de Transporte, en 2019, los buques que entren en la zona de control de emisiones deben emplear aceite de bajo contenido en azufre ($\leq 0,5\%$), valor que se reduce al 0,1% en 2020, y los buques fluviales interiores y los buques fluviales y marítimos directos deben utilizar gasóleo que cumpla con los requisitos de las normas nacionales y de la ciudad. Además, se establece la necesidad de reforzar la evaluación y la inspección del cumplimiento de la aplicación de la zona de control de emisiones, así como promover las alternativas de energía limpia. De hecho, para 2020, se estableció como meta llevar a cabo la transformación a la tecnología de energía limpia, como la conversión de petróleo en electricidad o en gas, de los equipos de manipulación de las terminales de contenedores y la aplicación de la tecnología de recuperación de energía potencial mecánica ^[11].

Otras medidas incluyen reforzar el control de la contaminación de las embarcaciones antiguas de navegación interior, estudiar la introducción y aplicación de las especificaciones de las normas de emisión de humos para las embarcaciones de navegación interior en uso y reforzar la aplicación e inspección de la calidad del fueloil utilizado por los barcos de navegación interior.

2. Objetivos

El **objetivo principal** de este trabajo es analizar la evolución en la calidad del aire en Shanghái entre 2017 y 2021, como resultado de la aplicación del "Plan de Aire Limpio de Shanghái (2018-2022)". Para ello, se estudiarán los niveles de inmisión de concentración de los principales contaminantes atmosféricos, registrados en las estaciones de la red de vigilancia de Shanghái en el periodo indicado, es decir: partículas en suspensión de menos de 2.5 μm (PM_{2,5}) y 10 μm (PM₁₀) de diámetro, CO, NO₂, SO₂ y O₃, así como el valor del índice de calidad del aire (AQI).

Dado que, en ese periodo, como consecuencia de la pandemia mundial del COVID-19 se cerró la ciudad un tiempo, deteniéndose prácticamente en su totalidad la actividad humana, se propone, como **objetivo secundario**, estudiar el efecto del cierre, para valorar qué efectos tienen estos cambios en el modelo de vida, tanto en la reducción de contaminantes inicial como en su recuperación con la vuelta a la actividad normal.

3. Materiales y métodos

3.1. Adquisición de datos

Los datos de concentración de los contaminantes atmosféricos analizados, así como los valores de AQI, se obtuvieron de las siguientes fuentes:

- (1) Oficina de Medio Ambiente Ecológico de Shanghái ^[15], de la que se obtuvieron los promedios diarios, entre 2019 a 2021 de las 19 estaciones de muestreo, así como los valores promedios anuales de los contaminantes en Shanghái para todos los años del periodo en estudio (2017-2021). Cada distrito de la ciudad cuenta con una estación de vigilancia que registra los niveles de inmisión de PM_{2,5}, PM₁₀, CO, NO₂, SO₂ y O₃, así como determina el AQI. Se utilizaron también los datos individuales del 2019 de las estaciones de FengXian (situada en un distrito eminentemente industrial), Jing'an (en el distrito del centro urbano) y ChongMing (situada en un distrito rural).
- (2) Boletín Nacional de Medio Ambiente de Shanghái ^[16], que contiene la evaluación global de la calidad del aire de Shanghái entre 2017-2020 (sin desglosar por estaciones).
- (3) Página web Zhenqi ^[17], plataforma en línea que recoge los promedios diarios históricos de contaminantes para Shanghái, datos que, si bien son registrados por la Oficina de Medio Ambiente Ecológico, dejan de estar disponibles en la web oficial transcurridos 3 años desde su publicación.

Los datos obtenidos de las diferentes fuentes fueron cotejados y se obtuvieron promedios diarios, mensuales y anuales de cada contaminante para facilitar la presentación de los resultados. Las tablas obtenidas con dichos valores se muestran en el Anexo I.

Por otra parte, se obtuvieron también datos meteorológicos a partir de la Página web de pronóstico del tiempo 2345 tianqi wang ^[18], que incluye las temperaturas máximas y mínimas diarias y las características meteorológicas del día (lluvia, niebla, nieve...) para Shanghái.

3.2. Test de Daniel

Para determinar si existe una tendencia en los niveles de inmisión de los diferentes contaminantes en el periodo de estudio (2017-2021) se empleó la prueba de tendencia de Daniel. Esta prueba (también conocida como rango de Spearman) permite establecer si existe una tendencia en la evolución de una serie de datos (son necesarios al menos 5 datos), y se ha aplicado en estudios relacionados con la evolución de los niveles de contaminantes atmosférico ^[19], y en ámbitos tales como la evolución de la calidad del agua en un río ^[20].

Esta sencilla prueba consiste en calcular, para cada contaminante, el valor r_s usando la ecuación (1):

$$r_s = 1 - [6 * \sum_{i=1}^n (x_i - y_i)^2] / [n^3 - n] \quad (1)$$

Donde:

r_s es el coeficiente de correlación de rangos;

n es el número de periodos de tiempo (5 años en nuestro caso);

x_i es la posición en que queda el año cuando estos se ordenan de menor a mayor valor de la concentración media anual de contaminante;

y_i es la posición que ocupa el año cuando estos se ordenan de menor a mayor (p.e. a 2017 le correspondería $y=1$, 2018 $y=2$, etc).

El valor absoluto de r_s se compara con el valor crítico W_p de la tabla estadística del coeficiente de correlación de rango de Spearman. Si $|r_s| \geq W_p$, la tendencia es significativa, y si r_s es negativa indica una tendencia a la baja en la variación de los indicadores durante el periodo de evaluación, mientras que si r_s es positiva indica una tendencia al alza. En este trabajo se utilizará esta prueba para verificar si existen tendencias significativas en la evolución de los valores anuales de los contaminantes estudiados en los periodos de tiempo de estudio. Para $n=5$ y un intervalo de confianza del 95%, el valor de W_p es 0,9.

Por otra parte, para estudiar la dispersión y simetría de series de datos, se emplearon diagramas de cajas-bigotes, que permiten mostrar visualmente grupos de datos a través de sus cuartiles.

4. Resultados y discusión

4.1. Evolución de la calidad del aire en Shanghái entre 2017 y 2021

Los parámetros registrados en las estaciones de vigilancia de la calidad del aire en Shanghái son: partículas en suspensión PM_{2,5} y PM₁₀, CO, NO₂, SO₂ y O₃, así como el valor del índice de calidad del aire (AQI) obtenido a partir de los contaminantes anteriores. En los siguientes apartados se analizará críticamente la evolución de estos parámetros en el periodo comprendido entre 2017, tomado este como año de referencia por ser el último antes de la entrada en vigor del "Plan de Aire Limpio de Shanghái (2018-2022)", y el año 2021, por ser el último año completo del que se dispone datos. No obstante, antes de pasar a realizar este análisis, se comentarán algunas peculiaridades de las condiciones meteorológicas y del entorno del municipio de Shanghái, que afectan a los niveles de inmisión registrados en el mismo.

Durante el invierno de Shanghái la temperatura del aire en contacto con la superficie terrestre desciende bruscamente, mientras que el aire de las capas superiores se enfría más lentamente, lo que da lugar a una situación de inversión térmica que dificulta los movimientos verticales de los contaminantes y por tanto su dispersión. Este fenómeno puede formar masas de contaminantes que se acumulan en el aire durante largos periodos de tiempo, lo que puede favorecer que se alcancen mayores niveles de contaminación en esta estación [21].

Otro factor importante que incide en la concentración de los contaminantes es el desplazamiento hacia el sur de los contaminantes generados en el norte de China. A menudo se considera que la línea que forman los ríos Qinling y Huaihe (ver Figura 8) constituye una separación natural de lo que se considera la parte norte y sur del país. Los municipios del norte de China (situados por encima de esta línea), usan en gran medida el carbón para calentarse en invierno, al contrario de lo que ocurre en el sur. Como consecuencia del uso de esta “energía sucia”, las ciudades del norte de China producen durante el invierno mayores emisiones contaminantes. Cuando las corrientes de aire frío procedente de Siberia se desplazan hacia el sur, transporta estos contaminantes a las ciudades del sur de China, contribuyendo considerablemente a los niveles de contaminación registrados durante el invierno en estas regiones sureñas [22].

Shanghái se sitúa inmediatamente al sur de la línea de los ríos Qinling y Huaihe, de manera que se ve especialmente afectada por estas intrusiones de contaminantes desde el norte durante el invierno. Recordar que, como se comentó en la introducción, la contribución de contaminantes procedentes de zonas externas a Shanghái se estima en un 22%.

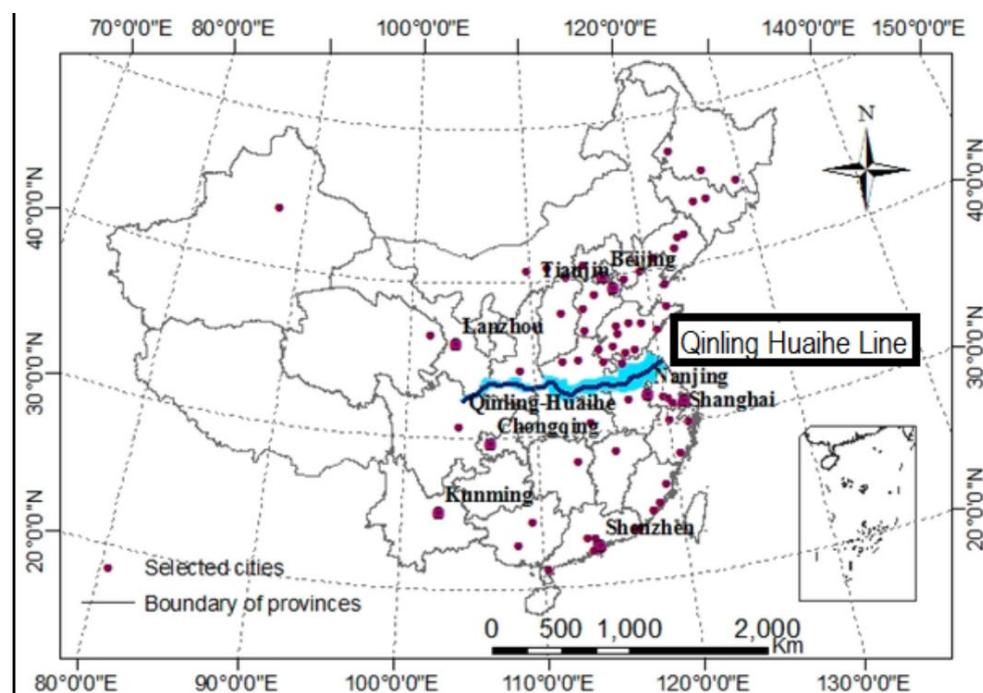


Figura 8. Línea de los ríos Qinling y Huaihe en China. Fuente. Wikipedia [34].

4.1.1. Partículas en suspensión PM2.5

Las PM2.5 son partículas en suspensión cuyo diámetro es inferior o igual a 2,5 μm . Debido a su reducido tamaño, pueden alcanzar los alvéolos al ser inhaladas y son capaces de entrar

en la sangre a través de las cavidades pulmonares, causando enfermedades respiratorias y cardiovasculares muy graves. Además, debido a su gran superficie específica, tienen gran capacidad para transportar sustancias tóxicas al cuerpo agravando sus efectos. Las PM2.5 representan el contaminante de mayor impacto en la salud a nivel mundial, y especialmente en China. De hecho, un informe publicado conjuntamente por la Organización Medioambiental Internacional Greenpeace y la Escuela de Salud Pública de la Universidad de Pekín [23], afirma que la tasa de mortalidad debida a la contaminación por PM2.5 en 31 capitales de provincia de toda China se acerca a 1 de cada 1000.

Las fuentes de PM2.5 son muy variadas y pueden ser tanto naturales como antropogénicas. Entre las primeras se encuentran los aerosoles marinos (recordar que Shanghái es una ciudad portuaria), esporas de plantas, polen, polvo proveniente de la erosión del suelo, etc. Entre las fuentes antropogénicas destacan los procesos de combustión, tanto en fuentes fijas como móviles, el desgaste de neumáticos o la fundición de metales, además de generarse como contaminante secundario por condensación de otros contaminantes gaseosos. Yang y col. [24] mostraron que la principal fuente de PM2.5 en Shanghái en 2019 eran las emisiones de los vehículos de motor, seguidas por el polvo y la combustión industrial de carbón.

La tendencia en la evolución de los niveles de PM2.5 en el aire ambiente de Shanghái entre 2017 y 2021 se analizó mediante el test de Daniel. El coeficiente de correlación de rango de PM2.5 calculado r_s fue de -0,9. Tal y como se ha explicado en el apartado 3.2. el valor de W_p para un nivel de confianza de 95% y 5 datos es de 0,9. Puesto que se cumple que $|r_s| \geq W_p$, se puede concluir que la variación de PM2.5 entre 2017 y 2021 muestra una tendencia significativa de disminución (dado que $r_s < 0$).

Como se muestra en la Figura 9, en 2017 la concentración media anual de PM2.5 fue de $38,25 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, superando por tanto el estándar nacional de calidad del aire de nivel 2 (fijado en $35 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$). Sin embargo, en los años siguientes desde la aplicación del Plan de Aire limpio 2018-2022, la concentración promedio anual de PM2.5 no supera este límite anual de concentración de nivel 2 (aplicable en zonas comerciales, industriales y rurales). Sí que se sigue superando todos los años el límite correspondiente al nivel 1, si bien, como se ha indicado, este únicamente sería de aplicación en las zonas de especial protección y entornos naturales.

Por tanto, se constata también en la Figura 9 la tendencia descendente de los niveles de inmisión de PM2.5, lo que parece indicar que las medidas adoptadas en el Plan de Aire Limpio están surtiendo efecto a este respecto. El transporte por carretera es una de las principales fuentes de emisión de PM2.5 en los centros urbanos y, como se ha indicado, el plan ha adoptado diversas medidas en este sentido. En 2019 entró en vigor la fase 6 de la normativa que regula la composición de los combustibles y que, como se ha comentado, permite reducir las emisiones contaminantes. De hecho, de acuerdo con los estudios realizados por Zheng y col. [13], tras la aplicación oficial de la norma de la fase 6, se produjo una reducción del 33% de las partículas emitidas por los vehículos, lo que sin duda ha contribuido al descenso de PM2.5 en la ciudad de Shanghái. También las medidas de control del uso de carbón deben haber contribuido a esta tendencia a la baja de las PM2.5. Cabe señalar que Shanghái es una ciudad costera, y el aerosol marino es una fuente importante de partículas en suspensión. Además, el puerto de Shanghái es considerado el mayor puerto del mundo por volumen de mercancías. Todo el tránsito portuario contribuye también a los niveles de inmisión de este

contaminante, ya que son una fuente importante de emisión de PM2.5 entre otros contaminantes. Las medidas de control establecidas en el Plan en este sector, deben haber contribuido igualmente a la disminución de PM2.5.

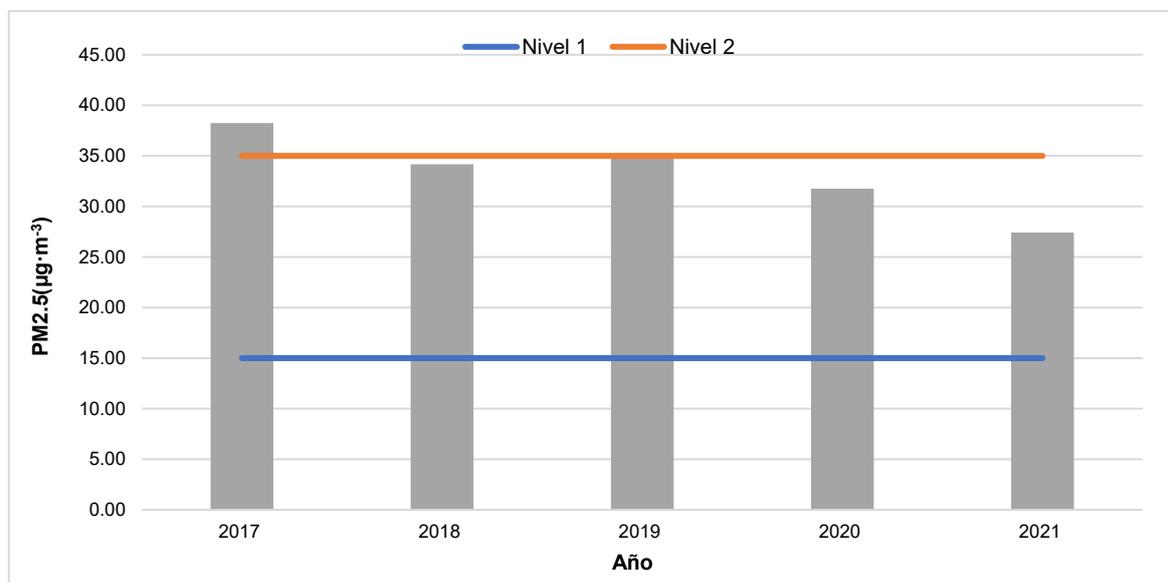


Figura 9. Evolución de la concentración media anual de PM2.5 en Shanghái 2017-2021 y límite de concentración de nivel 1 y 2 anual. Fuente. Elaboración propia

A pesar de las mejoras comentadas, cabe señalar que los datos registrados siguen estando muy lejos del valor guía establecido por la OMS para las PM2.5, correspondiente a $5\ \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ de media anual [2].

Con el fin de comprobar cuál es la situación respecto a las concentraciones promedio de 24 h establecidas por la norma de calidad del aire, y visualizar las variaciones estacionales de las PM2.5 a lo largo del año, en la Figura 10 se han representado las medias diarias de PM2.5 para cada uno de los años en estudio (2017-2021).

Lo primero que se observa en la Figura 10 es que las concentraciones medias diarias de PM2.5 superan con cierta frecuencia el estándar nacional de calidad del aire de nivel 2 ($75\ \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$) (ver Tabla1). Si en 2017 el número de días que superaron dicho nivel fue de 28, en 2021 se redujo a sólo 3 días, lo que muestra una mejora importante. No obstante, hay que señalar que existen una gran cantidad de días en los que se supera el valor guía establecido por la OMS para la media diaria de PM2.5 ($15\ \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$) [2].

Por otra parte, la Figura 10 muestra que la variación de las concentraciones de PM2.5 en Shanghái se caracterizan por un patrón en forma de U, con concentraciones mínimas en los meses de verano (junio-octubre) y máximas en invierno. Para visualizar mejor este patrón, en la Figura 11 se han representado las medias mensuales por estaciones. Es en los meses de diciembre, enero y febrero cuando se supera con mayor frecuencia la concentración diaria que delimita el nivel 2. Esto puede ser debido a diversas causas, tanto naturales como antropogénicas. En invierno el consumo energético y, en consecuencia, las emisiones de PM2.5 originadas principalmente en los procesos de combustión son mayores. Como se ha comentado, a las emisiones generadas en el propio Shanghái hay que sumar las procedentes

del norte del país, donde el uso del carbón es más generalizado, y que son arrastradas por los vientos Siberianos hacia el sur durante los meses de invierno. Además, las situaciones de inversión térmica durante esta estación dificultan la dispersión de los contaminantes. Por otra parte, la estación en la que se producen las mayores precipitaciones en Shanghai es el verano, lo que puede favorecer la sedimentación húmeda de las partículas en suspensión durante esta estación, contribuyendo a la disminución de los niveles de inmisión de las PM2.5.

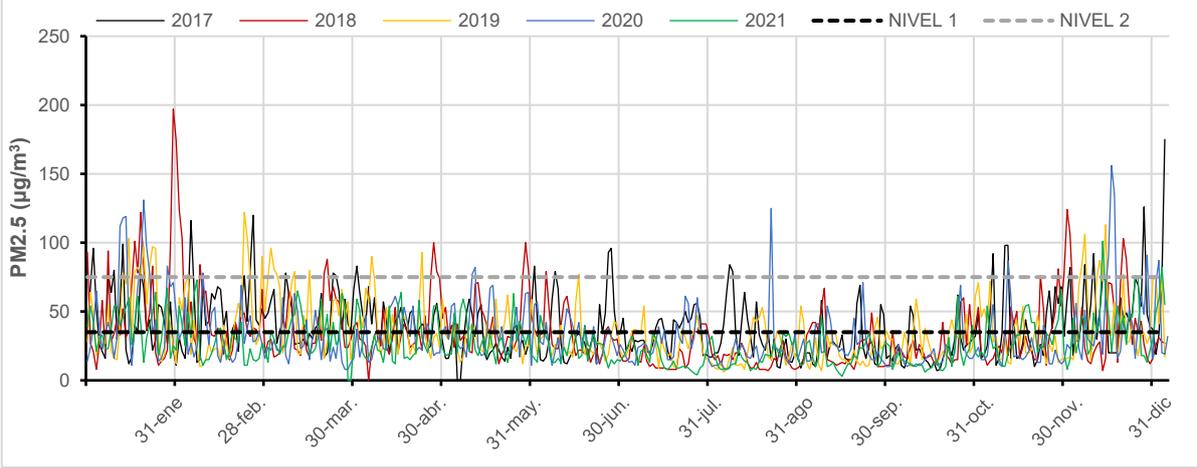


Figura 10. Concentraciones promedio de 24 h de PM2.5 en Shanghai, 2017-2021 y límites de concentración de nivel 1 y 2 diarios

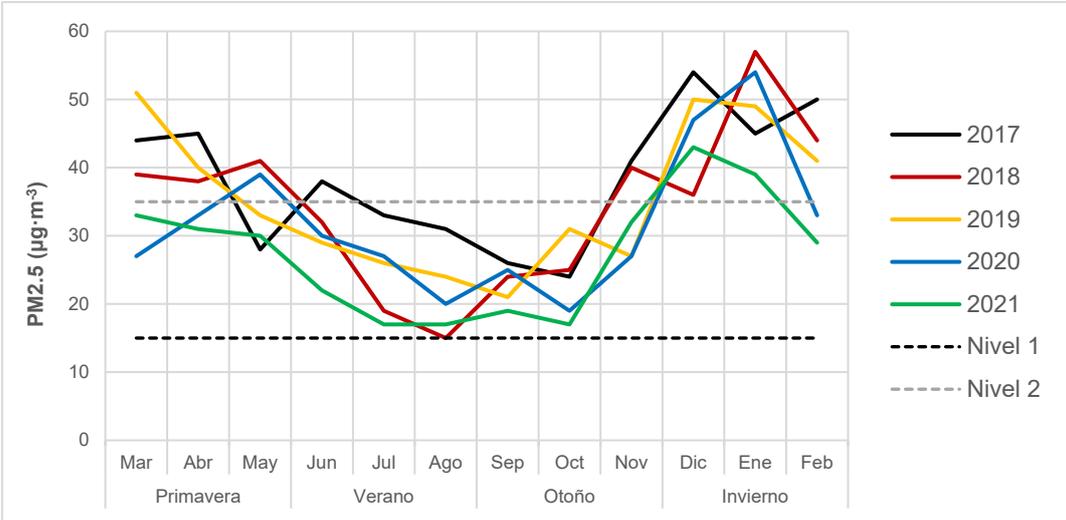


Figura 11. Concentraciones medias mensuales de PM2.5 en Shanghai por estaciones entre 2017-2021 y límites de concentración de nivel 1 y 2 diarios.

4.1.2. Partículas en suspensión PM10

Las PM10 son partículas en suspensión que tienen un diámetro menor o igual a 10 µm. Al ser inhaladas pueden acceder a la parte superior del tracto respiratorio y también pueden causar daños en los sistemas respiratorio y cardiovascular aunque, dado que su superficie específica es menor que en las PM2.5, su capacidad de transportar sustancias tóxicas al cuerpo es más

reducida y son menos peligrosas para la salud que las PM_{2,5}. Pueden tener un origen natural, p.e. polen, moho, erosión de superficies, aerosoles marinos, etc, o antropogénico, como en las actividades agrícolas, incendios o tráfico. La principal fuente de PM₁₀ en Shanghái es la combustión industrial y, en menor medida, los gases de escape de los vehículos de motor y el polvo, sin menospreciar otras fuentes ya comentadas para las PM_{2,5}.

Como en el caso anterior, la aplicación del análisis de rango mediante la tendencia Daniel de las PM₁₀ dio un coeficiente de correlación de rango $r_s = -0,9$. Por lo tanto, se puede concluir que el cambio global de PM₁₀ de 2017 a 2021 en Shanghái muestra una tendencia significativa a la disminución, algo que puede confirmarse en la Figura 12. Las medidas introducidas en el Plan de Aire Limpio referentes a los vehículos de motor y el empleo de carbón pueden haber sido decisivas en esta tendencia, ya que estas se encuentran entre las principales fuentes de emisión de las partículas en suspensión, tanto PM_{2,5} como PM₁₀.

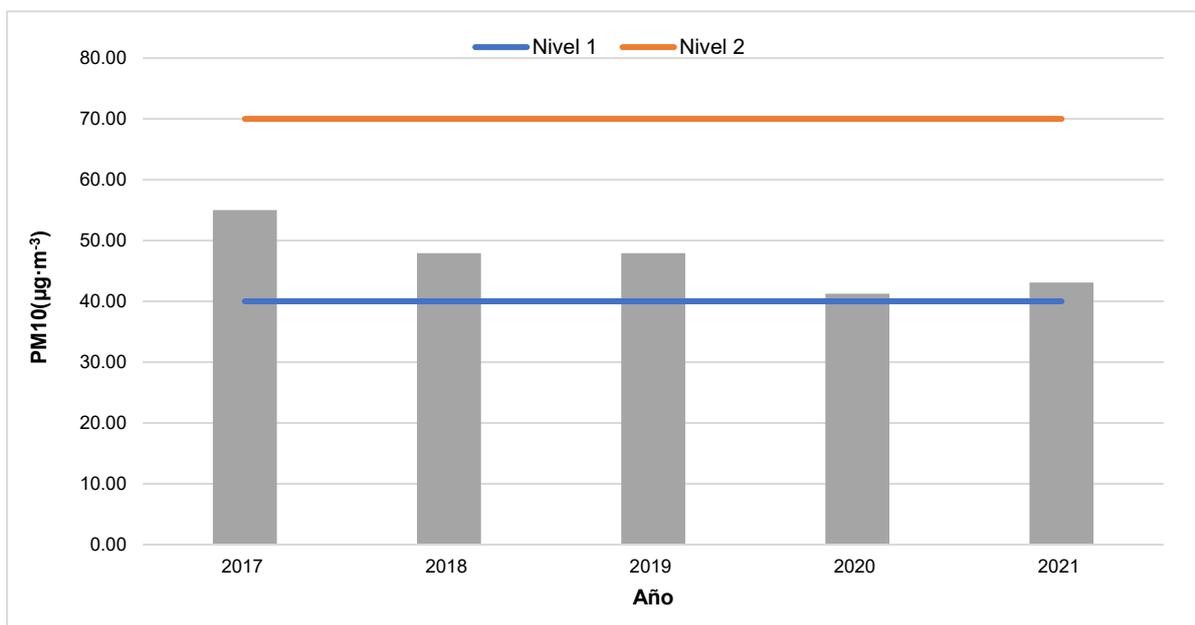


Figura 12. Evolución de la concentración media anual de PM₁₀ en Shanghái 2017-2021 y límite de concentración de nivel 1 y 2 anual.

Por otra parte, como se muestra en la Figura 12, las concentraciones medias anuales de PM₁₀ en Shanghái entre 2017 y 2021, se sitúan por debajo del estándar nacional de calidad del aire de nivel 2, aplicable en zonas comerciales, industriales y rurales. No obstante, triplican el valor guía establecido por la OMS que es de $15 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ [2].

La representación de las medias diarias de las concentraciones de PM₁₀ se muestra en la Figura 13. La tendencia estacional es muy similar a la observada en el caso de las PM_{2,5}, con una curva en forma de U, que presenta valores mínimos en los meses de verano y máximos en invierno y primavera. De hecho, las fuentes principales de emisión, los fenómenos de intrusión desde el norte del país y las dificultades de dispersión por los fenómenos de inversión térmica, son aplicables para ambos tipos de partículas en suspensión, así como las vías de eliminación o sumideros, tales como las precipitaciones de verano.

Por otra parte, en el caso de las PM10, son muy escasas las superaciones del estándar nacional de calidad del aire de nivel 2, que oscilan entre 2 y 3 días al año, excepto en 2020, año en que no se produjo ninguna superación del límite correspondiente al nivel 2. Las PM10 son, por tanto, menos preocupantes que las PM2.5 para la calidad del aire del municipio de Shanghái, lo cual no implica que los valores registrados sean buenos, ya que el valor guía diario establecido por la OMS es de $45 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ [2], valor que es superado ampliamente un número importante de días.

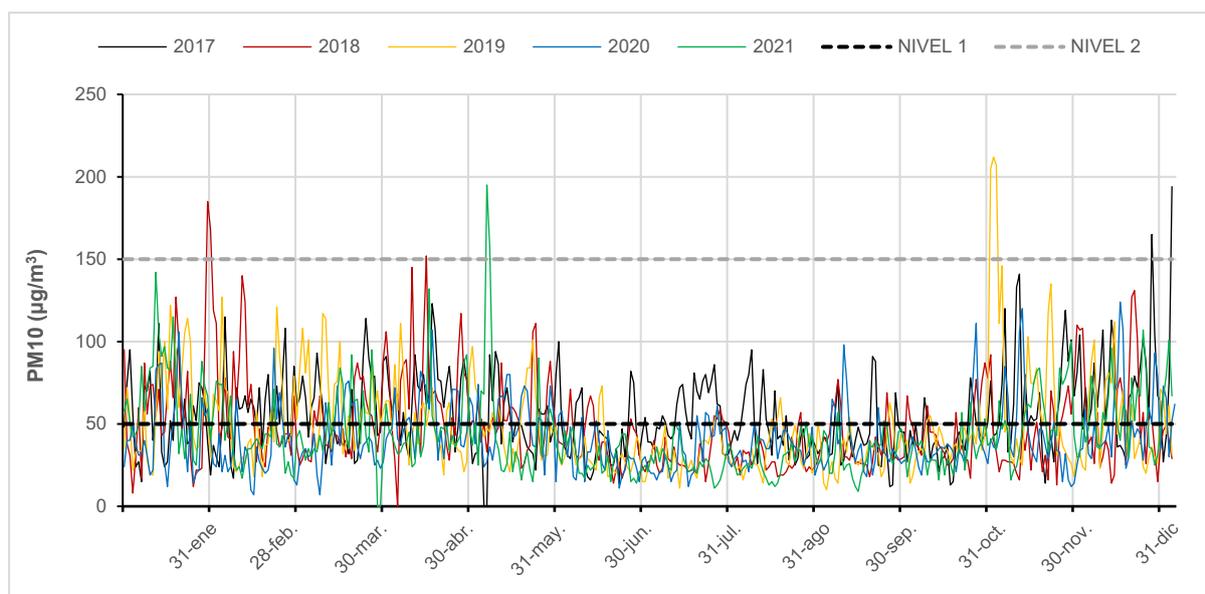


Figura 13. Concentraciones promedio de 24 h de PM10 en Shanghái, 2017-2021 y límites de concentración de nivel I y 2 diarios

Llama la atención el hecho de que en 2017 se registraron elevadas concentraciones de PM10 durante el mes de julio, en comparación con los restantes años. Una revisión de los datos de precipitación correspondientes a este año, muestra que este mes fue inusualmente seco, ya que entre el 12 y el 29 de julio de este año se produjo un periodo de 16 días consecutivos de sol, lo cual es un evento meteorológico poco frecuente en Shanghái en verano. De hecho, en los meses de julio de 2018-2021 se produjeron precipitaciones cada 3 días de media. Esto pudo propiciar la acumulación de PM10 en 2017, dando lugar a concentraciones inusualmente altas, mientras que la lluvia intermitente y la consecuente humedad ambiental, favoreció la sedimentación de las partículas los restantes años.

Cabe comentar que, aunque no se han incluido los datos en la memoria, también se han comparado los niveles de PM2.5 y PM10 en diferentes distritos de Shanghái, no habiéndose encontrado diferencias significativas en los niveles de partículas en suspensión registrados en las mismas. Esto puede estar relacionado, al menos parcialmente, con el hecho de que las partículas en suspensión tienen un fuerte componente natural, y la proximidad al mar de la ciudad asegura una marcada influencia del aerosol marino. Por otra parte, cada tipo de zona presenta fuentes de emisión de partículas en suspensión características, como puede ser el tráfico, la actividad industrial o la agrícola.

4.1.3. Monóxido de carbono (CO)

El monóxido de carbono se genera como producto de la combustión incompleta de los combustibles que contienen carbono, y es un gas altamente tóxico. Al ser inhalado por los seres humano, el CO se une rápidamente a la hemoglobina, provocando así que el oxígeno no pueda ser transportado a través del torrente sanguíneo, causando asfixia. Las principales fuentes de CO en Shanghai son los gases de escape de los vehículos de motor, la actividad portuaria y la combustión industrial.

Aunque los estándares de calidad del aire para el CO se basan en concentraciones diarias (media de 24 horas) y horarias, y no incluyen un valor anual (ver Tabla 1), se han representado en la Figura 14 las medias anuales con el fin de ver la tendencia de la concentración de CO en el periodo de años estudiado. Utilizando la tendencia de Daniel, se obtiene un coeficiente de correlación de rangos (r_s) de -0,3. Dado que $|r_s| \leq W_p$, se puede concluir que la variación en la concentración promedio anual de CO en el periodo 2017-2021 no tienen una tendencia significativa a la disminución. De hecho, como muestra la Figura 14, si bien hay una bajada importante inicial, a partir de 2018 se mantiene estable. Estas bajadas, coinciden con el inicio de la aplicación del plan, y parecen señalar la efectividad de las iniciativas tomadas.

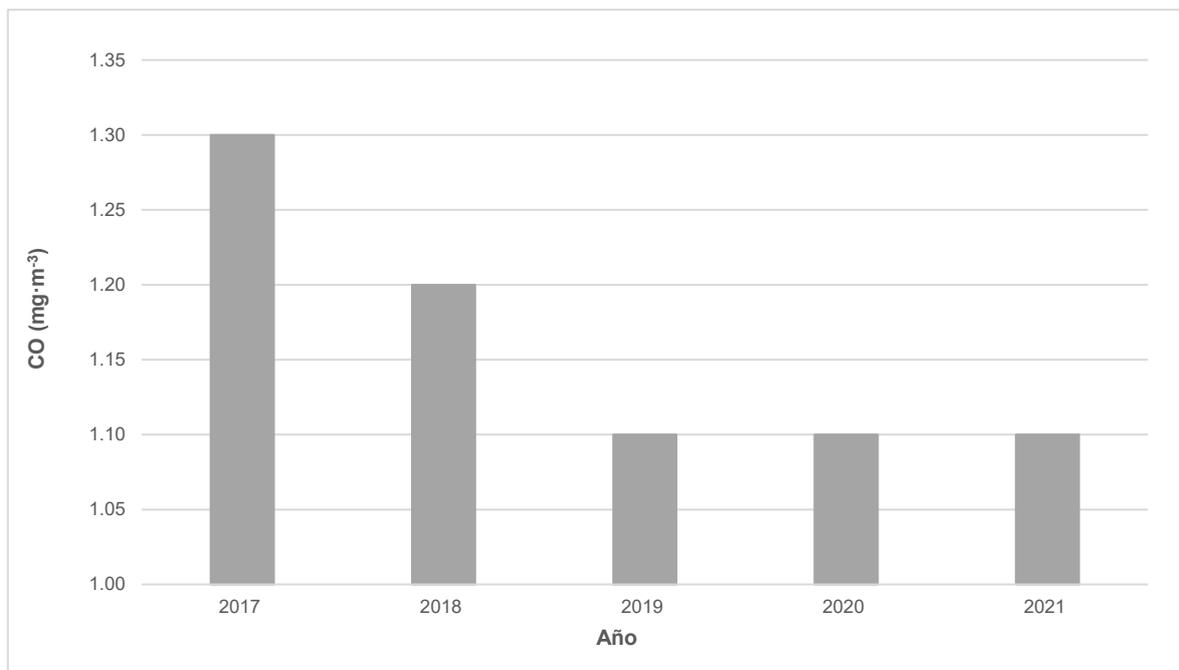


Figura 14. Evolución de la concentración media anual de CO en Shanghai 2017-2021.

En la Figura 15 se muestra la evolución de la concentración de CO a lo largo del año, empleando las concentraciones medias diarias para cada año en estudio. Como se observa, de nuevo se obtienen valores máximos en los meses más fríos, debido al mayor consumo de energía y los factores meteorológicos comentados. Se producen también concentraciones elevadas en primavera y otoño, que pueden tener un origen natural relacionado con el desprendimiento de grandes cantidades de hidrocarburos durante la primavera, cuya oxidación genera CO, y a la degradación de la clorofila durante el otoño que, de nuevo, liberaría CO. Pero también puede haber una contribución antropogénica, ya que la quema de la paja del arroz, cultivo importante en los distritos rurales de Shanghai se produce en otoño.

Se observa, las concentraciones se sitúan muy por debajo del límite correspondiente al nivel 1 y 2 (en este caso coinciden) y del valor guía de la OMS (todos ellos de $4 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$). Por tanto, no sólo se cumplen los estándares de calidad del aire de China sino que se puede concluir que los niveles registrados de CO no son perjudiciales para la salud.

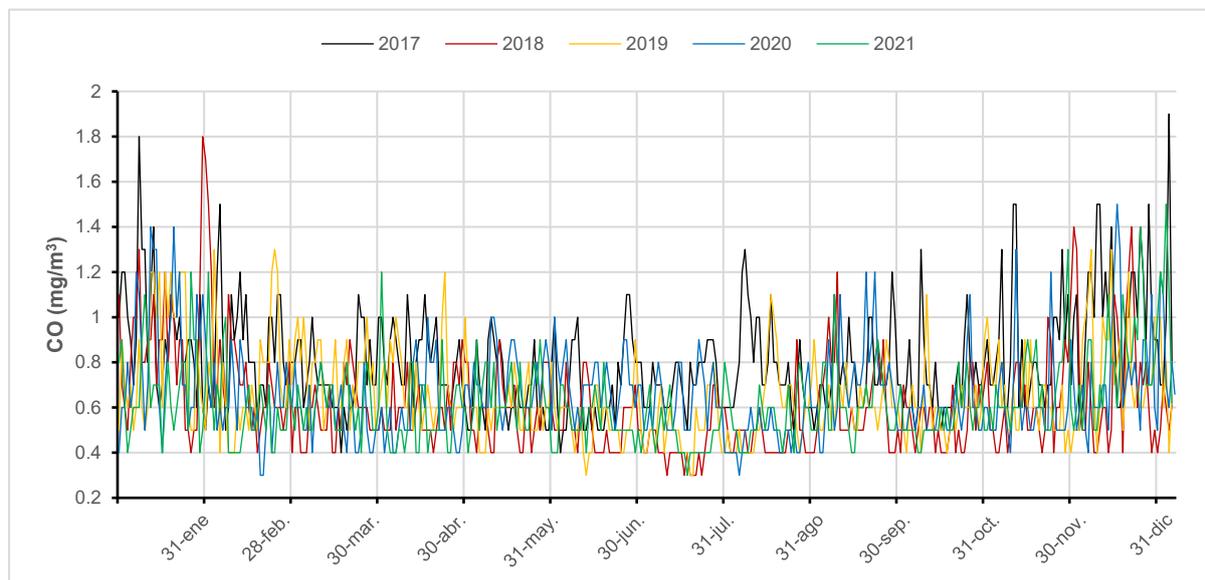


Figura 15. Concentraciones promedio de 24 h de CO en Shanghai, 2017-2021.

En el caso del CO, las actividades desarrolladas en cada distrito, mostraron tener una marcada influencia en los niveles de inmisión registrados. Para poner de manifiesto esto se ha realizado la figura 17 con los datos correspondientes al 2019, ya que en este año se habían implantado muchas de las medidas del plan, y aún no estaba influenciado por la pandemia del COVID-19. En la gráfica se muestran las concentraciones diarias de CO en tres tipos de estación: industrial, rural y urbana. Las estaciones escogidas han sido las de FengXian, ChongMing y Jing'an. La primera es una estación situada en un distrito en el que predomina la actividad industrial y que se sitúa junto a la costa, como se muestra en la Figura 16, a. La segunda se sitúa en un distrito en el que la principal actividad es la agricultura y que se sitúa al otro lado del Río Yangtze, como se muestra en la Figura 16, b. La tercera es una estación situada en el centro del núcleo urbano de Shanghai y en la que la principal fuente de emisión es el tráfico (ver Figura 16, c). Los valores mostrados en la Figura 17 demuestran que los niveles más elevados de CO se alcanzan en las estaciones en las que predominan el tráfico y la actividad industrial, obteniéndose concentraciones inferiores en la estación marcadamente rural. Esto corrobora que los procesos de combustión de los vehículos y procesos industriales son las principales fuentes de CO en el municipio de Shanghai.

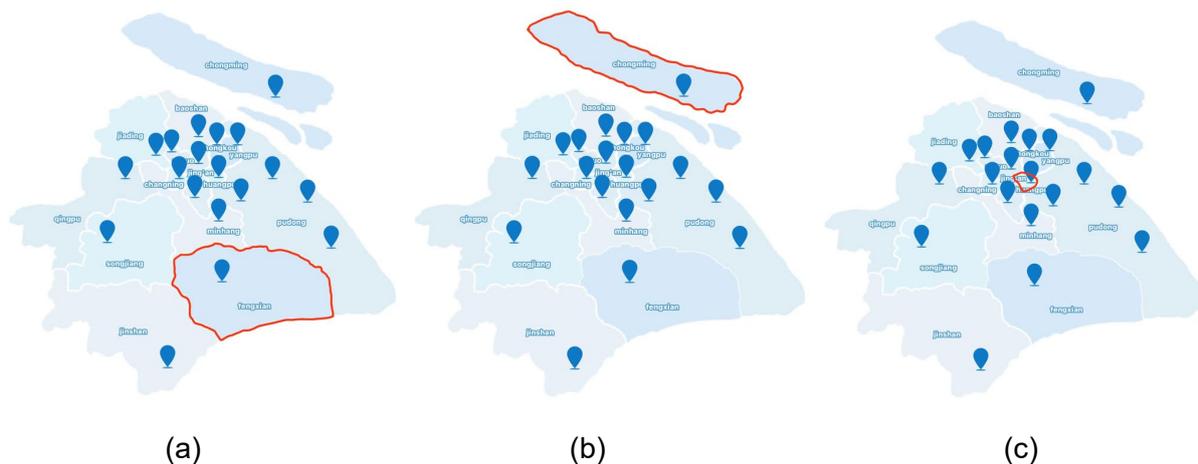


Figura 16. Situación de las estaciones de monitoreo de los contaminantes atmosféricos en Shanghai seleccionadas como representativas de distinto tipo de actividad: a) distrito industrial; b) distrito rural; c) distrito urbano. En rojo las estaciones seleccionadas.

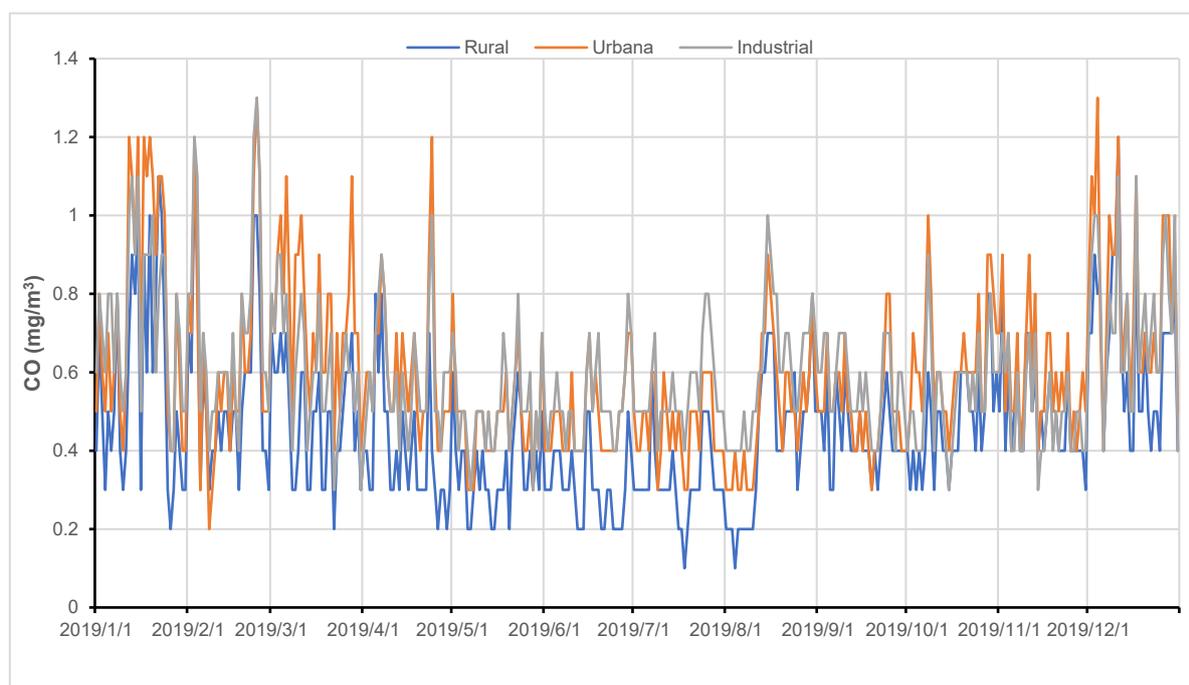


Figura 17. Concentraciones diarias de CO a lo largo del 2019 en tres tipos de estación: industrial, urbana y rural.

4.1.4. Dióxido de nitrógeno (NO₂)

El NO₂ es un gas de color rojo pardo, tóxico e irritante. Su inhalación puede provocar inicialmente síntomas de tos y, cuando esta es prolongada, puede causar daños en los pulmones, como edema pulmonar y dificultades respiratorias. Presenta efectos crónicos, como debilidad del sistema neurológico. Además, contribuye a importantes problemas medioambientales, como la precipitación ácida o el smog fotoquímico, que afecta a las principales ciudades de todo el mundo.

Este contaminante se genera principalmente en los procesos de combustión mediante diferentes mecanismos, tanto a partir del nitrógeno presente en los combustibles como, principalmente, a partir del nitrógeno y oxígeno molecular del aire que, a altas temperaturas, reaccionan para formar monóxido de nitrógeno y finalmente dióxido de nitrógeno. El control de sus emisiones es, por tanto, complejo, ya que la eliminación del nitrógeno presente en el combustible no permite evitar su formación, como sí ocurre en el caso del SO₂. Los procesos de combustión industriales y la fundición de metales, especialmente aquellos procesos que emplean carbón, durante cuya combustión se generan especies que catalizan la reacción entre N₂ y O₂, así como los gases de escape generados por los vehículos a motor, pueden ser, con toda probabilidad, las principales fuentes de NO₂ en Shanghái.

La aplicación del test de Daniel a las concentraciones promedio anuales de NO₂ proporciona un coeficiente de correlación de rangos $r_s = -0,9$, por lo que se puede concluir que la concentración de NO₂ entre 2017-2021 muestra una tendencia significativa a la baja.

En la Figura 18 se muestran las concentraciones promedio anuales de NO₂ que, a pesar de la tendencia descendente, se siguen situando en valores próximos al límite de nivel 1 y 2 (estos coinciden y se sitúan en 40 µg·m⁻³) y se superan en los años 2017 y 2019. Destacar que el valor guía recomendado por la OMS [2] para la media anual de NO₂ es de 10 µg·m⁻³, valor ampliamente superado en todo el periodo.

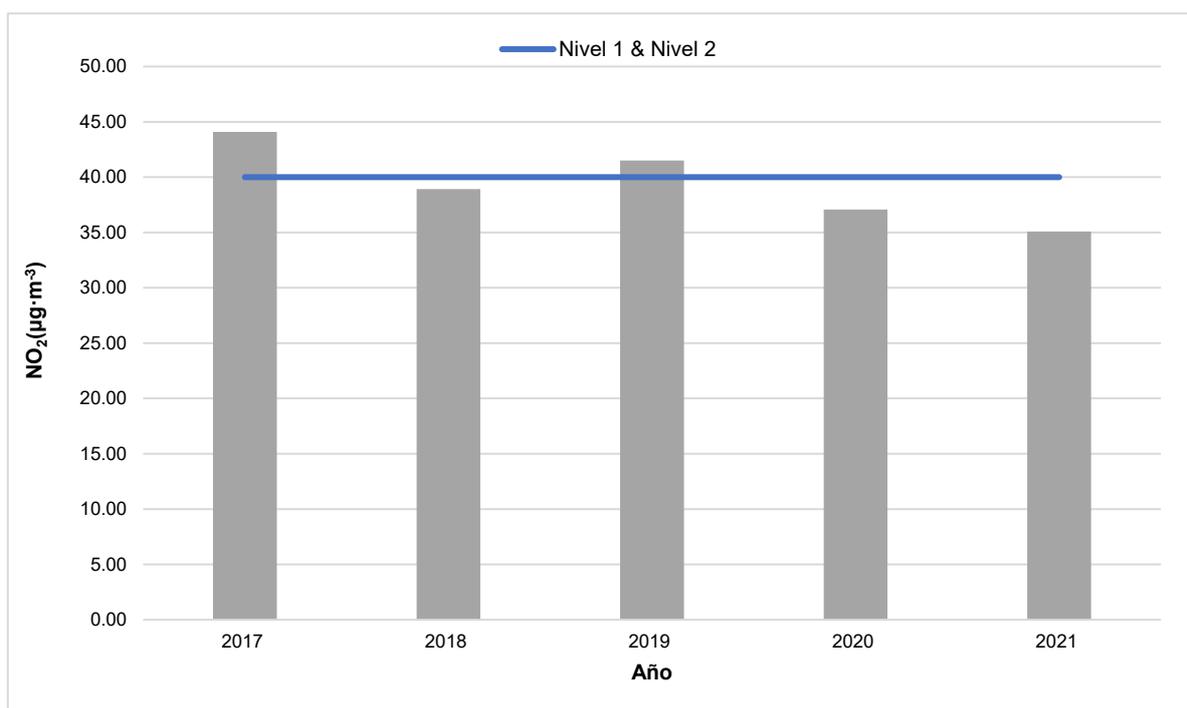


Figura 18. Concentración promedio anual de NO₂ en Shanghái 2017-2021 y límite del nivel 1 y 2 de calidad del aire.

En la Figura 19, se muestran las variaciones estacionales para el NO₂, empleando las concentraciones promedio de 24 h. La forma en U de la gráfica es análoga a las mostradas anteriormente, con un mínimo en los meses de verano. La similitud en el comportamiento entre todos estos contaminantes es lógica, ya que las principales fuentes de emisión de todos

ellos son las mismas: actividad industrial, vehículos móviles y actividad portuaria, principalmente debido a los procesos de combustión; además, los factores meteorológicos comentados contribuirán de manera similar al desplazamiento y dispersión de todos estos contaminantes, así como la intrusión de contaminantes procedentes del norte de China. Durante los meses más cálidos y con mayor radiación solar, los niveles de NO₂ se sitúan en valores más bajos, en general por debajo de los estándares de calidad diarios correspondientes al nivel 1-2 (80 µg·m⁻³), aunque en general se supera durante todo el año el valor guía de la OMS (25 µg·m⁻³). Adicionalmente a los factores comentados, este descenso durante el verano se explica también por la reactividad de este contaminante. El NO₂ reacciona en presencia de luz con los COVs, para generar ozono y otros oxidantes fotoquímicos, dando lugar al denominado smog fotoquímico, fenómeno que se comentará más detalladamente en el apartado 4.1.6 dedicado al ozono. En los meses de invierno, donde la cantidad de radiación lumínica es menor, esta vía de eliminación de los NO₂ se ve limitada, y como se ha comentado, las fuentes de emisión también son mayores. Esto hace que los niveles de NO₂ en invierno superen con frecuencia los límites de nivel 1 y 2 establecidos por los estándares de calidad del aire en China para este contaminante, situación que se prolonga durante la primavera y gran parte del otoño.

Por otra parte, si comparamos el número de días en que se supera el límite de 24 h establecido para el NO₂, este pasa de 56 en 2017 a 40 y 41 en 2018 y 2019 respectivamente, y a sólo 18 en 2020, subiendo a 29 en 2021. La tendencia es claramente descendente, pero más marcado en 2020, probablemente debido al periodo de cese de actividades asociado al COVID-19, que afectó especialmente a los meses de invierno, periodo donde habitualmente se alcanzan las mayores concentraciones de NO₂.

Como en el caso del CO, también se han representado las concentraciones diarias de NO₂ a lo largo del 2019 en tres tipos de estaciones: industrial, urbana y rural (ver Figura 16). Para ello, se han seleccionado las mismas estaciones ya mencionadas: FengXian (industrial), Jing'an (urbana) y ChongMing (rural). Como se observa en la Figura 20, las concentraciones más elevadas de NO₂ se registran en la estación urbana de Jing'an, en la que se superó en 13 ocasiones el estándar de calidad del aire diario para el NO₂. Esto apunta a que los vehículos son la principal fuente que contribuyen a los niveles de inmisión de NO₂ registrados en Shanghái, ya que en la zona industrial se registraron concentraciones inferiores con únicamente un día con superación del límite diario, y mucho menores todavía fueron las concentraciones de NO₂ registradas en la zona rural, que no superó dicho límite ningún día y que, sólo puntualmente, alcanza valores comparables a la estación anterior, quizás relacionado con periodos de mayor actividad en esta zona y con labores de quema. Aunque desde 2019 se ha limitado la quema de la paja del arroz ^[25], los periodos en los que tradicionalmente se produce esta son entre el 15 de mayo y el 5 de junio y entre el 20 de octubre y el 20 de diciembre.

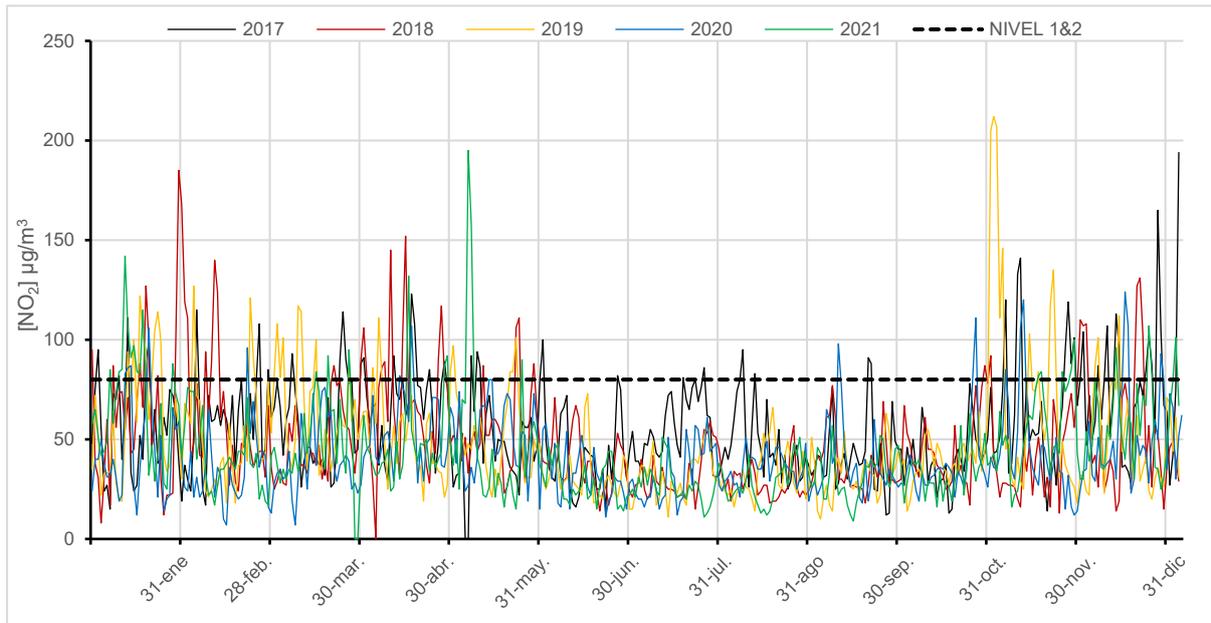


Figura 19. Concentraciones promedio de 24 h de NO₂ en Shanghai, 2017-2021 y límites de concentración de nivel 1 y 2 diarios

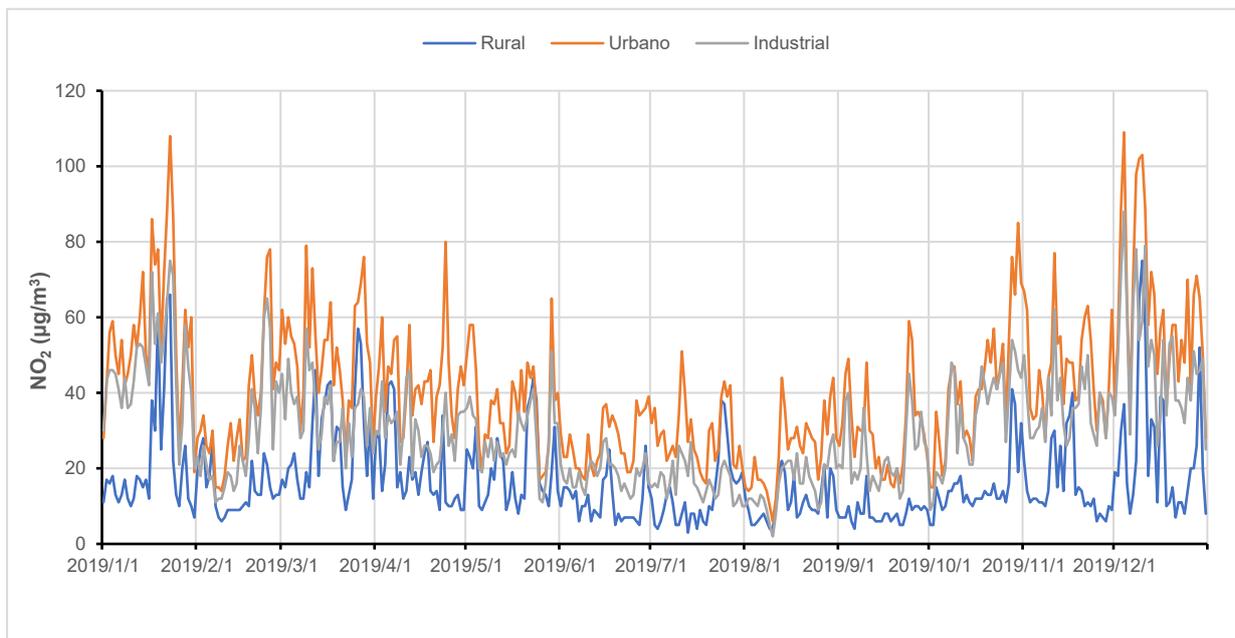


Figura 20. Las concentraciones diarias de NO₂ a lo largo del 2019 en tres tipos de estación: industrial, urbano y rural.

4.1.5. Dióxido de azufre (SO₂)

El SO₂ es un gas incoloro que causa irritación ocular, de la garganta y vías respiratorias, provocando tos, dificultades respiratorias y sensación de tensión en el pecho. Puede también causar alteraciones psíquicas, edema pulmonar y paro cardíaco, dependiendo de la concentración. Un estudio sistemático realizado en 2011 demostró que la inhalación de SO₂

estaba asociada a los nacimientos prematuros [26]. Además, es el principal responsable de la precipitación ácida.

La tendencia del SO₂ en el aire ambiente de Shanghái de 2017 a 2021, se analizó utilizando el test de Daniel, cuyo coeficiente de correlación de rangos fue $r_s=-1$. Se puede, por tanto, concluir que la variación de la concentración de SO₂ de 2017 a 2021 presenta una tendencia significativa a la disminución, lo que parece avalar de nuevo los buenos resultados del plan de Shanghái. Cabe señalar que esta tendencia, más que a las medidas adoptadas para los vehículos, puede estar relacionada con las medidas limitantes del uso del carbón, ya que el paso de la fase 5 a la 6 en la norma relativa a la composición de los combustibles empleados por los vehículos, no afecta a la regulación de la concentración de azufre permitida.

Como se muestra en la Figura 21, los valores promedio anuales de SO₂ en Shanghái cumplen los estándares de calidad del aire, situándose muy por debajo del límite anual del nivel 1 (20 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$), en todo el periodo 2017-2021, lo que indica que la calidad del aire respecto este contaminante es buena.

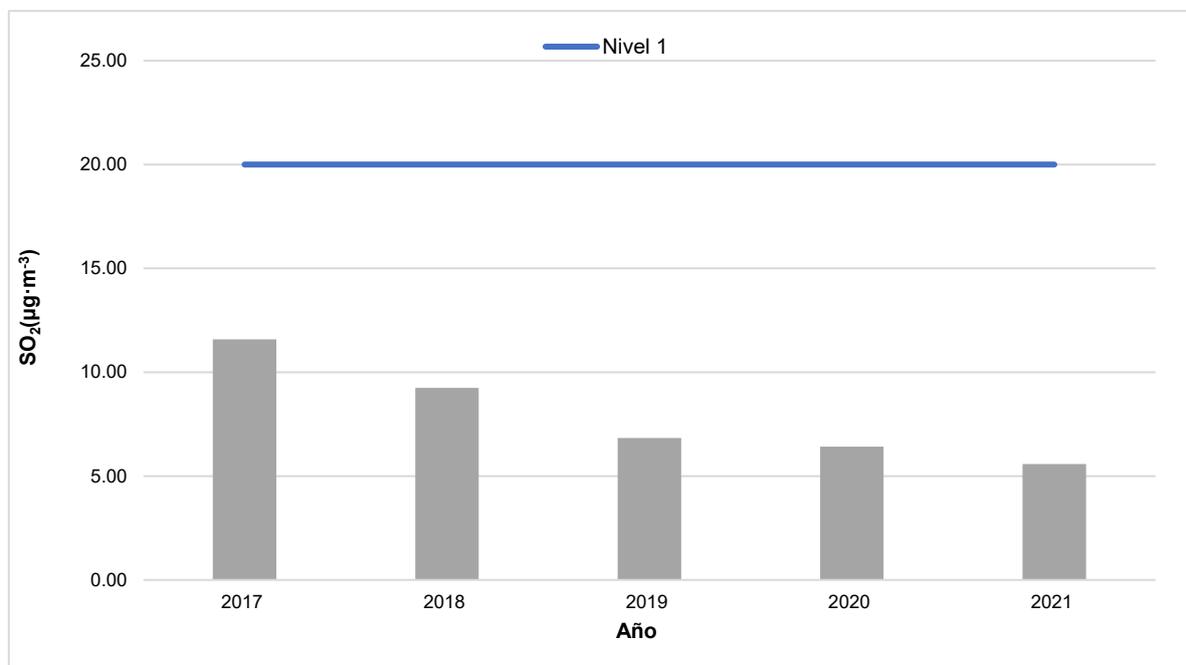


Figura 21. Concentración promedio anual de SO₂ en Shanghái 2017-2021 y límite del nivel 1 de calidad del aire para este contaminante.

En la Figura 22 se observa que durante todo el año los niveles diarios de SO₂ también se mantuvieron por debajo del límite de 24 h del nivel 1 (50 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$) en todo el periodo en estudio, así como por debajo del valor guía establecido por la OMS (40 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$) [2]. Se observa un aumento de la concentración de este contaminante en los meses más fríos de invierno, determinado por los factores meteorológicos y las variaciones de las emisiones, para todos los años estudiados (2017-2021), pero especialmente para el año 2017 y 2018, pues cada vez el efecto es más reducido y las concentraciones alcanzadas menores.

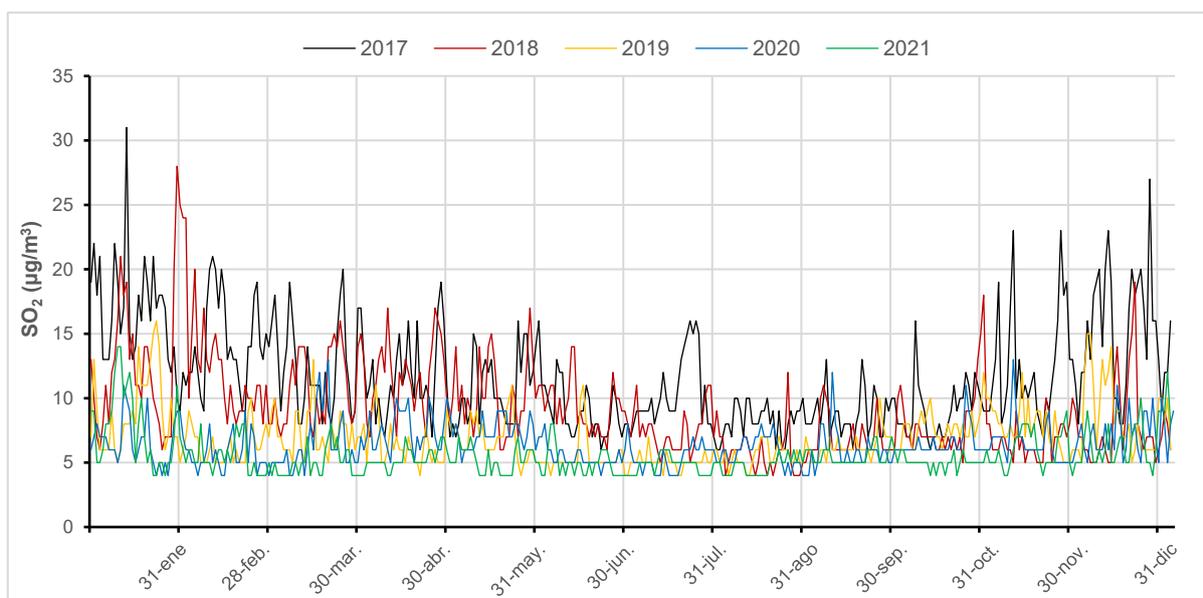


Figura 22. Concentraciones promedio de 24 h de SO₂ en Shanghái, 2017-2021.

La principal fuente de SO₂ en Shanghái es la combustión industrial, ya que, como se ha indicado, el contenido en azufre en las gasolinas empleadas por los vehículos se redujo significativamente años atrás, si bien el paso de la fase 5 a la 6 en la norma relativa a la composición de los combustibles empleados por los vehículos no ha afectado a la concentración de azufre. Esto viene corroborado por el análisis de los niveles de SO₂ registrados en la estación industrial de FengXian en comparación con los niveles registrados en la estación urbana de Jing'an, donde los vehículos son la principal fuente de emisión de contaminantes (ver Figura 23), y que fueron claramente inferiores. El carbón puede contener porcentajes variables de azufre, generalmente superiores a los de otros combustibles fósiles, especialmente si es de mala calidad, y este azufre, durante el proceso de combustión, es emitido en forma de SO₂. Este es uno de los motivos por los que, entre las medidas de acción del Plan de Aire Limpio se encuentra la reducción del consumo de carbón en las actividades industriales del municipio de Shanghái. También la actividad portuaria y las actividades de las fundiciones, que con frecuencia usan menas de minerales sulfurados, pueden contribuir a que los niveles de SO₂ sean más elevados en esta estación industrial de FengXian. Curiosamente, en la estación de ChongMing, correspondiente a una zona rural, se registran niveles de SO₂ comparables a los de la zona industrial. Es posible que en estas zonas siga usándose el carbón en la calefacción de las viviendas y como combustible en las cocinas, como ocurre en muchas zonas rurales en China. Además, esta estación se sitúa muy próxima a la desembocadura del Río Yangtze al mar, y cerca de dos puertos importantes de Shanghái (ver Figura 24) y, por lo tanto, el tránsito de barcos es elevado. Hay que tener en cuenta que los buques emiten cantidades importantes de este contaminante.

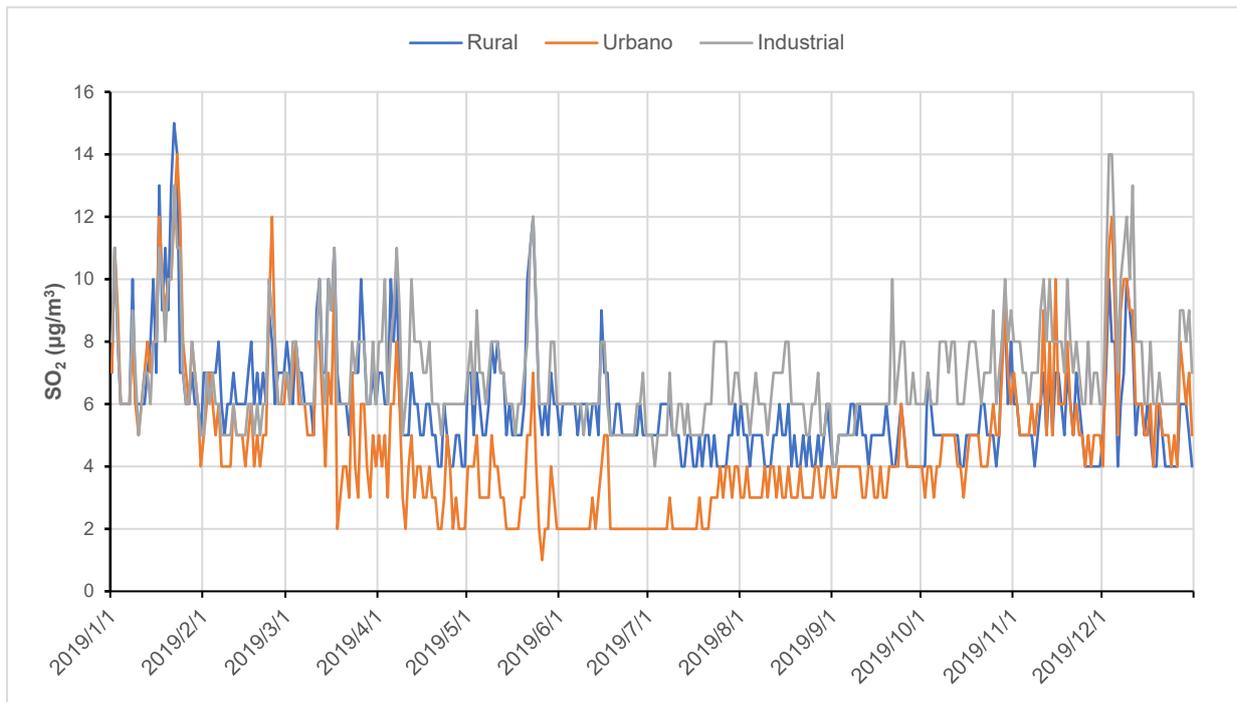


Figura 23. Concentraciones diarias de SO₂ a lo largo del 2019 en tres tipos de estación: industrial, de tráfico y rural.



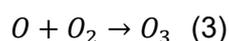
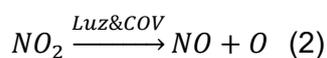
Figura 24. Ubicación de los puertos de Shanghai y su área de influencia.

Fuente. WIKIPEDIA (2001) [1].

4.1.6. Ozono (O₃)

El ozono es un gas azul claro con un olor característico y altamente oxidante. Provoca tos, irritación de garganta y de todo el sistema respiratorio, causa un empeoramiento de afecciones como asma, bronquitis y enfisema y daños pulmonares permanentes si la exposición es prolongada, además de afectar al sistema nervioso central [35]. No es habitualmente un contaminante primario, ya que su uso como tal en las actividades antropogénicas es muy limitado. Sin embargo, se genera durante el smog fotoquímico, siendo por tanto un contaminante secundario.

El smog fotoquímico se produce cuando en el aire se encuentran simultáneamente óxidos de nitrógeno (NO_x) y COVs en presencia de luz solar. El proceso simplificado se esquematiza en las ecuaciones 2 y 3. Como se observa, inicialmente se produce un radical de oxígeno inestable que forma el ozono por reacción con una molécula de oxígeno. Así pues, la concentración de ozono depende en gran medida de la concentración de NO₂ y COV y de la cantidad de radiación solar.



Los estándares de calidad para el ozono se basan en la máxima diaria de periodos de 8 horas (percentil 99) y en el valor horario, y no en la media anual, por lo que para establecer si se cumplen con los límites correspondientes al Nivel 1 y Nivel 2, deberíamos disponer de los datos horarios, que, como se ha comentado, no están disponibles en la información suministrada por el Centro Nacional para la Monitorización del Medioambiente en China (CNMMC). Los datos de la Tabla 6 se han tomado del Boletín Nacional de Medio Ambiente de Shanghái [16] y corresponden al percentil 90 de la máxima diaria octohoraria de O₃.

O ₃ (µg/m ³)	
2017	181
2018	160
2019	151
2020	152
2021	145

Tabla 6. Percentil 90 de la máxima diaria octohoraria de O₃ en Shanghái de 2017 a 2021

Fuente: Boletín Nacional de Medio Ambiente de Shanghái [16].

Los datos de la Tabla 6 se han utilizado para el análisis de la tendencia de Daniel a lo largo del periodo de estudio. El coeficiente de correlación de rangos de O₃ calculado r_s es de -0,9, por lo que se puede concluir que existe una clara tendencia a la disminución de la concentración de ozono en los años estudiados. Esta disminución es una consecuencia lógica de la bajada de los niveles de NO₂, precursor del ozono, y probablemente de los niveles de COVs, ya que, aunque este parámetro no es monitorizado en las estaciones de medida del CNMMC, el plan también incluye diversas medidas para la reducción de estos contaminantes,

tanto en las pinturas como en las emisiones de los vehículos, por lo que cabe esperar que sus niveles de inmisión también se hayan reducido.

Por otra parte, como se muestra en la Figura 25, en 2017 se superó el límite del Nivel 2 por lo que no cumple con los estándares de calidad, pero desde el año 2018, año de inicio del plan, se sitúan por debajo de dicho límite, con una lenta pero clara tendencia descendente como se ha comentado. Sin embargo, sí se excede el valor guía recomendado por la OMS, que es de $100 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$.

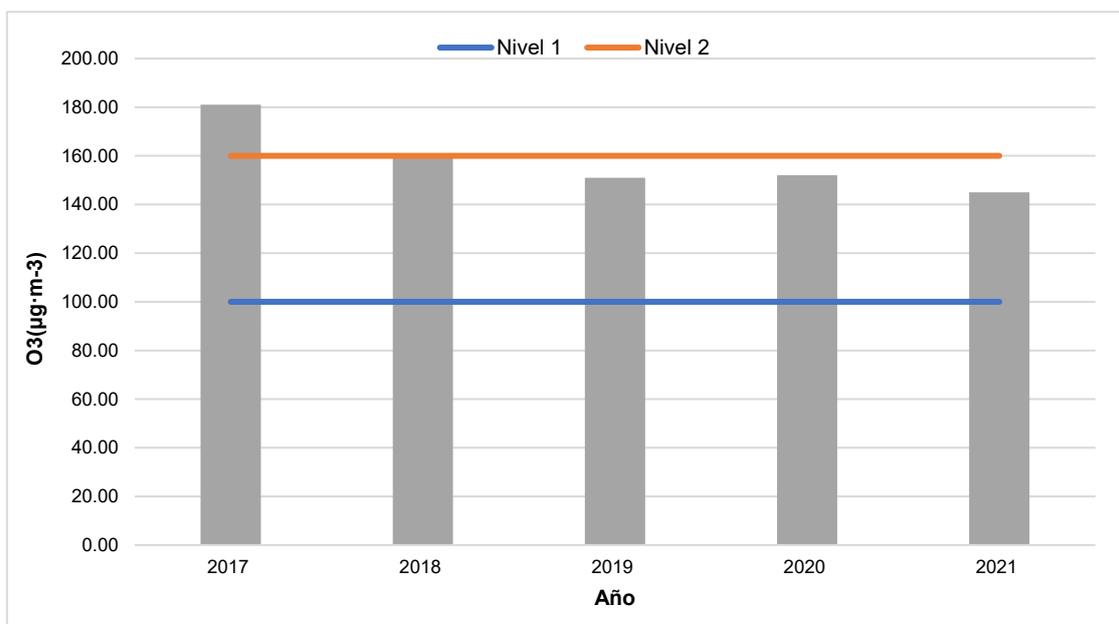


Figura 25. Percentil 90 de la máxima octohoraria móviles diarias de O₃ en Shanghái 2017-2021.

En la Figura 26 se han empleado las concentraciones medias diarias de O₃ con el fin de observar las variaciones estacionales de este contaminante. Como se observa, las concentraciones más altas de O₃ se producen entre abril y junio, y las más bajas en los meses de invierno, especialmente en diciembre-enero. Esta variación, prácticamente inversa a lo observado con los contaminantes anteriores, es lógica si tenemos en cuenta los procesos de formación del smog fotoquímico que dan lugar a la generación de O₃ comentados anteriormente. En el caso de Shanghái los meses de verano no se corresponden con los de mayor radiación solar (como ocurriría en España p.e.), dado que este es el periodo en el que se producen las mayores precipitaciones. Observar que en el año 2017 se obtiene un pico de concentración de ozono poco habitual, y cuya explicación se encuentra en la inusual temporada de precipitaciones que se produjo este año, como ya se comentó al hablar de las PM₁₀. Este periodo de fuerte radiación solar produjo un aumento de los niveles de ozono poco habitual en estas fechas en la ciudad de Shanghái. Aunque, como se ha indicado, en los estándares de calidad no se establece un límite promedio de 24 h para el ozono, sí que hay un máximo horario de $200 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$. En vista de los promedios diarios registrados, y teniendo en cuenta que durante la noche las concentraciones de ozono son siempre inferiores a las diarias (debido a que su formación se detiene en ausencia de radiación y el ozono existente tiende a ser consumido por su carácter oxidante), queda patente que este límite se supera con frecuencia, ya que para que los promedios diarios entre abril y septiembre sean superiores a $200 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, el promedio horario durante las horas diurnas tiene que haber sido muy superior

a este valor. Dado que los datos horarios no son suministrados por el CNMMC, no se ha podido hacer un estudio más pormenorizado a este respecto.

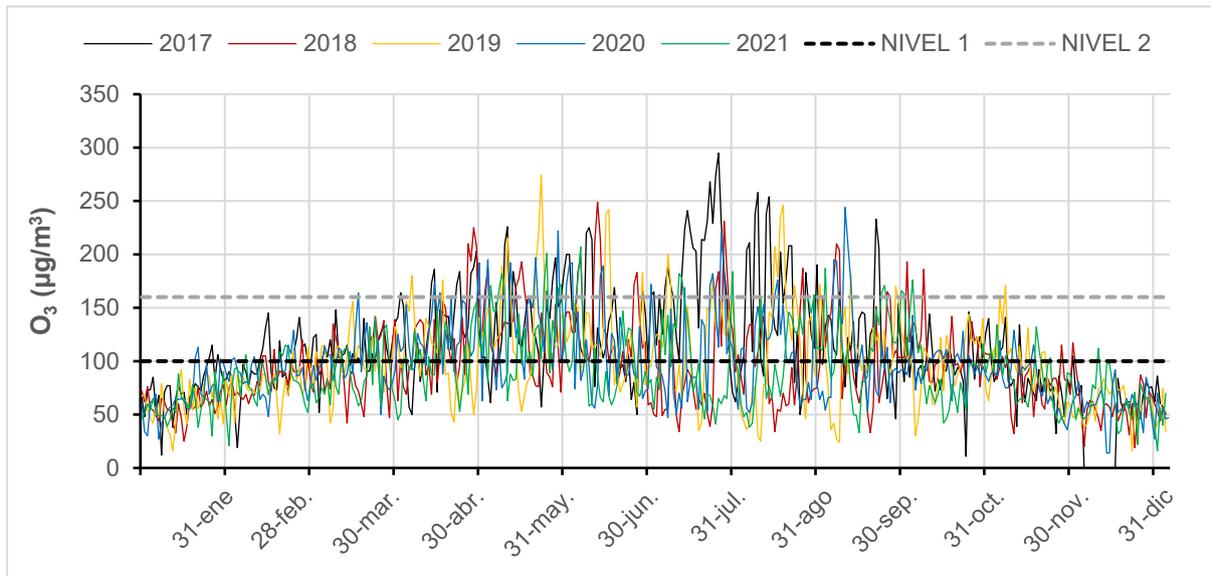


Figura 26. Concentraciones promedio diarias de O₃ en Shanghai, 2017-2021

La estrecha relación entre los niveles de NO₂ y O₃ queda patente en la Figura 27, en la que se representan las concentraciones de ambos compuestos para el año 2019. Se ha empleado promedios mensuales para facilitar la observación de la tendencia de ambos contaminantes a lo largo del año. Como se observa, las curvas de concentración de NO₂ y O₃ siguen una tendencia de imagen especular casi perfecta. Como se vio en las ecuaciones 2 y 3, el ozono se genera por reacción del NO₂ en presencia de luz, por lo que en los meses de mayor radiación solar se obtienen mayores niveles de ozono y menores de NO₂, que es consumido en el proceso. Además, las concentraciones elevadas de ozono también contribuyen a la rápida oxidación del NO₂ y de otros contaminantes, haciendo que de este modo los niveles de este y otros contaminantes sean menores en verano.

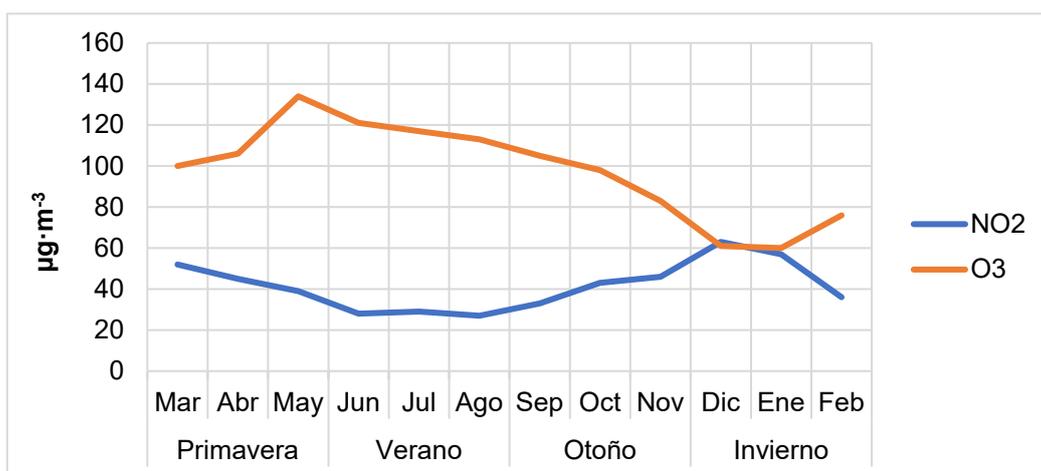


Figura 27. Comparación de los valores mensuales de NO₂ y O₃ para 2019.

Por otra parte, si observamos la Figura 28, que muestra las concentraciones diarias de ozono para las estaciones de FengXian (industrial), Jing'an (urbana) y ChongMing (rural) durante el año 2019, vemos que no hay diferencias significativas entre las distintas estaciones.

Habitualmente las zonas suburbanas presentan niveles de ozono mayores que las zonas urbanas, ya que el viento traslada los contaminantes primarios (NOx y COVs) generados en la ciudad y estos van reaccionando en presencia de luz hasta formar O₃. Esta misma reacción se da también en la zona urbana, pero aquí parte del O₃ es consumido por la reacción con otros contaminantes, dado que el ozono es un fuerte oxidante. Sin embargo, este consumo del contaminante, no ocurre de forma tan importante en las zonas suburbanas. Este efecto, únicamente se ve en los meses más fríos (entre diciembre y marzo). Sí que se observa, no obstante, que los valores mínimos corresponden en general a la estación situada en el centro del núcleo urbano (Jing'an).

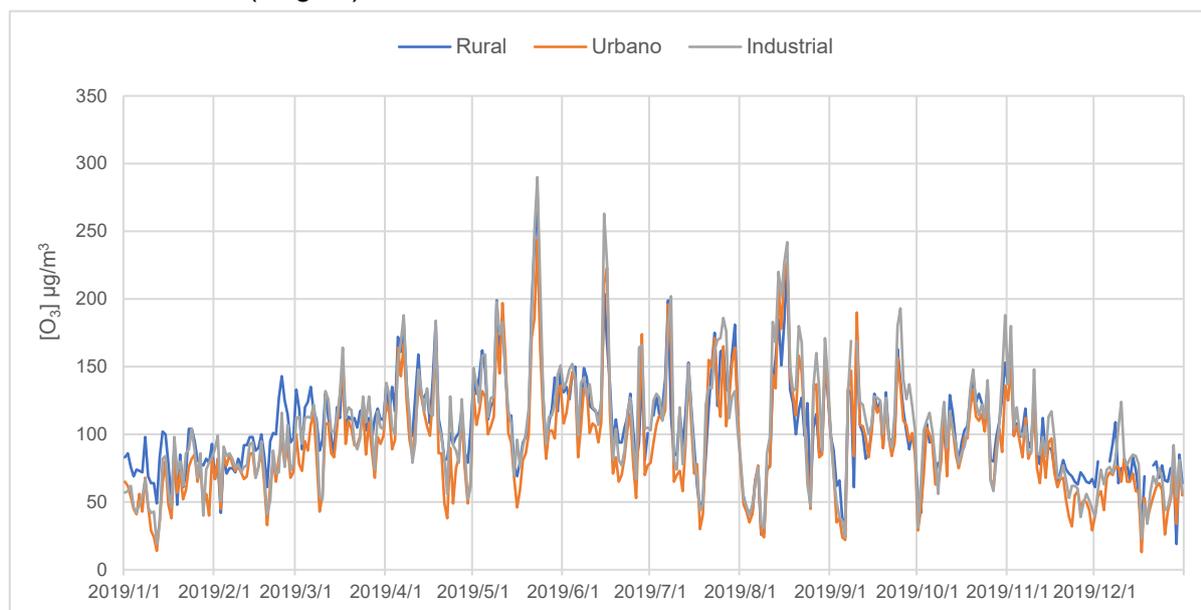


Figura 28. Concentraciones diarias de O₃ a lo largo del 2019 en tres tipos de estación: industrial, de tráfico y rural.

4.1.7. Índice de Calidad del Aire (AQI)

Para finalizar, se comentará la evolución del índice de calidad del aire (AQI), parámetro relacionado con todos los contaminantes anteriores, ya que para su cálculo se tienen en cuenta los índices individuales de los mismos.

En la Tabla 7 se muestran las concentraciones promedio de los distintos contaminantes monitorizados en Shanghái, para el periodo de estudio: 2017 a 2021, y los valores promedios anuales para el AQI, obtenidos a partir de los datos que ofrecen los Organismos Oficiales ^[15].

	AQI	PM2.5(µg·m ⁻³)	PM10(µg·m ⁻³)	CO(mg·m ⁻³)	NO ₂ (µg·m ⁻³)	SO ₂ (µg·m ⁻³)	O ₃ (µg·m ⁻³)
2017	83.67	38.25	55.00	0.81	44.08	11.58	111.67
2018	70.17	34.17	47.92	0.61	38.92	9.25	96.00
2019	72.50	35.17	47.92	0.66	41.50	6.83	97.83
2020	67.92	31.75	41.25	0.66	37.08	6.42	97.67
2021	63.83	27.42	43.08	0.62	35.08	5.58	91.25

Tabla 7. Promedios anuales para el AQI y las concentraciones de los contaminantes asociados en Shanghái entre 2017-2021.

Fuente. Oficina de Medio Ambiente Ecológico de Shanghái ^[15]

Como se observa, los valores obtenidos para el AQI corresponden a una calidad del aire aceptable (ver Tabla 2), que únicamente supone una preocupación moderada para la salud de personas excepcionalmente sensibles a la contaminación ambiental. Los contaminantes que resultan más preocupantes son las partículas en suspensión (PM2.5 y PM10), el NO₂ y O₃, que superan en ocasiones los estándares de calidad del aire de China y con frecuencia los valores guía establecidos por la OMS para la protección de la salud. De hecho, el responsable de más del 50% de los días con mala calidad del aire (colores naranjas, rojos y morados) en el periodo 2017 - 2021 fue el ozono.

Con el fin de que las variaciones a lo largo del periodo de estudio sean más visuales, se han representado en la Figura 29 los porcentajes de variación de cada parámetro tomando como base el primer año de la serie, es decir, 2017. Como se observa, tanto el AQI como sus contaminantes asociados presentan en general una tendencia a la baja en el periodo de estudio. El descenso más significativo corresponde a la concentración de SO₂, que disminuyó un 52%. El O₃, en cambio, presentó el menor descenso de todos los contaminantes (18%).

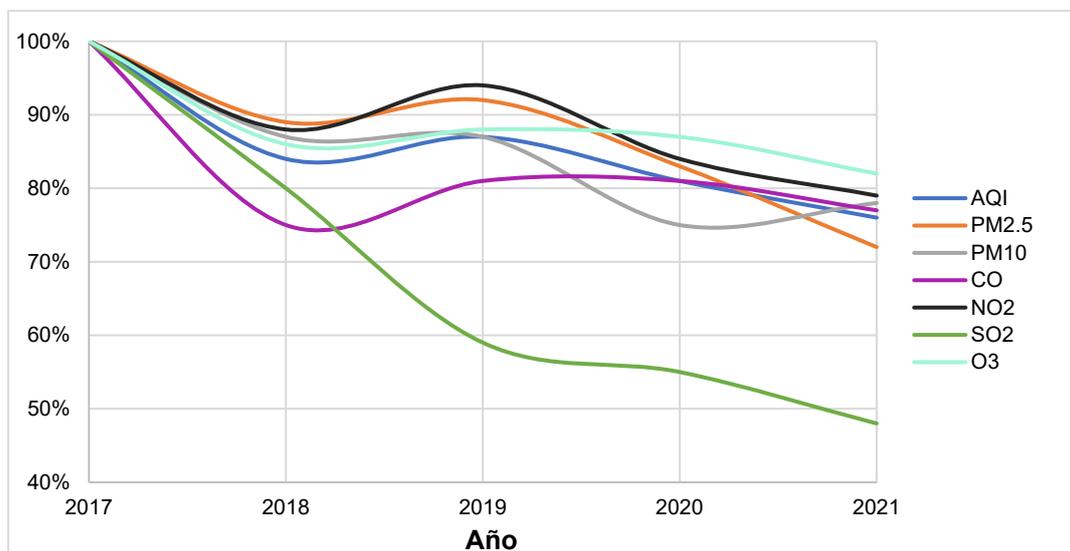


Figura 29. Variación AQI y concentración de los contaminantes asociados en Shanghái (2017-2021)

No obstante, los valores promedio pueden enmascarar periodos o situaciones de mala calidad del aire, por lo que en la Figura 30 se ha representado la distribución del número de días con cada índice de calidad del aire en Shanghái para los distintos años estudiados, lo que puede proporcionarnos mayor información. Se observa que el número de días con calidad del aire buena (color verde) experimenta un aumento en el periodo estudiado, mientras que el número de días con mala calidad del aire (naranja, rojo y morado) disminuye claramente. Así, se ha pasado de un 75,34% de los días con índice de calidad del aire buena o aceptable (verde o amarillo respectivamente) en 2017, a un 92,33% en 2021. En 2021, el número de días con una calidad del aire aceptable (color amarillo) es el más frecuente y se mantiene estable en torno a los 210 días. El granate, considerado como peligroso, no se ha alcanzado en todo el quinquenio.

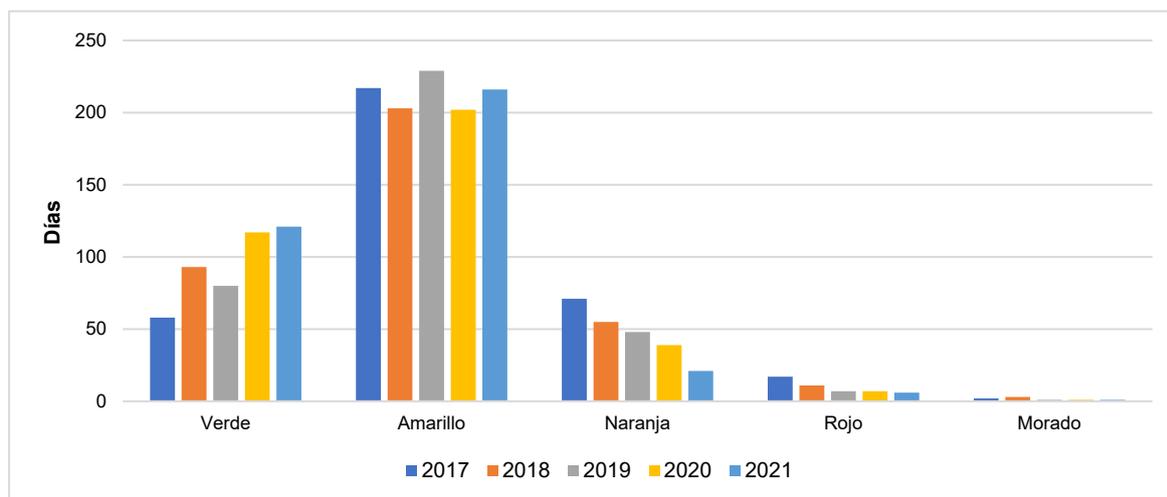


Figura 30. Distribución de los días según el AQI en Shanghái (2017-2021).

4.2. Análisis del efecto del COVID-19 en la calidad del aire de Shanghái

Los resultados comentados en el apartado anterior parecen indicar que el Plan de Aire Limpio de Shanghái (2018-2022), y todas las medidas adoptadas, están contribuyendo a una mejora de la calidad del aire de la ciudad. Sin embargo, más allá del citado Plan, hay otro factor que ha marcado el periodo de estudio: la reciente pandemia COVID-19.

A pesar de las desafortunadas consecuencias de la epidemia de COVID-19 para toda la humanidad, proporciona una rara oportunidad para estudiar los efectos de la reducción de la actividad humana en la calidad del aire. Por lo tanto, el objetivo de este capítulo es determinar el impacto del cierre de la ciudad en la calidad del aire en Shanghái, mediante el estudio de los cambios en las concentraciones de inmisión de los contaminantes del aire durante el cierre y la recuperación de la actividad, para tratar de extraer algunas lecciones que aporten diferentes ideas para optimizar la calidad del aire en el futuro.

4.2.1. COVID-19 y Fiesta del Año Nuevo Chino en Shanghái

El 1 de diciembre de 2019, se detectó el primer caso en el mundo del nuevo coronavirus en Wuhan y, durante los siguientes 2 meses, se pusieron en marcha importantes medidas de emergencia de salud pública en toda China. Shanghái no fue una excepción. Dada la propagación y la naturaleza desconocida del virus, el gobierno de Shanghái anunció el 23 de enero de 2020 el cierre de la industria, el cierre de las instituciones educativas y laborales y la restricción de los viajes de los residentes: es un verdadero "bloqueo de Shanghái".

Para estudiar el efecto de este bloqueo sobre la calidad del aire, se compararán los niveles de inmisión de los distintos contaminantes considerando cuatro periodos temporales (ver Figura 31).

Pre-bloqueo: del 3 de enero al 22 de enero de 2020: 20 días antes de la imposición del embargo, manteniendo Shanghái sus operaciones normales.

Bloqueo 1: del 23 de enero al 9 de febrero de 2020, con medidas estrictas de reducción de la movilidad durante 18 días [27]. Por ejemplo, se exige un registro sanitario a las personas que entran en Shanghái, y la mayoría de los edificios residenciales adoptan una gestión de entradas y salidas para controlar el movimiento de las personas.

Bloqueo 2: del 10 de febrero al 23 de marzo de 2020, con cierta relajación de las restricciones, durante un total de 43 días [27]. La actividad industrial reanuda paulatinamente la actividad, aunque se mantiene el teletrabajo donde es posible. Se prohíbe la entrada a Shanghái a quienes no tengan un lugar de residencia y un empleo en ella. Todos los edificios residenciales se gestionan mediante entradas y salidas. Los centros educativos permanecen cerrados.

Post-bloqueo: del 24 de marzo de 2020 al 12 de abril de 2020, cuando Shanghái reanuda en gran medida sus operaciones. Se permite la libre circulación dentro de la ciudad. Los centros educativos siguen cerrados en este periodo.

Durante el bloqueo 1 y 2, todo el tráfico aéreo en China está restringido. Sin embargo, en el post-bloqueo se reabre el tráfico interprovincial gradualmente, lo que significa la apertura de Shanghái a nivel interno, pero no a la comunidad internacional. En general, las políticas de China de principios de 2020 sugieren restricciones más estrictas dentro del país al principio del bloqueo; y restricciones más estrictas fuera del país al final del bloqueo (es decir, cuando la epidemia esté controlada y se relaje a nivel nacional) para evitar la propagación e importación del virus.[38]

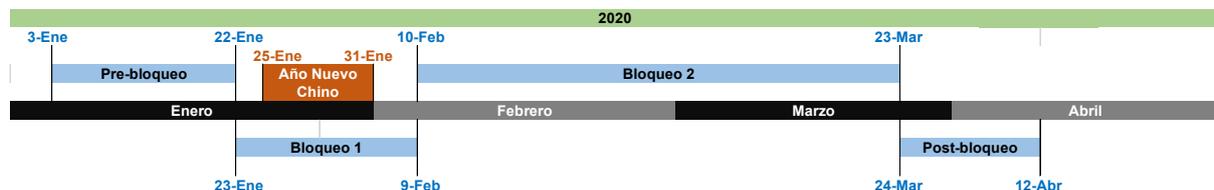


Figura 31. Periodos temporales establecidos para el estudio.

Para establecer el periodo pre-bloqueo y post-bloqueo se han tomado 20 días, pues se ha considerado que son suficientes para que la media no se vea muy afectada por la variabilidad de las condiciones meteorológicas diarias, y no es demasiado amplio como para que influya significativamente la variación estacional, ya que, como se ha visto, esta implica cambios importantes en los niveles de contaminación.

El inicio del periodo de Bloqueo 1 coincidió prácticamente con el inicio a la denominada Fiesta de la Primavera. Esta es la fiesta más importante para el pueblo chino y es similar a la Navidad en Occidente. Esta festividad dura siete días, comenzando en la víspera de Año Nuevo y la fecha concreta depende del calendario lunar. Durante las mismas, las industrias, el transporte, la construcción, los centros educativos y muchos comercios suelen disminuir considerablemente sus actividades, ya que la mayoría de los trabajadores migrantes regresan a sus lugares de origen para reunirse con sus familias. De hecho, según el Anuario Estadístico de Shanghái 2021 [12], en 2020 la población residente de Shanghái fue de 24,87 millones, de los cuales 10,47 millones eran trabajadores migrantes, lo que representa el 43% de la población residente en Shanghái. Esto significa que una parte importante de la población abandona Shanghái durante la Fiesta de la Primavera, con la consecuente disminución de

actividad ya señalada, lo que conlleva un descenso de las emisiones contaminantes y una mejora de la calidad del aire durante el Año Nuevo Chino en comparación con otras épocas del año. Esto se refleja en la Figura 32, que muestra el promedio de AQI para el periodo 2017-2021. Es lo que Chen y col. ^[28] denominan "Efecto del Año Nuevo Chino".

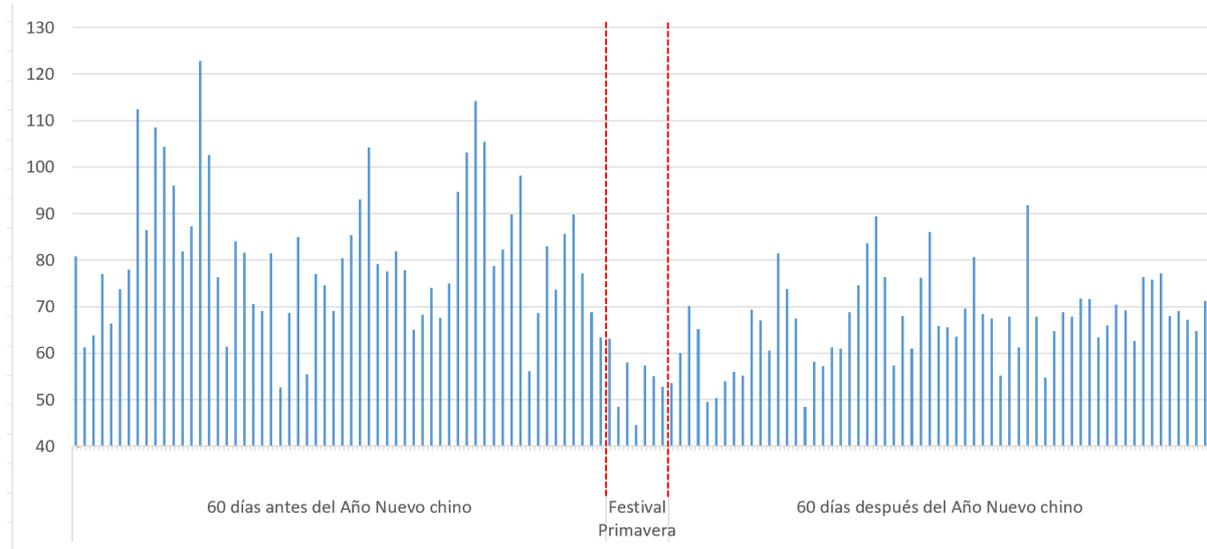


Figura 32. Promedio AQI Shanghái 2017-2021, 60 días antes y después de las fiestas del Año Nuevo Chino. Fuente: Plataforma de vigilancia y análisis en línea de la calidad del aire en China ^[17].

Dada la coincidencia del Año Nuevo Chino con el bloqueo debido al COVID-19 del 2020, para poder discriminar ambos efectos, se compararán los datos del año 2020 con los del 2019 y 2021. Como el Año Nuevo Chino se calcula según el calendario lunar, la fecha del mismo varía de un año a otro, pero cae siempre entre enero y febrero. Así, para poder realizar la comparación interanual, se ha hecho coincidir el periodo correspondiente al bloqueo 1 con el primer día del Año Nuevo Chino, y se han establecido los cuatro periodos de tiempo siguientes, equivalentes a los periodos indicados para el año 2020:

Pre-bloqueo: 20 días antes del inicio del Año Nuevo Chino.

Bloqueo 1: 18 días desde el inicio de la Fiesta de la Primavera (Año Nuevo Chino).

Bloqueo 2: 43 días siguientes al periodo equivalente al bloqueo 1

Post-bloqueo: 20 días tras el fin del periodo correspondiente al bloqueo 2.

Se trabaja por tanto con los datos diarios de 101 días, para cada uno de los años estudiados.

4.2.2. Análisis del impacto del COVID-19 en la calidad del aire

Usando los cuatro periodos definidos se han elaborado gráficas de cajas y bigotes para realizar el estudio del impacto de la pandemia en la calidad del aire. Estas permiten visualizar la dispersión y simetría de los valores de los distintos contaminantes estudiados, en los periodos establecidos en el año de la pandemia, el anterior y el posterior. En las Figuras 33 a 38 se muestran los resultados obtenidos para los diferentes contaminantes estudiados.

En las gráficas se observan ciertos patrones que pasamos a comentar. El caso del ozono se discutirá más adelante, ya que, al tratarse de un contaminante secundario su comportamiento difiere respecto a los restantes contaminantes, en los que sí se observan ciertas analogías.

Tanto para las partículas en suspensión (PM_{2.5} y PM₁₀) como para el CO y NO₂, se observa que las concentraciones del periodo pre-bloqueo son bastante elevadas, ya que, como se ha visto, en los meses de invierno es cuando se registran las mayores concentraciones y, además, tienden a presentar una gran dispersión, que refleja la variabilidad de los valores de inmisión registrados. Esto puede ser debido a la variabilidad de las condiciones meteorológicas tanto como a variaciones en las propias fuentes de emisión. Durante el periodo que hemos denominado Bloqueo 1, todos los años hay un descenso significativo de las concentraciones promedio de inmisión, dada la coincidencia con la Fiesta de la primavera [27]. Cabe señalar que, según el Ministerio de Transporte de la República Popular China, la carga total de tráfico durante la Fiesta de la Primavera de 2020 se redujo en aproximadamente un 50% en comparación con los años anteriores y posteriores [29]. A pesar de esto, no se observa una diferencia importante en los niveles de inmisión de estos contaminantes en el año 2020 respecto 2019 y 2021, ni siquiera en el caso del NO₂ que es el contaminante más fuertemente ligado al tráfico. Es cierto que, al ser el número de días en estudio reducido, las condiciones meteorológicas particulares de cada año pueden tener un efecto significativo sobre los niveles de inmisión registrados, ya que la dispersión o acumulación de contaminantes se ve muy influenciada por estas. No obstante, la tendencia observada año tras año entorno a esta festividad, demuestra el impacto de la actividad antropogénica sobre la calidad del aire, y cómo los niveles de estos contaminantes pueden disminuir significativamente cuando las actividades cesan.

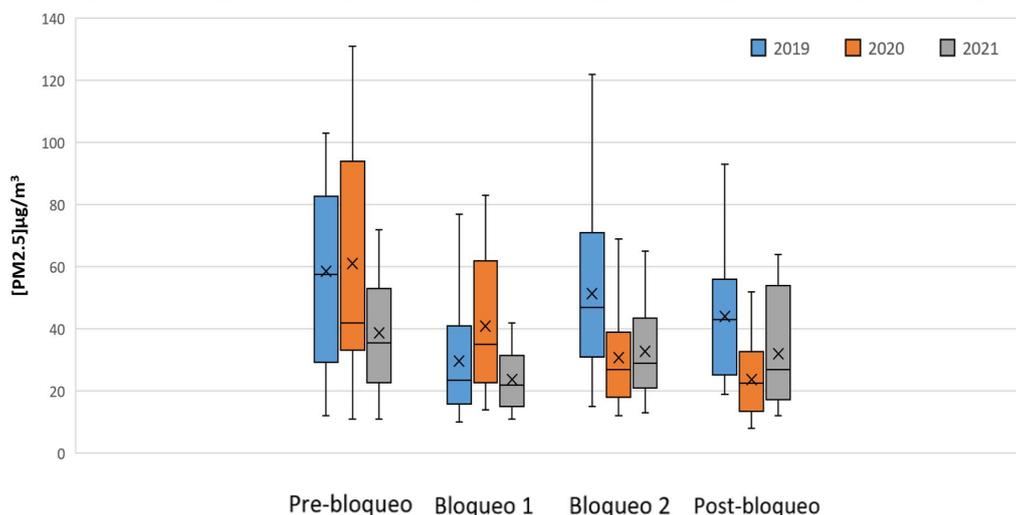


Figura 33. Diagrama de caja de concentraciones medias diarias de PM_{2.5} para los 4 periodos de estudio en 2019, 2020 y 2021. Valor medio (-), mediana de los resultados (x) y puntos anormales (*)

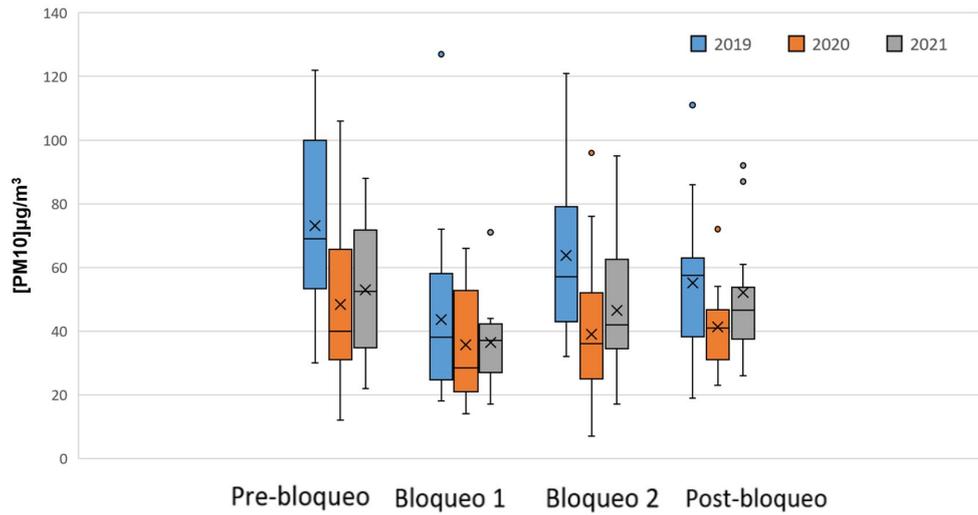


Figura 34. Diagrama de caja de las concentraciones medias diarias de PM10 para los 4 periodos de estudio en los años 2019, 2020 y 2021.

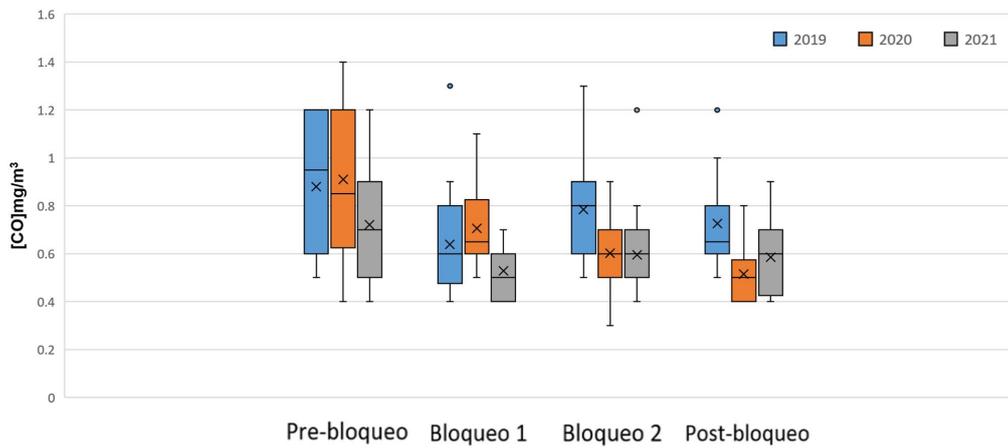


Figura 35. Diagrama de caja de las concentraciones medias diarias de CO para los 4 periodos de estudio en los años 2019, 2020 y 2021.

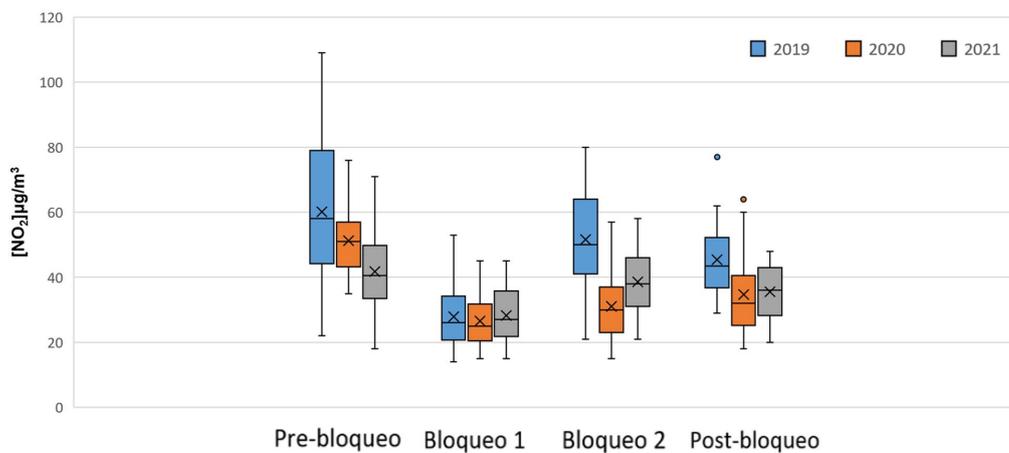


Figura 36. Diagrama de caja de las concentraciones medias diarias de NO₂ para los 4 periodos de estudio en los años 2019, 2020 y 2021.

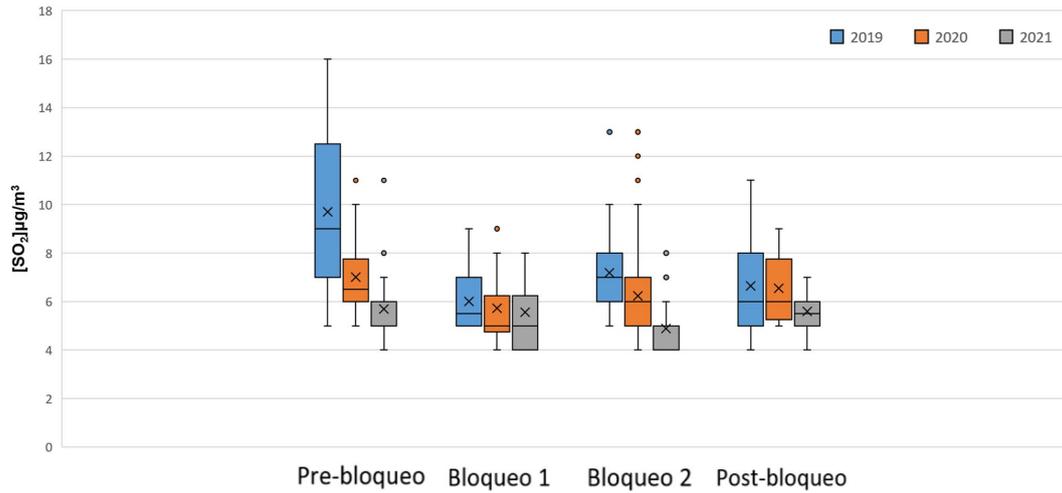


Figura 37. Diagrama de caja de las concentraciones medias diarias de SO₂ para los 4 periodos de estudio en los años 2019, 2020 y 2021.

A continuación, en el año 2019 y en menor medida en el 2021, se observa que, tras este periodo vacacional, los niveles de contaminación sufren un nuevo repunte al reiniciarse las actividades habituales de la ciudad. Sin embargo, en el año 2020, las concentraciones de PM_{2.5} y CO, en lugar de aumentar en los periodos de Bloqueo 2 y post-bloqueo, disminuyen, mientras que las PM₁₀ y NO₂, si bien aumentan, lo hacen levemente. Y esto ocurre a pesar de la reducción (bloqueo 2) y posterior eliminación (post-bloqueo) de la mayoría de las restricciones, lo que conlleva a un aumento progresivo del tráfico en la ciudad, de las diversas actividades industriales y del tráfico marítimo.

Esta extensión en el tiempo de la mejora en la calidad del aire en 2020 respecto a estos contaminantes, puede ser debida a diversos factores. Uno podría ser el miedo por parte de la población, que sigue limitando sus movimientos en la medida de lo posible a pesar de la desaparición de muchas restricciones. Además, aunque la actividad laboral se recuperó, el teletrabajo continuó en muchos sectores, con la consecuente reducción del tráfico. Por otra parte, el tránsito marítimo y aéreo tardó en recuperarse. Finalmente, los centros educativos permanecieron cerrados, y Shanghái siguió teniendo controles de entrada de personas durante las fases de Bloqueo 2 y Post-Bloqueo. Como informó China News ^[36], todas las personas que entraban en Shanghái debían someterse a un periodo de cuarentena de 14 días. Esto repercutió especialmente en los trabajadores inmigrantes (que constituyen una parte importante de la población de Shanghái) que regresaban a la ciudad después de haber permanecido en sus lugares de origen, a las que habían acudido para la Fiesta de la Primavera, y en las que quedaron atrapados con el cierre de las ciudades por el COVID-19. Todos estos factores determinaron que la normalidad tardase en reestablecerse.

Lo dicho se puede aplicar también al SO₂, si bien en este caso se podría hablar de una tendencia a la baja más allá del efecto del COVID-19. En efecto, el fuerte patrón descendente de los niveles de este contaminante en los últimos años, y que ya ha sido comentado en la sección anterior, se refleja de nuevo en los datos mostrados en la Figura 37.

A pesar de la mejora que el cese de la actividad antropogénica provocó en la calidad del aire asociada a estos contaminantes, cabe señalar que el número de días en que las partículas en suspensión y el NO₂ superaron los valores guía establecidos por la OMS para la protección de la salud, sigue siendo considerable durante el periodo de bloqueo por la pandemia, tal y como se refleja en la Tabla 8. En el caso del SO₂, no se superó ningún día el valor guía para ninguno de los periodos en estudio, mientras que el CO y O₃ no se han incluido ya que no existe valor guía diario.

Si bien el porcentaje de superaciones en los periodos de bloqueo frente al periodo pre-bloqueo fue menor, especialmente en el caso del NO₂ fuertemente relacionado con el tráfico, la situación sigue siendo alarmante, especialmente en el caso de las PM_{2.5}. En este caso, durante el bloqueo 1 se siguieron produciendo superaciones prácticamente todos los días. Si bien es cierto que estas partículas de tamaño tan pequeño pueden permanecer en suspensión en la atmósfera durante largos periodos de tiempo, lo que podría suponer un retraso en su eliminación, también hay que considerar las posibles fuentes naturales que pueden ser importantes en determinadas ocasiones. Finalmente, cabe señalar que las PM_{2.5} son en gran parte partículas de origen secundario, generadas en la atmósfera por reacción o transformación de sus precursores gaseosos, tales como SO₂ (que daría lugar a la formación de sulfatos) o NO₂ (generando nitratos). Por tanto, tras el cese de su emisión, podrían seguir formándose como consecuencia de este origen. Por otra parte, cabe destacar que el menor porcentaje de superaciones para este contaminante se produjo en el periodo post-bloqueo, lo que podría estar relacionado tanto por este mismo efecto (ya que los niveles de SO₂ y NO₂ habían disminuido) como con el avance de la estación o con las condiciones meteorológicas, si bien no se dispone de información meteorológica detallada para poder corroborarlo. Sin embargo, el diferente comportamiento de las PM₁₀, parece apuntar a que el primer factor puede ser determinante.

Por tanto, podemos afirmar que este cese de actividades no fue suficiente para alcanzar una calidad del aire saludable. Sería interesante disponer de información sobre las posibles intrusiones de origen natural de partículas en suspensión en la zona o de otros contaminantes, para poder discriminar hasta qué punto se debe a contribuciones naturales o antropogénicas generadas en la zona de estudio o fuera de ella.

Contaminante	Pre-bloqueo	Bloqueo 1	Bloqueo 2	Post-bloqueo
PM _{2.5}	95	94	86	70
PM ₁₀	40	28	30	30
NO ₂	100	44	65	75

Tabla 8. Porcentaje de días en que se supera el valor guía diario establecido por la OMS en los diferentes periodos establecidos en torno al bloqueo del año 2020 en Shanghai.

El comportamiento del ozono difiere respecto a lo comentado para los restantes contaminantes (ver Figura 38). Como se ha comentado, se trata de un contaminante secundario, que no es emitido directamente por la actividad antropogénica, sino que se forma posteriormente en la atmósfera a partir de la reacción de otros contaminantes en presencia de luz. Su diferente origen hace que su comportamiento suela ser inverso al de sus

contaminantes precursores. De hecho, se puede observar que durante el periodo del Bloqueo 1 se produjo un aumento de las concentraciones de inmisión de ozono en comparación con los días previos. El aumento es incluso mayor en el caso del 2020 en comparación con el mismo periodo durante los años anterior y posterior. Dado que el ozono es un oxidante fuerte, en presencia de elevados niveles de otros contaminantes se consume al reaccionar con los mismos, siendo esta una vía de eliminación. Un ejemplo se muestra en la ecuación 4. El NO es el compuesto de nitrógeno mayoritariamente emitido por los procesos de combustión, si bien una vez en la atmósfera tiende a oxidarse rápidamente para formar NO₂, que es el que presenta mayores concentraciones a nivel de inmisión y mayor toxicidad, motivos por los cuales, el NO₂ es el compuesto regulado en las normas de calidad del aire, y no el NO.



Así, la disminución de otros contaminantes, propicia un incremento de los niveles de ozono.

Por otra parte, al formarse el ozono a partir de la reacción entre NO₂ y COVs en presencia de luz, las concentraciones de O₃ aumentan conforme lo hacen las horas de luz. Este puede ser el factor principal determinante de la tendencia al alza de los niveles de ozono observada a lo largo de los cuatro periodos considerados, ya que las horas de luz se van incrementando a lo largo de los mismos, que abarcan 101 días.

Estos resultados, que muestran que todos los contaminantes, excepto el ozono, pueden disminuir con bastante rapidez cuando se restringen las actividades humanas, coinciden con lo observado por otros autores y en estudios realizados tanto en China como en Kazajistán [37].

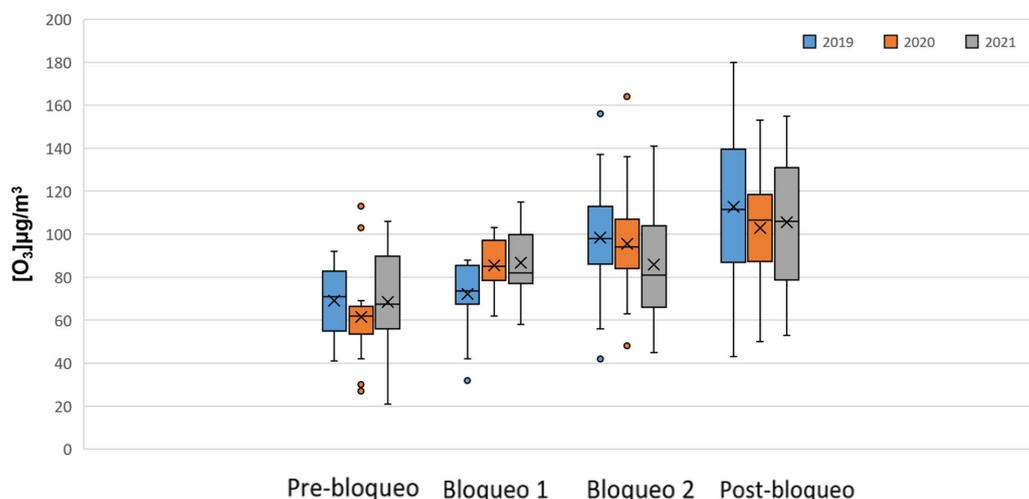


Figura 38. Diagrama de caja de las concentraciones medias diarias de O₃ para los 4 periodos de estudio en los años 2019, 2020 y 2021.

Finalmente, se incluye en la Figura 39 la variación del índice de calidad del aire (AQI) en el periodo considerado. Como se observa, el patrón es análogo al comentado para contaminantes como el CO o las PM_{2.5}. Es decir, bajada del AQI en el periodo de Bloqueo 1 (lo que indica una mejora en la calidad del aire) y repunte posterior, muy leve en el caso del año 2020. En este caso, paradójicamente, los valores de AQI para el año 2020 son peores que en los años anterior y posterior. Esto puede estar relacionado con el incremento de las

concentraciones de ozono que se han comentado y que condicionan el valor del AQI. Sí que se observa, no obstante, una mejora del AQI en los periodos de bloqueo 2 y post-bloqueo en el año 2020, respecto de 2019 y 2021.

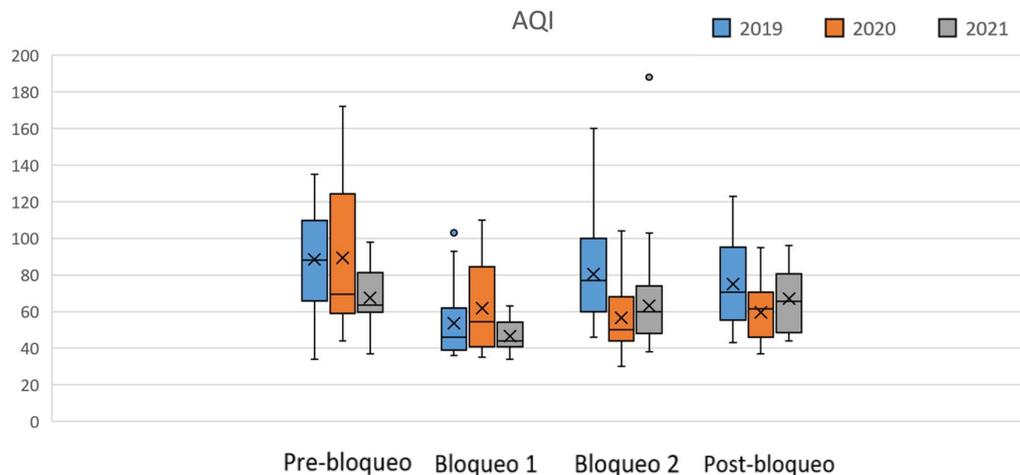


Figura 39. Diagrama de caja de AQI para los 4 periodos de estudio en los años 2019, 2020 y 2021.

5. Conclusiones

En este TFG se ha estudiado la evolución de la calidad del aire en el periodo 2017 – 2021, en relación a la implantación del “Plan de Aire Limpio de Shanghai (2018-2022)”. Los resultados del análisis de los datos de inmisión, registrados en las estaciones de vigilancia de la calidad del aire de Shanghai, muestra una tendencia descendente de la concentración de los principales contaminantes atmosféricos: PM2.5, PM10, CO, NO₂, SO₂ y O₃, en el citado periodo. Dado que las principales fuentes de emisión de estos contaminantes (con excepción del O₃) son el tráfico y las emisiones industriales, todo parece apuntar a que la mejora de la calidad del aire observada refleja el éxito de las medidas adoptadas en los últimos años y, en concreto, del citado plan, en el que se incluyen controles sobre la energía y el carbón, y medidas para acelerar la implantación de un sistema de transporte urbano ecológico y para la reducción de las emisiones contaminantes de fuentes móviles. Sin embargo, hay ciertos factores que no se han podido tener en cuenta en este estudio, al no poder acceder a todos los datos necesarios, tales como valores de emisión de las diferentes fuentes de contaminación o datos de intrusión de contaminantes procedentes de otras zonas, tanto naturales como antropogénicas; así como factores meteorológicos o el cambio climático que sólo han podido ser incluidos en nuestras consideraciones de forma cualitativa.

Por otra parte, se ha observado que los niveles de contaminantes del aire en Shanghai presentan una gran estacionalidad, con altas concentraciones en invierno y bajas en verano, exceptuando el ozono para el que la tendencia es inversa. Esto se debe tanto a que el pico de consumo de energía se produce en invierno, como a factores meteorológicos.

No obstante, y a pesar de la mejora observada en la calidad del aire en Shanghai, cabe señalar que los niveles de partículas en suspensión y NO₂ en invierno, y de O₃ en verano, siguen superando con mucho los valores guía recomendados por la OMS para asegurar la

salud de los ciudadanos, lo que indica que queda mucho trabajo por hacer para llegar a tener una calidad del aire óptima. Esto sería también extensible a la mayoría de las grandes ciudades, ya que estos tres contaminantes son los más preocupantes y los que superan con frecuencia los niveles recomendados en la mayor parte del planeta.

Por otra parte, se ha analizado la calidad del aire entorno al cierre de Shanghái en 2020 durante la pandemia. Los resultados han mostrado que todos los contaminantes, excepto el ozono, pueden disminuir con bastante rapidez cuando se restringen las actividades humanas. Tanto PM_{2,5}, PM₁₀, CO, NO₂ como SO₂ disminuyeron durante la fase de cierre de la ciudad, en la que se restringieron la mayoría de las actividades. Este descenso, en las fechas correspondientes al bloqueo 1, fue mayor en 2020 que el observado otros años debido al denominado "efecto del Año Nuevo Chino". El cierre de la ciudad tuvo un impacto significativo en las emisiones de estos contaminantes generados principalmente por la actividad industrial y el tráfico, incluyendo la actividad portuaria. Por otra parte, tras la reactivación de las actividades antropogénicas tras el periodo vacacional, habitualmente se produce un repunte de las concentraciones de contaminantes, como se observó en los datos correspondientes a los años 2019 y 2021. Sin embargo, en 2020, este repunte fue mucho más leve o incluso no se produjo en el periodo considerado, ya que la vuelta a la normalidad tardó en producirse. Cabe destacar que, a pesar de la mejora, el número de días en que se superó el valor guía diario establecido por la OMS para la protección de la salud, fue aún elevado, tanto para las partículas en suspensión como para el NO₂. El caso del ozono es particular, ya que sus niveles crecieron con el cese de actividad, probablemente por el efecto combinado de la disminución de otros contaminantes (que pueden actuar como vías de eliminación del ozono dado su carácter oxidante) y del incremento de las horas de luz. Esto muestra la dificultad de controlar la contaminación por ozono en una gran ciudad como Shanghái.

En cuanto a las consideraciones futuras, Shanghái necesita seguir reduciendo las emisiones de PM_{2.5}, PM₁₀, y NO₂ actuando sobre las fuentes de contaminación, como el tráfico y las emisiones industriales. Sin embargo, será necesario desarrollar adicionalmente un programa específico de remediación de la contaminación por O₃. Para lograr entornos urbanos sostenibles y limpios, es importante el continuo fortalecimiento de las políticas de mejora de la calidad del aire y la implementación de un estilo de vida basado en energías renovables y no en la combustión de derivados del carbono. Sin duda, la mejora de la calidad del aire debe considerarse una prioridad en la futura gestión urbana.

Para terminar, quisiera destacar la estrecha relación existente entre la lucha contra la contaminación del aire y 4 de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS)^[39]. En concreto con:

- Objetivo 3: Salud y bienestar. La relación entre la salud y la calidad del aire que respiramos es indiscutible, como se ha visto a lo largo del trabajo. Una de las metas de este objetivo es "Para 2030, reducir sustancialmente el número de muertes y enfermedades producidas por productos químicos peligrosos y la contaminación del aire, el agua y el suelo".
- Objetivo 7: Energía asequible y no contaminante. En los entornos rurales de China siguen empleándose combustibles sucios, como el carbón, para cocinar y para la calefacción,

además de en diversas actividades industriales. La energía limpia y renovable puede salvar vidas e impulsar el desarrollo económico.

- Objetivo 11: Ciudades y comunidades sostenibles. Entre sus metas se encuentra “reducir el impacto ambiental negativo per capita de las ciudades, incluso prestando especial atención a la calidad del aire y la gestión de los desechos municipales y de otro tipo”.

- Objetivo 13: Acción por el clima. Los gases de efecto invernadero calientan la atmósfera con consecuencias catastróficas. Las acciones para mejorar la calidad del aire, como la transición hacia formas de energía más limpias, además de ayudarnos a tener un entorno más saludable, nos ayuda a enfrentar la emergencia climática.

6. Bibliografía

[1] WIKIPEDIA, THE FREE ENCYCLOPEDIA (2001). *Shanghai*.

<<https://en.wikipedia.org/wiki/Shanghai>> [Consulta: 8 de mayo de 2022]

[2] ORGANIZACIÓN MUNDIAL DE LA SALUD. *Contaminación del aire ambiente (exterior)*.

<[https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/ambient-\(outdoor\)-air-quality-and-health](https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/ambient-(outdoor)-air-quality-and-health)> [Consulta: 7 de marzo de 2022]

[3] Kahn M.E.; Sun W.; Zheng S. “Clean air as an experience good in urban China”. *Ecological Economics* 192 (2022) 107254.

[4] Web de Ciudades de China. *上海雾霾“源解析”: 外来污染仅两成*.

<<http://ccud.hanxin.site/phone/article/10217.html>> [Consulta: 8 de mayo de 2022]

[5] WIKIPEDIA, THE FREE ENCYCLOPEDIA (2001). *中华人民共和国能源结构*.

<<https://zh.wikipedia.org/wiki/中华人民共和国能源结构>> [Consulta: 7 de marzo de 2022]

[6] Yan, Y.; Li, Y.; Sun, M.; Wu, Z. “Primary Pollutants and Air Quality Analysis for Urban Air in China: Evidence from Shanghai”. *Sustainability* 11 (2019) 2319.

[7] Ministerio de Ecología y Medio Ambiente de la República Popular China. *Normas de calidad del aire ambiente (2016)*.

<https://www.mee.gov.cn/ywgz/fgbz/bz/bzwb/dqhjbh/dqhjzlbz/201203/t20120302_224165.shtml> [Consulta: 8 de mayo de 2022]

[8] AIRNOW.GOV - HOME OF THE U.S. AIR QUALITY INDEX. *Fundamentos de AQI*.

<<https://www.airnow.gov/aqi/aqi-basics-in-spanish/>> [Consulta: 8 de mayo de 2022]

[9] Li, C.; Hammer, M. S.; Zheng, B.; Cohen, R.C. “Accelerated reduction of air pollutants in China, 2017-2020”, *Science of the Total Environment* 803 (2022) 150011.

[10] Estación General de Pruebas Ambientales de China.

<<http://www.cnemc.cn/>> [Consulta: 8 de mayo de 2022]

[11] Gobierno Popular Municipal de Shanghái. *“Plan de Acción para el Aire Limpio de Shanghái (2018-2022)”*.

<https://www.shanghai.gov.cn/nw42839/20200823/0001-42839_56434.html> [Consulta: 8 de mayo de 2022]

[12] Oficina de Estadística de Shanghái. *Anuario Estadístico de Shanghái 2021*.

<<http://tjj.sh.gov.cn/tjnj/20220309/0e01088a76754b448de6d608c42dad0f.html>> [Consulta: 8 de mayo de 2022]

[13] Zheng, S.; Liu, J.; Chen, Y. “最严标准强势来袭,汽车企业面临生存考验——国六排放标准分项解读.” *西南汽车信息*, vol.11, No.392, 2018, p.2-6.

[14] Oficina de Medio Ambiente Ecológico de Shanghái. *Plan de trabajo para el control de la contaminación atmosférica en Shanghái en 2020*.

<<https://sthj.sh.gov.cn/hbzhywpt1098/hbzhywpt1100/20200331/312d81f6b8034d2aa8565fb077ef1c43.html>> [Consulta: 8 de mayo de 2022]

[15] Oficina de Medio Ambiente Ecológico de Shanghái. *Publicación de la calidad del aire en tiempo real*.

<<https://sthj.sh.gov.cn/kqzllsfb/index.html>> [Consulta: 8 de mayo de 2022]

[16] Oficina de Medio Ambiente Ecológico de Shanghái. *Boletín Nacional de Medio Ambiente de Shanghái*.

<<https://sthj.sh.gov.cn/hbzhywpt1143/hbzhywpt1144/index.html>> [Consulta: 8 de mayo de 2022]

[17] Zhenqi. Plataforma de vigilancia y análisis en línea de la calidad del aire en China. *上海空气质量指数月统计历史数据*.

<<https://www.aqistudy.cn/historydata/>> [Consulta: 8 de mayo de 2022]

[18] Pronóstico del tiempo 2345 tianqi wang 天气王. *上海市历史天气*.

<https://tianqi.2345.com/wea_history/58362.htm> [Consulta: 8 de mayo de 2022]

[19] Yu, H.; Guan, Q.; Tai, J. “Variation Trend and Causes of Air Quality of Shanghai in Recent 16 Years”. *Environmental Science and Technology*, vol.30, No.6, Dec.2017, p.55-60.

[20] Wang, Q.; Wu, X.; Zhao, B.; Qin, J.; Peng, T. “Combined Multivariate Statistical Techniques, Water Pollution Index (WPI) and Daniel Trend Test Methods to Evaluate Temporal and Spatial Variations and Trends of Water Quality at Shanchong River in the Northwest Basin of Lake Fuxian, China”, *PLOS ONE*, 10(4): e0118590, 2015.

[21] Long, S.; Zeng, J.; Liu, K.; Cao, L.; Wang, G.; Liu, W.; Li, Y. “Impact of Temperature Inversion Layer on Accumulation Process of Particulate Matters in Shanghai”. *Environmental Science and Technology*, vol.36, No.6L, June 2013, p.104-109.

[22] Cao, L.; Liu, D.; Lu, W.; Yan, W.; Chen, H. “The Influence of Southward Cold Anticyclone on the Process of Heavy Air Pollution in Jiangsu Province”. *Environmental Monitoring and Forewarning*, vol.13, No.2, March 2021, p.19-23.

[23] Pan, X.; Liu, L.; Zhang, S. (2016). *Dangerous Breath 2: A Study of the Public Health Effects of Atmospheric PM2.5 on Chinese Cities*. Beijing: School of Public Health, Peking University

[24] Yang, F.; Xu, J.; Weng, Z.; Ma, J.; Li, M. “Annual Variation Trend of Chemical Components and Sources of Fine Particulate Matter in Regional Atmosphere”. *Environmental Monitoring and Forewarning*, vol.12, No.6, Novembre 2020, p.7-11.

[25] Gobierno Popular de la Nueva Área de Shanghai Pudong. *Notificación de la paja de la cosecha de 2019 y otros trabajos de prohibición y utilización integral*.

<<https://phone.pudong.gov.cn/shpd/infoopen/Detail.aspx?Infold=704dd38f-7b46-4c70-9e77-238e53eb7602>> [Consulta: 8 de mayo de 2022]

[26] WIKIPEDIA, THE FREE ENCYCLOPEDIA (2001). *Sulfur dioxide*.

<https://en.wikipedia.org/wiki/Sulfur_dioxide> [Consulta: 18 de septiembre de 2022]

[27] Wu, C.; Wang, H.; Cai, W.; He, H.; Peng, Z. "Impact of the COVID-19 lockdown on roadside traffic-related air pollution in Shanghai, China". *Building and Environment* 194(2021) 107718.

[28] Chen, X.; LIU, Z.; WU, P. "中国城市空气质量的“春节效应”分析". *Statistics & Information Forum*, vol.29, No.12, Dec. 2014, p.57-62.

[29] Ministerio de Transportes de la República Popular China. *Estadísticas*.

< <https://www.mot.gov.cn/tongjishuju/> > [Consulta: 25 de abril de 2022]

[30] WIKIPEDIA, THE FREE ENCYCLOPEDIA (2001). *Air quality index*.

<https://en.wikipedia.org/wiki/Air_quality_index> [Consulta: 2 de octubre de 2022]

[31] 14º Plan quinquenal de la República Popular China. Oficina Económica y Comercial de la Embajada de España en Pekín. Ed. ICEX, Pekín 2021.

[32] Ministerio de Ecología y Medio Ambiente de la República Popular China. *Limits and measurement methods for emissions from light-duty vehicles (CHINA 6)*.

<https://www.mee.gov.cn/ywgz/fgbz/bz/bzwb/dqjhj/dqdywrrwrfbz/201612/t20161223_369476.shtml> [Consulta: 3 de octubre de 2022]

[33] European Environment Agency. *Regulation (EC) No 715/2007 on type approval of motor vehicles*.

<<https://www.eea.europa.eu/policy-documents/regulation-ec-no-715-2007>> [Consulta: 3 de octubre de 2022]

[34] WIKIPEDIA, THE FREE ENCYCLOPEDIA (2001). *Qinling–Huaihe Line*.

<https://en.wikipedia.org/wiki/Qinling–Huaihe_Line> [Consulta: 3 de Octubre de 2022]

[35] WIKIPEDIA, THE FREE ENCYCLOPEDIA (2001). *Ozono*.

<<https://es.wikipedia.org/wiki/Ozono>> [Consulta: 3 de Octubre de 2022]

[36] CHINA NEWS. "全部从上海入境人员一律隔离14天".

<<https://www.chinanews.com.cn/cj/2020/03-26/9138557.shtml>> [Consulta: 3 Octubre de 2022]

[37] Y, Bai; Y, Zhou; J.M, Alatalo; A.C, Hughes. "Changes in Air Quality during the First-Level Response to the Covid-19 Pandemic in Shanghai Municipality, China." *Sustainability*, 2020, 12(21), 8887.

[38] WIKIPEDIA, THE FREE ENCYCLOPEDIA (2001). *2019冠狀病毒病上海市疫情*

<<https://zh.m.wikipedia.org/zh-hans/2019冠狀病毒病上海市疫情>> [Consulta: 5 de Noviembre de 2022]

[39] Naciones Unidas. Objetivos de desarrollo sostenible.

<https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/objetivos-de-desarrollo-sostenible/> [Consulta: 14/11/2022]