

Configuración urbana favorable a la contaminación a nivel de suelo. Análisis del probable caso de los nuevos edificios en altura de la comuna de Estación Central, Chile

Rodrigo Vidal Rojas

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3037-7883>

Universidad de Santiago de Chile, Chile.

Correo electrónico: rodrigo.vidal@usach.cl

Resumen

Entre 2013 y 2018, se concedió permiso de edificación a 80 torres de más de 20 pisos en la comuna de Estación Central, en Santiago de Chile. Este conjunto ocupa 23,6 hectáreas y provoca, al sur de ellas, un cono de sombra permanente de 8.615.195,70 m³ en el mediodía solar del 22 de junio de 2019. Como la concentración de gases contaminantes aumenta con el frío, la humedad y la poca circulación de aire, el objetivo de este trabajo fue conocer si en ese cono de sombra se reúnen las condiciones urbanas para provocar un incremento de dicha concentración a nivel de suelo. Para ello, se estudió detalladamente el cono de sombra de los edificios, sus relaciones de continuidad y distanciamiento, las condiciones de ventilación, la presencia de vegetación y el parque automotriz. Se aplicó un método cuantitativo que combinó observación y verificación en terreno; análisis gráfico y estadístico de documentos existentes y la elaboración de un modelo tridimensional del fragmento en estudio. La investigación demostró un fuerte aumento de la sombra, la disminución de la vegetación arbórea y el incremento del parque automotriz en la comuna. Además, se verificó la existencia de las condiciones que podrían estar provocando una disminución de la circulación de aire en el cono de sombra y una desfavorable orientación de los vientos dominantes.

Palabras clave

Cañón urbano, cono de sombra, contaminantes urbanos, edificación en altura, fragmento urbano, inversión térmica, parque automotriz, vegetación

Urban Configuration for Pollution at Ground Level. Analysis of the Probable Case of the New High-Rise Buildings in the district of Estación Central, Chile

Agradecimientos: La elaboración de este artículo contó con el valioso apoyo y contribución del arquitecto Javier Estay Farfán.

Abstract

Between 2013 and 2018, building permits were granted to 80 towers of more than 20 floors in the district of Estación Central, in Santiago de Chile. This complex occupies 23.6 hectares and causes, to the south of them, a permanent shadow cone of 8,615,195.70 m³ at solar noon on June 22. As the concentration of polluting gases increases with cold, humidity and poor air circulation, the objective of this work was to know if urban conditions meet in this shadow cone to cause an increase in said concentration at ground level. For this, the shadow cone of the buildings, their continuity and distance relationships, the ventilation conditions, the presence of vegetation and the automotive fleet were studied in detail. A quantitative method was applied that combined observation and verification in the field; graphic and statistical analysis of existing documents and the elaboration of a three-dimensional model of the fragment under study. The research demonstrated the strong increase in shade, the decrease in tree vegetation and the increase in the automobile fleet in the commune. In addition, the existence of conditions that could be causing a decrease in air circulation in the shadow cone and an unfavorable orientation of the prevailing winds was verified.

Keywords

Car park, shadow cone, tall building, thermal inversion, urban canyon, urban fragment, urban pollutants, vegetation

HISTORIAL DEL ARTÍCULO

Recibido:

18 de marzo de 2021.

Aceptado:

8 de octubre de 2021.

CÓMO CITAR ESTE ARTÍCULO:

Vidal Rojas, R. (2021). Configuración urbana favorable a la contaminación a nivel de suelo. Análisis del probable caso de los nuevos edificios en altura de la comuna de Estación Central, Chile. *Revista de Urbanismo*, (45), 25-45. <https://doi.org/10.5354/0717-5051.2021.61324>.

Introducción

Existe una relación entre la temperatura, la ventilación y las características de algunos agentes contaminantes en el aire, donde a mayor temperatura y ventilación se registra una menor concentración de dichos agentes, mientras que, a menor temperatura y ventilación, aumenta la concentración de esos agentes contaminantes (Aw, & Kleeman, 2003; Haghighat, & Mirzaei, 2011). De ello podemos inferir que a mayor cantidad de sombra y, por lo tanto, a menor temperatura y mayor humedad, debería existir una mayor concentración de agentes contaminantes a nivel de suelo, aún más en presencia de muy bajas precipitaciones. El espacio en el que se dispersan y los mecanismos de eliminación de la cantidad de contaminantes en el aire son factores determinantes en el grado de contaminación (Sharan et al., 1996). En consecuencia, dicha concentración depende fundamentalmente de las condiciones de dispersión de la atmósfera. El transporte aéreo de los contaminantes depende, a su vez, del estado de la atmósfera y de las condiciones meteorológicas: turbulencias, velocidad y dirección del viento, radiaciones solares, entre otros aspectos. Por el contrario, la estabilidad atmosférica obstaculiza la dispersión de los contaminantes y contribuye a su acumulación cerca de las fuentes emisoras. Además, la dispersión de los contaminantes se incrementa con la velocidad y la turbulencia del viento.

En la comuna de Estación Central, en Santiago de Chile, entre el 9 de enero de 2013 y el 26 de julio de 2018, se concedió permiso de edificación a 80 edificios cuya altura edificada va de 20 pisos (60 metros aprox.) a 41 pisos (123 metros aprox.) (30 tienen más de 30 pisos o 90 metros) (Tabla 1). Hasta 2019, ya se habían construido 60 de esos edificios (en adelante, “torres”)¹. Este conjunto de 80 torres se emplaza en una superficie de 236.340 m² (23,6 hectáreas), es decir, 3,4 torres por hectárea (Figura 1) en promedio.

El 22 de junio al mediodía solar, las 60 nuevas torres de Estación Central provocan un cono de sombra total

de 8.615.195,70 m³, inexistentes hasta antes de 2013, cono de sombra que, ciertamente, tiene una mayor longitud durante la mañana y la tarde. Debido a que la concentración de gases contaminantes aumenta con el frío, la humedad y la poca circulación de aire y, dependiendo del régimen de vientos, de la distancia entre los edificios, de su emplazamiento y cantidad, y de la mayor o menor presencia de vegetación, el cono de sombra que se produce al sur de los edificios de Estación Central, particularmente sobre las vías vehiculares, puede provocar un aumento en la concentración de gases contaminantes urbanos a nivel de suelo. En consecuencia, el objetivo de este trabajo es conocer si en ese cono de sombra se reúnen las condiciones urbanas y arquitectónicas para provocar un incremento de la contaminación ambiental a nivel de suelo, en especial, entre mayo y agosto, donde se observan sucesivos eventos de inversión térmica. Por ello se ha estudiado detalladamente el cono de sombra de los edificios, las relaciones de continuidad y distanciamiento entre ellos, la dirección de los vientos predominantes, la disminución de la vegetación y el aumento del parque automotriz.

Demostrar que existe una configuración arquitectónica y urbana capaz de aumentar la contaminación atmosférica a nivel de suelo en Estación Central, justifica la necesidad de medir concretamente el nivel de contaminación en los conos de sombra, en los meses de inversión térmica. La medición del eventual aumento de la contaminación del aire a nivel de suelo, provocado por esta configuración es la tarea que hemos comenzado en mayo de 2021. Además, esta demostración nos puede llevar a estudiar las formas propicias de configuración arquitectónica que no provoquen dicho aumento en la concentración de gases en nuevos desarrollos inmobiliarios, además de entregar lineamientos generales que permitan prever los modos factibles de mitigación de la concentración de gases contaminantes a nivel de suelo en el espacio urbano actual de Estación Central.

¹ Loreto Rojas propone que, hasta 2016, las torres se edificaron en dos oleadas sucesivas, la primera entre 2008 y 2012 y la segunda entre 2013 y 2016 (Rojas, 2017).

Tabla 1
Edificios de más de 20 pisos con permiso de construcción obtenido entre 2011 y 2018

Dirección: calle	Número	Pisos N°	Departamentos N°	Estacionamientos N°	Total construido m²	Permiso de edificación Fecha
Coronel Souper	4.418	22	296	73	15.013,85	26-07-2018
5 de abril	3.485	22	299	92	16.727,85	16-05-2018
Los Gladiolos	4.795	24	432	311	22.674,25	13-03-2018
Constantino	105	26	430	146	23.219,75	05-12-2017
General Amengual	102-110-124-130	20	271	55	13.683,06	29-08-2017
Constantino	54	20	209	96	12.002,59	29-05-2017
Ecuador	4.678-4.680	28	295	70	18.762,77	26-05-2017
Ecuador	4.791	28	257	66	13.795,97	11-05-2017
Ecuador	4.741	26	231	64	12.847,76	11-05-2017
Federico Scotto	0112-0130	27	299	54	15.591,25	11-04-2017
Conde del Maule	4.304	23	298	99	15.921,35	06-04-2017
Con Con	64-78-142	23	298	133	19.097,87	13-03-2017
Ecuador	5.079-5.089	27	299	56	18.152,55	28-02-2017
Alameda	4320	30	277	92	17.631,93	30-01-2017
Placilla	65-71-77	25	347	129	20.599,49	30-12-2016
Apóstol Santiago	18	25	408	220	25.676,61	30-12-2016
Titán	4.876	24	312	212	23.889,25	30-12-2016
Titán	4.880	20	180	148	11.245,63	15-12-2016
San Gurmencindo	50	35	1160	241	56750,35	13-12-2016
Porto Seguro	4.210	29	367	126	20.033,91	22-11-2016
Alameda	4.871-4.877	22	441	43	14.332,95	09-11-2016
Conde del Maule	4.627-4.631-4.635	29	299	52	22.246,17	08-11-2016
Ecuador	4.566-4.570	22	298	73	18.975,83	07-11-2016
Conde del Maule	4.571-4.575-4.577	22	299	92	19.478,11	07-11-2016
Gral. Amengual	480	35	471	133	28.873	14-10-2016
Recreo	321	35	406	79	23.467,93	13-10-2016
Santa Petronila	32	30	616	132	25.278,96	13-09-2016
Conde del Maule	4.671-4.675	35	544	146	27.982,05	31-08-2016

Dirección: calle	Número	Pisos N°	Departamentos N°	Estacionamientos N°	Total construido m²	Permiso de edificación Fecha
Conde del Maule	4.425-4.427-4.453	26	431	131	22.642,25	30-06-2016
Alameda	4.719	25	376	162	24.086,85	14-06-2016
Gral. Amengual	055-085	25	406	141	21.516,4	01-06-2016
Padre A. Hurtado	59	30	462	155	28.726,58	31-05-2016
Conde del Maule	4.614	24	295	107	16.576,32	19-05-2016
Coronel Godoy	143-149-155-275	28	434	200	25.533,1	11-05-2016
Emb. Quintana	4.396	20	288	87	16.741,38	02-05-2016
Conde del Maule	4.359	35	810	128	40.879,83	20-04-2016
Con Con	0165	36	467	110	25.201,62	08-04-2016
Placilla	0122-0136	35	510	76	25.070,22	30-03-2016
María Rozas Velásquez	41-45	35	1.501	592	87.852,52	22-02-2016
Conde del Maule	4.430-4.470	22	406	156	21.422,25	24-12-2015
Toro Mazotte	207	24	295	110	15.525,1	16-12-2015
Ecuador	4.626-4.628-4.630	36	707	134	30.863,64	14-12-2015
Conde del Maule	4.156-4.160-4.170	37	840	158	36.661,56	30-11-2015
Placilla	0116-0124	28	286	45	13.992,9	19-10-2015
Conde del Maule	4.325	22	299	151	22.601,68	19-10-2015
Coronel Souper	4.192-4.200-4.202-4.222	30	639	235	34.913,26	13-10-2015
Alameda	3.837	41	732	109	34.287,43	17-08-2015
Ecuador	4.698	23	230	88	14.472,93	13-08-2015
Ecuador	3.866	30	409	223	24.713,77	05-08-2015
Blanco Garcés	146	38	1.006	172	45.082,89	29-07-2015
Buzo Sobenes	4.650	38	540	76	23.406,42	27-07-2015
Conde del Maule	4.106-4.136	30	369	365	46.224,79	10-07-2015
Conde del Maule	4.106-4.136	30	744	365	46.224,79	10-07-2015
Carlos Pezoa Veliz	0143	32	463	104	22.032,64	06-07-2015
Toro Mazotte	115	38	1.078	201	50.049,09	01-06-2015
Francisco Zelada	031	29	618	296	27.225,72	05-05-2015
Nicasio Retamales	40	28	623	231	33.253,95	01-04-2015

Dirección: calle	Número	Pisos N°	Departamentos N°	Estacionamientos N°	Total construido m²	Permiso de edificación Fecha
Ecuador	4.578	20	298	109	17.123,36	28-01-2015
Conde del Maule	4.642-4.658-4.664	33	680	100	24.440,04	29-12-2014
Francisco Zelada	058	20	245	81	13.810,84	06-11-2014
María Rozas Velásquez	51	28	438	150	27.205,68	26-09-2014
Santa Petronila	28	28	438	232	27.205,58	26-09-2014
María Rozas Velásquez	61	30	616	106	25.278,96	22-09-2014
Santa Petronila	38	30	616	132	25.278,96	22-09-2014
María Rozas Velásquez	55	30	616	151	25.330,22	22-08-2014
Toro Mazotte	110	31	725	187	32.684,2	07-08-2014
Conde del Maule	4.123-4.175	24	298	131		24-06-2014
Santa Petronila	22	22	338	114	18.743,16	04-06-2014
Radal	0102	29	338	166	20.379,56	05-05-2014
Coronel Souper	4.060	30	1.050	164	42.269,80	28-04-2014
Coronel Souper	4.058-4.060	30	1.053	222	44.601,26	28-04-2014
Nicasio Retamales	115	25	634	249	34.969,9	05-02-2014
María Rozas Velásquez	65	23	1.017	237	40.568,5	23-01-2014
Conde del Maule	4.364	30	667	76	25.306,56	25-08-2013
Conde del Maule	4.630	20	264	110	16.679,82	01-08-2013
Coronel Godoy	0128	24	385	88	17.438,80	17-07-2013
Toro Mazotte	64	29	364	91	19.442,24	13-06-2013
Toro Mazotte	76	29	481	124	25.987,38	13-06-2013
Conde del Maule	4.175	25	298	131	18.864,89	07-03-2013
Alameda	4.677	21	246	68	14.308,02	09-01-2013
			N° Deptos.	Estacionamientos	M² constr.	
TOTALES			38.708	11.560	339.559,89	

Nota: Tabla elaborada a partir de Municipalidad de Estación Central, 2019.

Figura 1

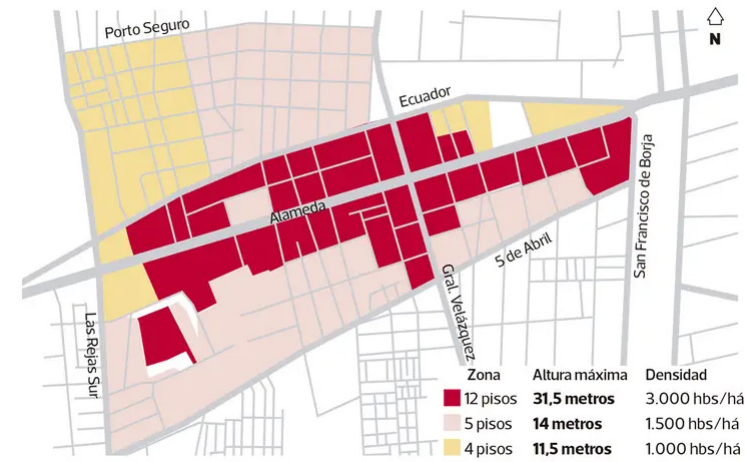
Fragmento principal de las torres de Estación Central, vista del oeste hacia el este



Nota: Imagen tomada con un dron en 2019. Fotografía de José Tarrío.

Figura 2

Alturas máximas permitidas desde abril de 2018 en el fragmento de estudio, donde se concentran los nuevos edificios en altura, en Estación Central



Nota: Mapa realizado por Ariel Fernández, *La Tercera*, sobre la base de información de la Municipalidad de Estación Central, 2018.

Marco conceptual

El *fragmento urbano* es una porción de territorio delimitada a partir de un polo o centro, de distancias desde ese polo, de una esfera de irradiación del polo determinada por dichas distancias y de un perímetro difuso. La polaridad es aquello que otorga identidad al fragmento. La distancia determina su magnitud. La esfera de irradiación son los componentes urbanos asociados a esa polaridad. Y el perímetro es la frontera de separación o de superposición con otros fragmentos. Estos elementos están determinados por una dimensión preponderante que puede ser morfológica, tipológica, funcional, ecológica u otra, que le otorga identidad y unicidad al fragmento (Vidal Rojas, 2002).

El polígono que se investiga constituye un fragmento urbano cuya dimensión preponderante original era funcional, donde predominaba el uso mixto residencial-comercial-equipamiento. Hoy la dimensión preponderante es morfológica y ha cambiado y se ha precisado su perímetro. De hecho, el 25 de abril de 2018 la municipalidad aprobó un instrumento regulador que limita, por zonas diferenciadas, la altura máxima que se podrá edificar dentro de ese fragmento, siendo la mayor en torno al eje Alameda, con hasta 31,5 metros de altura (comparar Figuras 2 y 5). Dicho instrumento termina por consolidar la configuración del fragmento morfológico, ya que permite *añadir* más edificaciones de hasta 31,5 metros en un barrio ya altamente densificado con 60 edificios de entre 60 y 123 metros de altura.

El surgimiento de fragmentos caracterizados por una *edificación en altura* es una solución urbana recurrente al problema del crecimiento demográfico en diversas ciudades del mundo (Giyasov, & Giyasova, 2018). Ella permite disminuir la extrema ocupación de suelo agrícola provocada por una expansión territorial extensiva de baja altura. El problema es que el emplazamiento de estas torres en un entorno de construcción precaria, en presencia de variados instrumentos vigentes de planificación urbana, y en un tiempo de construcción mínimo (siete años), como también su localización, emplazamiento, orientación, agrupamiento, distanciamiento entre ellas, vegetación y forma arquitectónica, no surgieron de un diseño urbano intencionado en relación con variables como la calidad ambiental del espacio.

Adecuadamente diseñados en su magnitud y forma, los grandes espacios entre estas torres pueden promover la circulación del aire y, por lo tanto, la dispersión de contaminantes. Al contrario, en invierno, los episodios de *inversión térmica* son los que agravan la situación, debido a que limitan la mezcla vertical del aire y atrapan los contaminantes debajo de la capa de inversión. En las noches despejadas, el suelo se enfría rápidamente por radiación, lo que produce que el aire en contacto se vuelva, a su vez, más frío y denso que el que está en la capa inmediatamente superior. Al disminuir la convección térmica disminuye, en consecuencia, la subsidencia (descenso de grandes masas de aire normalmente frío, provocado por los sistemas de altas presiones) del aire frío ubicado en una capa superior de la tropósfera. En el caso de los días soleados de invierno, las áreas sombreadas de estos edificios se mantienen frías y húmedas días enteros, agravando la situación (Inzulza Contardo et al., 2017). La velocidad y turbulencia del viento dispersa los contaminantes, mientras que la estabilidad atmosférica obstaculiza la dispersión.

Durante los días de anticiclón potente en las zonas más altas de las montañas, las temperaturas son más altas que en zonas bajas, donde el peso de las capas de aire afecta porque el aire frío es más pesado que el cálido. Además, al no soplar el viento ni entrar masas nubosas y, mucho menos, llover, el aire frío queda encajonado en las zonas más bajas hasta que la atmósfera provoque la entrada de

un frente o la llegada de una lluvia (Gramsch et al., 2014). Lo anterior produce la formación de una capa o “techo” de aire, “estancando la dispersión de los contaminantes e inhibiendo los movimientos verticales del aire” (Michelot y Carrega, 2014, p. 5). En verano, este techo se ubica a mil metros de altura respecto del suelo, pero en la época de bajas temperaturas se sitúa en torno a los 250 metros de altitud, comprimiendo los contaminantes ambientales y aumentando su concentración a nivel de suelo (Figura 3). Entonces, “las concentraciones de contaminantes aumentan, dado el pequeño volumen de aire disponible, que es mayor en las depresiones topográficas sujetas a inversiones de temperatura generalmente marcadas” (Michelot y Carrega, 2014, p. 12).

Figura 3

Santiago de Chile bajo la capa de inversión térmica, 10 de junio de 2019



Nota: Fotografía tomada de Osses, 2019.

El aumento de concentración de gases contaminantes disminuye la calidad de vida de las personas (Darçın, 2014). La inversión térmica en sí misma no es un riesgo para la salud, pero sí lo es en presencia de contaminantes atmosféricos, cuando aparece como una capa de smog de un color ocre provocado por la presencia de óxidos de nitrógeno y diversas otras partículas (Enger, & Smith, 2006).

Esta *concentración de contaminantes urbanos*, que se agrava en días de inversión térmica, se beneficia de la humedad, el frío y la poca circulación de aire, disminuyendo la calidad de vida de las personas en el espacio urbano. La Organización Panamericana de la Salud ([OPS], 2018), estima que la

contaminación ambiental del aire, tanto en las ciudades como en las zonas rurales, fue causa de 4,2 millones de muertes prematuras en todo el mundo por año. El impacto de las inversiones de temperatura en las enfermedades respiratorias agudas y cardiovasculares en Hanoi, provocó que el promedio diario de visitas de emergencia en los dos hospitales de 2011 a 2015 durante el período de inversiones fuera mayor que en los días normales (Trinh et al., 2019). Tanto la exposición a corto como a largo plazo a los contaminantes del aire puede incrementar el riesgo de infecciones respiratorias, enfermedades cardíacas, accidentes cerebrovasculares y cáncer de pulmón. Los contaminantes más nocivos para la salud, estrechamente asociados con la mortalidad prematura excesiva, son partículas finas MP_{2,5} (aproximadamente 1/30 del ancho promedio de un cabello humano) que penetran profundamente en los conductos pulmonares. Grandes cantidades de partículas son típicamente emitidas por fuentes tales como los vehículos diésel, la quema de residuos y cultivos y la generación de hollín (Gramsch et al., 2009). Las partículas de menos de 10 micrómetros de diámetro (MP₁₀) representan un problema de salud porque pueden inhalarse y acumularse en el sistema respiratorio (OPS, 2018). El ozono (O₃), el dióxido de nitrógeno (NO₂) y el dióxido de azufre (SO₂) son también contaminantes graves para la salud. Si en esta gran superficie sombreada no se produce circulación de aire, en ausencia de vegetación, se dan las condiciones propicias para un aumento de la concentración de gases contaminantes en esos conos de sombra. Mientras que la ciudad de Santiago representa una isla de calor en medio del valle del Maipo (Sarricolea Espinoza y Martín-Vide, 2014), el distrito económico de Estación Central parece configurar una isla de frío en medio de la ciudad, especialmente, en períodos invernales de inversión térmica. De manera complementaria, ha sido demostrado el papel fundamental de la vegetación en la absorción y, por ende, en el mejoramiento de la calidad del aire en la ciudad (Escobedo et al., 2011), ya que esta ejerce un rol de saneamiento ambiental al absorber parte de las moléculas contaminantes (Quintanilla, 1984), proporcionando un servicio ecosistémico para aliviar los impactos de la urbanización (Pava Meza, 2020). A modo de ejemplo, Priego González de Canales (2002) explica que

en 1994, los árboles en la ciudad de New York eliminaron aproximadamente 1.821 toneladas métricas de

contaminantes atmosféricos, suponiendo un costo para la sociedad de US\$ 9,5 millones [...] Árboles sanos, más grandes de 77 cm de diámetro, eliminan aproximadamente 70 veces más la polución atmosférica anual (1,4 Kg/yr), que árboles de tamaño menor a 8 cm de diámetro (0,02 Kg/yr) (pp. 8-9).

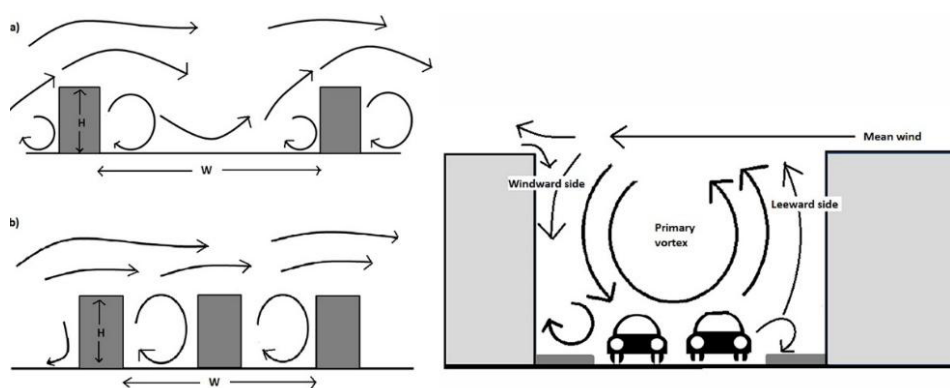
Es por ello que, según diversos autores (Makhelouf, 2009; Paoletti et al., 2011) los parques actúan como *sumideros de carbono*.

Escobedo et al. (2008) han modelado la rentabilidad del uso de bosques urbanos para mejorar la calidad del aire. Escobedo et al. (2011) consideran que las plantaciones de árboles adicionales en toda la ciudad tendrían poco efecto en la compensación de las emisiones de carbono. Sin embargo, Barra López (2019) indica que el almacenamiento de carbono tonelada métrica/año de algunos árboles es importante. Por ejemplo, el *Platanus Orientalis* puede almacenar 101,5 tonelada métrica/año de carbono. Su equivalente CO₂ en tonelada métrica es de 372,3 (p. 116). También indica que el equivalente CO₂ en tonelada métrica/año de secuestro de carbono del mismo árbol es de 0,99 (p. 118). Así, por ejemplo, la capacidad de secuestro bruto anual de carbono que posee la estructura arbórea del parque Ecuador, en Concepción (351 árboles, en 48 especies exóticas y 5 nativas) corresponde a 3,22 toneladas métricas, la cual equivale a 11,89 toneladas métricas de CO₂ (p. 83). Ese mismo arbolado eliminó durante el año 2015 4,52 kg de MP_{2,5} (p. 72). Por ello, Barra López afirma que

aunque el nivel de reducción de las concentraciones de contaminación atmosférica al interior de la ciudad es mínimo por parte del arbolado urbano, los árboles eliminan cantidades sustanciales de contaminantes atmosféricos y pueden generar importantes beneficios para la salud a nivel general (p. 94).

Según Buzzelli (2008), el poder explicativo de relaciones estadísticas significativas entre los usos y las coberturas de los suelos urbanos, en relación con las distancias a las calles más congestionadas, la presencia de áreas verdes, la forma de las edificaciones y otros atributos urbanos que permitan construir modelos espaciales de la contaminación atmosférica y sus efectos, son necesarios para entender el

Figura 4
Esquemas explicativos del cañón urbano



Nota: Izquierda: La comparación de (a) flujo de rugosidad aislado y (b) regímenes de flujo de desnatao en un cañón de la calle. Derecha: En el régimen de flujo desnatao, el vórtice de viento creado dentro de un cañón de la calle, cuando la dirección media del viento es perpendicular a la calle. Figura basada en Oke, 1988, p. 105.

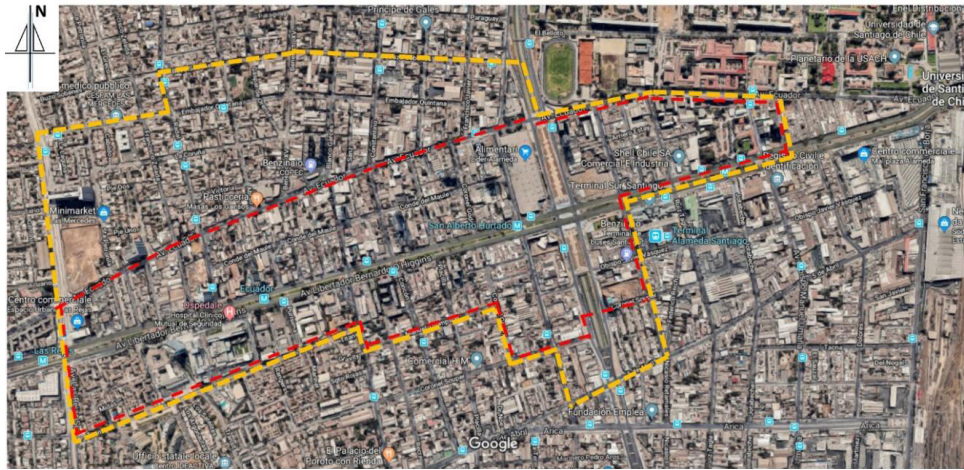
efecto del aire urbano sobre la salud de la población, ya que la contaminación puede estar aumentando severamente en torno a las calles de mayor congestión de tráfico o alrededor de fuentes fijas. Tong et al., (2016) concluyen que estrategias de ventilación efectivas que reducen la exposición humana al tráfico deben incluir, en la etapa inicial de diseño, la planificación de la distancia de los nuevos edificios a las vías y a las corrientes de viento. La insuficiencia normativa en la construcción en términos de protección ambiental y la falta de exigencias en el proceso de construcción contribuyen a que los edificios sobre 60 metros de altura provoquen un aumento de la contaminación del aire en grandes áreas urbanas, debido al cambio en la intensidad y dirección del viento que provocan por la obstrucción y los espacios confinados, además del incremento de la congestión vehicular que esos mismos edificios generan y la insuficiente incorporación de espacios verdes y vegetación en dichos proyectos inmobiliarios (Hayati, & Sayadi, 2012). Las áreas urbanas modernas con edificios de gran altura tienen un impacto tanto en la aerodinámica local como en las condiciones de temperatura del territorio con resultados desfavorables para el medio ambiente, ya que crean zonas con aire estancado en espacios públicos abiertos. Al diseñar edificios de gran altura, es necesario tener en cuenta las características específicas de las áreas edificadas, la plasticidad espacial y la densidad de la construcción, que afectan a la aerodinámica del terreno y la contaminación del aire atmosférico (Giyasov, & Giyasova, 2018). Por otra parte, y tras cuatro años de mediciones de la influencia del distrito de gran altura de *La Défense* en París, sobre factores climáticos y patrones de contaminación del aire, Makhelouf (2012) observa que los cuartos del piso superior se benefician del aire acondicionado natural y una menor concentración de contaminación, respecto de los pisos inferiores.

Esta concentración de gases contaminantes se agrava cuando se produce el efecto de *cañón urbano*. Siguiendo a Nicholson (1975), cañón urbano es el espacio flanqueado por edificios a ambos lados, alineados de manera continua a lo largo de una calle relativamente estrecha, similar a un cañón flanqueado por acantilados. Los contaminantes emitidos en esa calle tienden a dispersarse menos que aquellos emitidos en un área abierta (Weber et al., 2013). La situación se agrava cuando los vientos principales soplan de manera perpendicular a la calle. Allí, la calidad del aire se vuelve un serio problema, particularmente agravado por las emisiones de los vehículos motorizados. El cañón urbano modifica la temperatura, la velocidad y la dirección del viento y, en consecuencia, la calidad del aire dentro del cañón. Los flujos asociados con edificios separados por la calle que no interactúan entre sí se llaman flujos aislados de rugosidad (Figura 4, izquierda). En el caso en que la proporción entre la altura (H) y el ancho (W) entre edificios separados por una calle sea menor a $0,7 < H/W$, se origina un vórtice estable en el interior del cañón urbano que interactúa muy levemente con el flujo de aire exterior. Este vórtice induce a que el flujo del aire a nivel de la calle tenga una dirección contraria a la del viento que circula sobre los edificios. Se conoce como flujo de desnatao o en vórtice (Figura 4, derecha) (Lipp, 2014).

Metodología

Se utilizó un método cuantitativo. La investigación se realizó entre enero de 2019 y fines de junio de 2020 y se llevó a cabo a través de una técnica combinada de observación y verificación permanente en terreno,

Figura 5
Zona en estudio



Nota: En rojo, perímetro del fragmento estudiado, donde se encuentra la mayor concentración de torres de más de 20 pisos en Estación Central, construidas entre 2013 y 2019. En amarillo, polígono mayor en el que se han levantado también otras torres, pero, por el momento, territorialmente más espaciadas. Imagen tomada por Google en 2019.

análisis gráfico y estadístico de documentos existentes y un modelamiento digital.

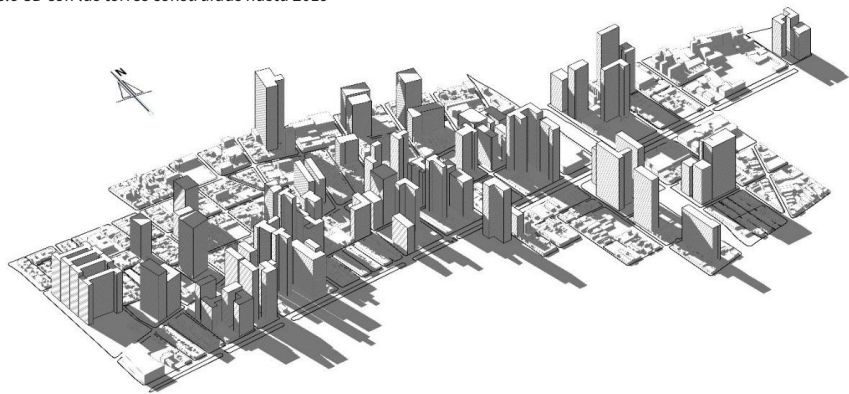
La investigación se desarrolló en la ciudad de Santiago de Chile (Biblioteca Congreso Nacional [BCN], s.f.; Dirección Meteorológica de Chile [DMCh], 2020; 2021), en la comuna de Estación Central, en el fragmento delimitado por las calles avenida Ecuador, Wenceslao Sánchez, Alameda, Nicasio Retamales, Coronel Souper, Coronel Godoy, Manuel Thompson, General Amengual, Titán y avenida Las Rejas (Figura 5, línea roja). Este fragmento se inserta en un polígono mayor (Figura 5, línea amarilla) donde, una vez finalizada la primera parte de esta investigación, se han seguido construyendo torres.

En el caso de la *observación y verificación permanente en terreno*, se contabilizó el total de edificios, se observaron y registraron sus relaciones de distanciamiento, su forma y su ordenamiento en el espacio urbano. Se fotografiaron las sombras de todos los edificios, tanto en verano como en invierno, y se observó su impacto sobre las viviendas existentes. Se contabilizaron en terreno todos los árboles existentes en 2019. Además, apoyados en la detallada información de Google Maps, Google Earth Pro y Street View se contabilizaron todos los árboles existentes en 2013, calle a calle y manzana a manzana. Se observó la densidad de automóviles estacionados en las veredas o a ambos costados de calles estrechas. Además, el 8 de julio de 2019, se realizó un vuelo dron con registro de video y fotografía, sobre toda el área de estudio y su entorno inmediato, lo que permitió verificar detalladamente el levantamiento de edificios elaborado en terreno.

A través de la técnica de *análisis gráfico y estadístico de documentos existentes*, se estudió detalladamente el listado de edificios construidos desde 2013, elaborado por la Dirección de Catastro de la Ilustre Municipalidad de Estación Central, lo que permitió contar con las características específicas de cada uno de ellos, datos que se sintetizan en la Tabla 1. Se revisaron, además, fotos de la comuna anteriores a 2013, existentes en los archivos de la Escuela de Arquitectura de la Universidad de Santiago de Chile y se apoyaron y cotejaron las observaciones de terreno con las imágenes que ofrece Google Earth Pro, Google Maps y Street View. Para el estudio de la orientación de los vientos predominantes se usó la base de datos de la Dirección Meteorológica de Chile (2020a, 2020b) y de Weather Online (s.f.). Por último, para conocer el parque automotriz de la comuna, en 2013, se estudió la base de datos del Instituto Nacional de Estadísticas de Chile (s.f.).

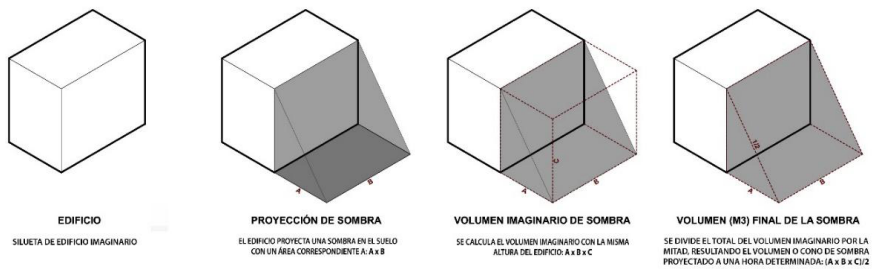
Finalmente, con el software Archicad versión 21 y a partir del levantamiento y análisis de la información antes descrita, se elaboró un *modelo tridimensional del fragmento en estudio*, donde se vació toda la información volumétrica del fragmento (Figura 6). En el mismo software Archicad, al modelo 3D se le incorporó la información real de las sombras producidas por la incidencia lumínica del sol. El resultado que arrojó el modelo fue contrastado con el resultado que mostraron las fotografías de la misma fecha y hora comprobando una gran similitud en cuanto a la longitud en el suelo de las sombras observadas en terreno. Como se ilustra y explica en la Figura 7, el modelo permitió cuantificar

Figura 6
Modelo 3D con las torres construidas hasta 2019



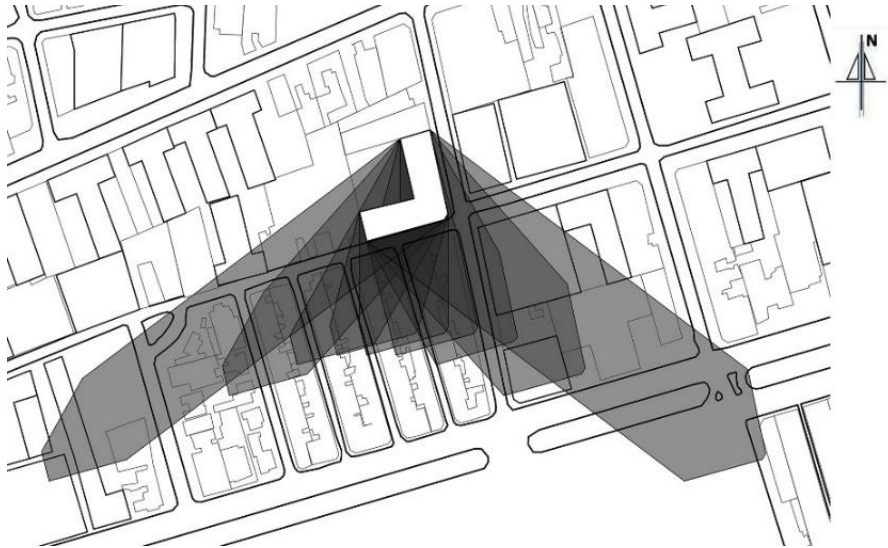
Nota: En el modelo se puede apreciar la sombra que se produce el 22 de junio (solsticio de invierno).

Figura 7
Cálculo de la superficie y del cono de sombra de cada edificio



Nota: En el modelo 3D, en Archicad v.21, se proyecta en el suelo la sombra del edificio, de acuerdo con la carta solar estereográfica para Estación Central (coordenadas $33^{\circ}27'22.0''S$ - $70^{\circ}42'04.0''W$, para la esquina de Radal con Alameda), para el 22 de junio, a las 12:53 (acimut 347° y altitud 36°). Se crea un volumen imaginario de la misma altura del edificio y se calcula su volumen. El resultado se divide por 2, resultando el cono de sombra de proyección paralela del edificio. La sumatoria de todos los conos de sombra es el volumen total de sombra de los edificios, para esa hora.

Figura 8
Cálculo de la superficie y del cono de sombra de cada edificio



Nota: se muestra la sombra que se produce a cada hora, entre las 9:00 y las 17:00 horas, el 22 de junio (solsticio de invierno).

Tabla 2
Simulación probable del volumen comparado de cono de sombra, antes de 2013 y en 2019

Sombra según estación del año	Superficie m ²	Volumen m ³
Sombra total de edificios en 2019, 22 de diciembre	65.418,50	2.360.490,60
Sombra total antes de 2013, 22 de diciembre	3.270,93	118.024,53
Sombra total de edificios en 2019, 22 de junio	237.967,40	8.615.195,70
Sombra total antes de 2013, 22 de junio	11.898,37	430.759,79

la superficie y el volumen de sombra arrojado por cada edificio, a las 12:53 del 22 de junio. A esa hora el sol se posiciona a 13° hacia el poniente del norte, es decir, un acimut de 347° y una altitud de 36°, provocando una sombra (*cono de sombra*) que se proyecta exactamente detrás de la mayoría de los edificios localizados entre la Alameda y avenida Ecuador (proyección paralela de sombra), en el área de estudio (Figura 6). La sumatoria de todos los volúmenes de sombra arrojados por los edificios a las 12:53 del 22 de junio corresponde al volumen total de sombra para esa hora. La Tabla 2 muestra una simulación probable del volumen comparado de cono de sombra, antes de 2013 y después de 2019. Los valores para 2019 fueron calculados directamente en el modelo. Los valores para 2013 fueron calculados, reemplazando cada edificio por un volumen simulado de un piso, que era la altura máxima de las edificaciones existentes que fueron demolidas. Esto se sabe gracias a la información de Google Earth Pro y al conocimiento que el autor tiene sobre la zona, desde 1987. Se calculó el cono de sombra de esos edificios de un piso para saber el volumen total de sombra antes de 2013. Como sabemos que en muchos casos no había vivienda construida en una porción o totalidad de la nueva torre edificada, sabemos que ese volumen total de sombra supera el volumen real probablemente existente. El valor que entrega la tabla para 2013 es, entonces, la máxima sombra posible (en superficie y volumen) que pudo existir en el mismo lugar hasta 2013. El modelo permitió, además, estudiar las nueve proyecciones de sombra producidas por cada edificio, cada hora, entre las 9:00 y las 17:00 horas del 22 de junio (solsticio de invierno), como se muestra en la Figura 8. Este cálculo y su representación gráfica permitió entender la noción de sombra continua: debido a la adición de las sombras de los distintos edificios, el 22 de junio la sombra al suroeste, sur y sureste de ellos cubre gran parte del territorio del fragmento.

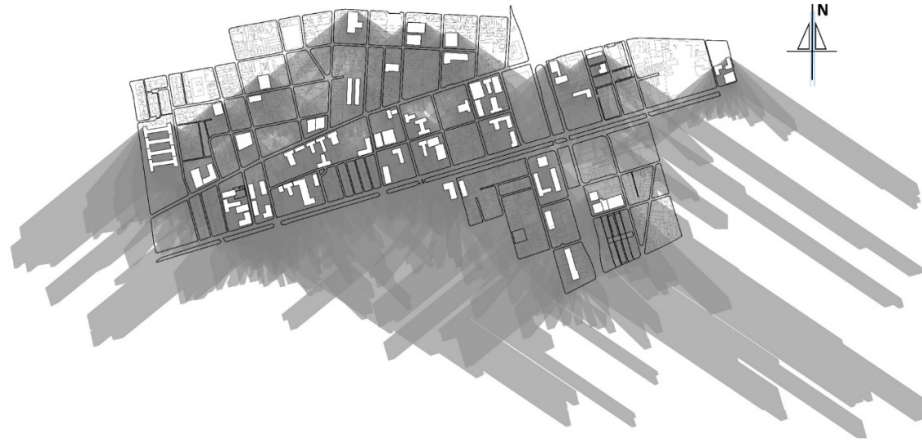
Resultados

Aparición de un cono de sombra permanente al Sur de los edificios

Sumando la sombra total que arrojan los edificios expuestos directamente a la radiación solar norte (sin considerar aquellos que están sombreados por dichos edificios), el volumen total de sombra que han incorporado en este fragmento en el solsticio de verano (22 de diciembre a las 12:12, que corresponde a las 13:12 según horario de verano de Santiago, UTC-3, acimut 347° y altitud 82°), en el fragmento estudiado alcanzó 2.360.490,60 m³. En el solsticio de invierno, 22 de junio de 2019, a las 12:53, el volumen total de sombra en el fragmento estudiado fue de 8.615.195,70 m³, lo que representa un aumento de 27 veces respecto de la sombra antes de 2013, en la misma fecha. Por su parte, el 22 de diciembre de 2019, a las 12:12 (13:12, UTC-3), la superficie de sombra fue de 65.418,50 m², mientras que el 22 de junio de 2019, a las 12:53, la superficie de sombra fue de 237.967,40 m² (Tabla 2).

La Figura 9 grafica, en conjunto, las nueve proyecciones de sombra, para todas las torres del fragmento urbano, producidas por cada edificio entre las 9:00 y las 17:00 horas del 22 de junio de 2019 (solsticio de invierno), provocando un volumen de sombra continuo, es decir, el total de conos de sombra calculados en la Figura 7, para cada una de las nueve horas. Por su parte, la Figura 10 muestra el efecto del cono de sombra permanente y la configuración inicial del efecto de cañón urbano en calle Conde del Maule.

Figura 9
Efecto de sombra sobre calle Conde del Maule



Nota: Se muestra la sombra producida a cada hora, entre las 9:00 y las 17:00 horas, el 22 de junio de 2019 (solsticio de invierno).

Figura 10
Interior condominios



Nota: A la izquierda se aprecia la sombra de uno de los edificios y que oscurece la calle. Frente a ese edificio se sitúa la calle Juan Francisco González (centro) oscurecida por dicha sombra. Más al poniente, se encuentra la calle Sabino Silva (derecha) la que no enfrenta ningún edificio y recibe sol gran parte del día todavía.

Probable disminución de la circulación de aire en los conos de sombra

En el artículo 2.6.2., la Ordenanza General de Urbanismo y Construcciones (OGUC) (Decreto 47 de 1992) define adosamiento como “la edificación no subterránea que se ubica contigua a los deslindes”. En el caso que nos ocupa, del total de torres construidas, 26 de ellas se encuentran adosadas en uno o más de sus lados. Además, 20 torres se encuentran a 8 metros de distancia de otra torre (Tabla 3). El artículo 2.6.3 de la OGUC establece que el distanciamiento mínimo al deslinde, para edificios sobre 7 metros de altura, es de 4 metros. Es decir, entre dos edificios no puede haber menos de 8 metros de distancia. Y la distancia debería ser mayor si se aplica debidamente la rasante de 70° que rige para la Región Metropolitana, de acuerdo con el mismo artículo. Por consiguiente, esa distancia de 8 metros es mínima y contribuye a aumentar el volumen de

sombra continuo o semicontinuo. Durante el invierno (mayo-agosto), el 30 % del viento proviene del noroeste, norte, noreste, y entra de manera perpendicular o semiperpendicular a las principales calles estudiadas. Desde el suroeste, sur y sureste proviene el 59 % de los vientos, en los meses de invierno. Es decir, 89 % de los vientos son perpendiculares o semiperpendiculares a las principales calles estudiadas. Además, desde el suroeste, sur y sureste proviene el 87 % de los vientos en los meses de verano (Tabla 4, Figura 11). En la medida en que la continuidad y extrema proximidad edificada de las torres se consolida en Alameda, Conde del Maule y avenida Ecuador, que son perpendiculares a los vientos predominantes suroeste, sur y sureste, este conjunto de torres parece comenzar a reunir las condiciones urbanas y arquitectónicas para obstaculizar la potencial acción disipadora del viento sobre los agentes contaminantes.

Tabla 3
Distanciamiento entre los 60 edificios construidos

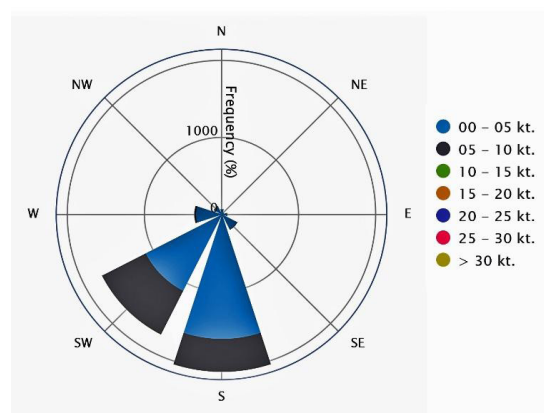
Edificios según distanciamiento	Edificios N°
Total de edificios con adosamiento a un lado	16
Total de edificios con adosamiento en dos o más lados	10
Total de edificios distanciados 8 metros	20
Total de edificios aislados	14

Tabla 4
Vientos predominantes²

Dirección del viento	Mayo-agosto 2019 %	Sept. 2019-abril 2020 %
Viento norte	11	5
Viento noreste	11	3
Viento este	3	0
Viento sureste	18	16
Viento sur	36	56
Viento suroeste	5	15
Viento oeste	8	2
Viento noroeste	8	2

Nota: Tabla realizada a partir de datos de la Dirección Meteorológica de Chile (2020b)³ y del Mapa topográfico de Santiago (s.f.).

Figura 11
Rosa de los vientos ocho direcciones. Dirección predominante y rango de intensidad en nudos (k.t) en 2019



Nota: Realizada a partir de datos de la Dirección Meteorológica de Chile, 2020b

Tabla 5
Número de árboles originales antes de 2013 y en 2019, en el fragmento Las Rejas – Av. Ecuador – Toro Mazote – Alameda (18,8 hectáreas de superficie)

Árboles urbanos	Árboles urbanos N°
Árboles urbanos, de calle e interior, hasta 2011	564
Árboles urbanos, de calle e interior, en 2019	223

Disminución de la vegetación

La vegetación es un actor fundamental para absorber contaminantes atmosféricos urbanos. La ausencia de vegetación disminuye dicha absorción y permite la libre circulación de dichos contaminantes. La capacidad de almacenamiento de carbono (y su equivalente en CO₂) a lo largo de la vida del árbol, y su capacidad de secuestro del carbono (la captura que realiza cada cierto período), dependen de la especie arbórea y debe ser medida para cada caso. Además, su real impacto sobre la disminución de la contaminación depende de la salud de la copa, de la especie, de la composición de la hoja, del porcentaje de cobertura arbórea, de su distribución y del tamaño del árbol. Pero, como se explicó en el marco conceptual, su función secuestradora y almacenadora de carbono ha sido comprobada. En el fragmento estudiado, del total de 564 árboles urbanos existentes hasta 2013, a diciembre de 2019 solo quedaban 223 (Tabla 5). Algunas de las especies de árboles cortados fueron Liquidambar (*Liquidambar styraciflua*), Acer (*Acer pseudoplatanus*) y Ciruelo en Flor (*Prunus cerasifera*), cuya capacidad de secuestro de carbono equivalente a CO₂ (tonelada métrica/año) es de 0,64; 0,46 y 0,14, respectivamente. Es decir, de manera hipotética, si consideramos un promedio de 0,41 toneladas métricas/año de CO₂, el total capturado por los 341 árboles cortados es una cifra en torno a 139 toneladas de CO₂ que se dejaron de capturar, por año. En algunas de las calles se han plantado algunos jóvenes ejemplares de ornamento.

Aumento del parque automotriz

La densidad poblacional promedio en Estación Central es de 79 habitantes por hectárea. Las 80 torres albergan 38.708 departamentos. Cada edificio posee, en promedio, 483 departamentos. Como existen 3,4 torres por hectárea, entonces existen 1.645 departamentos por hectárea. Si en cada departamento residen en promedio cuatro personas, entonces la densidad es de 6,580 hab/hect. Esta

² Cantidad de viento promedio, según orientación y época del año, en porcentaje, en un año, medido a 10 m sobre el nivel del suelo, aproximadamente a 527 metros sobre el nivel del mar. Mayo-agosto es la época donde se concentran los episodios de inversión térmica.

³ Estación Quinta Normal, código 330020, Av. Portales 3450. Estación Central.

Tabla 6
Parque automotriz en la comuna de Estación Central

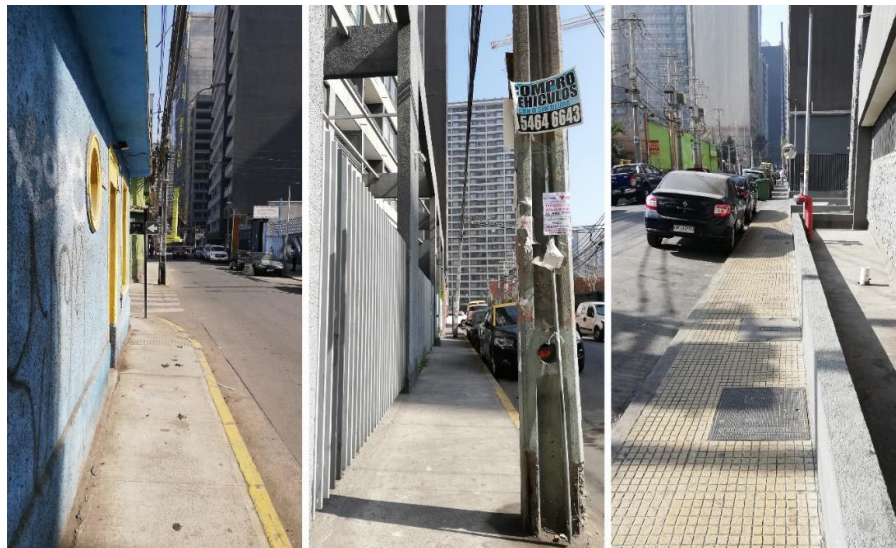
Elemento	Número
Total parque automotriz Estación Central en 2013, según INE	32.258
Total parque automotriz Estación Central en 2019, según INE	36.952
Total nuevos estacionamientos proyectados entre 2013 y 2019	11.560
Total de vehículos nuevos en función del N° de departamentos con permiso de edificación aprobado, incluidos los estacionamientos proyectados	19.354

Nota: Tabla elaborada a partir del Listado oficial edificaciones en altura (Municipalidad de Estación Central, 2019) y del Instituto Nacional de Estadísticas (s.f.).

Figura 12
Alta densidad de vehículos estacionados en calle Conde del Maule esquina Con-Con



Figura 13
Veredas originales muy estrechas, cuyo ancho no fue corregido con la construcción de los nuevos edificios



Nota: Las imágenes muestran el ancho de la vereda en Conde del Maule 4.528 (izquierda), 4.630 (centro) y 4.684 (derecha).

densidad demográfica se expresa también en el aumento del parque automotriz. De acuerdo con el catastro del INE, en 2013, el parque automotriz de toda la comuna de Estación Central era de 32.258 automóviles. En 2019, el total de torres con permiso de edificación aprobado incluía 38.708 departamentos (Tabla 1). La misma tabla indica un total de estacionamientos construidos y en proceso de construcción de 11.560 (Figura 12). Sin embargo, en una hipótesis conservadora, si se considera un automóvil cada dos departamentos, sin contar los vehículos para las visitas y los de servicio y reparto, es de esperar que en este fragmento circulen como mínimo 19.354 automóviles, cuando todos los edificios estén habitados (Tabla 6), es decir, un aumento del 60 % respecto de

2013. Esto, combinado con las estrechas veredas del sector (Figura 13), le otorga un gran protagonismo al automóvil, en desmedro de los peatones. Cabe añadir que, según Ríos Bedoya et al. (2016), un automóvil emite 189,21 g de CO₂/pasajero x km. En consecuencia, estos 19.354 automóviles nuevos emitirán 3,66 toneladas de CO₂/pasajero x km, aproximadamente, las que se suman a las actuales emisiones.

Discusión

Los resultados indican que los 60 edificios en altura ya construidos en Estación Central provocan un cono de sombra permanente al sur de ellos. Este cono es estable

durante todo el día en el período invernal, entre mayo y agosto. Cubre de manera casi continua toda la calle Conde del Maule y sectores cada vez más extensos de la avenida Ecuador y de la Alameda. La continuidad de la edificación aumenta el volumen del cono continuo, sin que la normativa urbana ejerza un control sobre dicho volumen, ya que las normas urbanísticas de asoleamiento no incluyen la variable *ganancia térmica* y no se focalizan en la manzana o en el entorno del edificio, es decir, en el impacto colectivo de la arquitectura (Cárdenas y Uribe Araya, 2012).

Los resultados también revelan la muy probable disminución de la circulación de aire en dichos conos de sombra durante el período invernal, debido, por una parte, a que muchos de los edificios se adosan o se construyen de manera continua, creando muros que obstaculizan la circulación de viento. El artículo 2.6.2. de la OGUC indica que “el adosamiento no podrá en ningún caso ocupar el antejardín (...) La altura del adosamiento en el deslinde no sobrepasará los 3,5 m”, salvo “cuando el adosamiento coincida con una edificación existente aprobada, de mayor altura, ubicada en el predio vecino a partir del deslinde común (...) siempre que no sobrepase la de la edificación vecina existente”. Además, la OGUC es enfática en señalar que “en los predios de superficie superior a 500 m² de uso habitacional, como asimismo en predios de cualquier superficie destinados a otros usos, el Plan Regulador Comunal o el Plan Seccional podrán prohibir los adosamientos”; 26 torres construidas se encuentran adosadas en uno o más de sus lados, en toda su altura, infringiendo el artículo 2.6.2. Además, 20 torres se ubican a alrededor de 8 metros de distancia de otra torre (Tabla 3). Este adosamiento y mínimo distanciamiento de 46 edificios contribuye a generar una continuidad edificada en altura, inexistente antes de 2013.

Cuando el lado más largo del edificio se orienta hacia el norte, aumenta la ganancia lumínica y térmica al interior del edificio. Sin embargo, cuando esta orientación se combina con un agrupamiento continuo entre edificios, se incrementa el efecto sombra de estos hacia el sur. La situación se agrava cuando los vientos predominantes son perpendiculares a las calles sobre las que se emplazan

estos edificios. Como ha sido demostrado (Giyasov, & Giyasova, 2018; Lipp, 2014), esta continuidad edificada disminuye la adecuada circulación del aire, reduciendo a su vez la ventilación a nivel de suelo de los vientos predominantes, en este caso sur y norte, perpendiculares a las vías en torno a las que se sitúan mayoritariamente los nuevos edificios. La disposición de los edificios contribuye a generar una barrera que restringe la acción del viento norte sobre el cono de sombra sur en los meses de inversión térmica. Así, debido a la posición y agrupamiento de los edificios, el 30 % de los vientos norte no pueden ventilar el cono de sombra sur. Además, por la forma alargada del fragmento, de este a oeste, fundamentalmente a lo largo de la avenida Ecuador y, sobre todo, en calle Conde del Maule, se comienzan a configurar las condiciones de producción del efecto de cañón urbano (Oke, 1988), por la progresiva aparición de edificios en altura a ambos lados de las vías. Debido a ello, tampoco es posible contar con parte del 59 % de viento sur de los meses de invierno y, en consecuencia, las probabilidades del aumento de la contaminación urbana a nivel de suelo son altas.

Los resultados mostraron además la disminución de la vegetación arbórea, debido a la tala de 341 árboles, a lo largo de siete años, lo que mermó las posibilidades de absorción de gases contaminantes, debido a la disminución de biomasa (Mota et al., s.f.). En todo caso, en algunos casos, los árboles eliminados fueron reemplazados por nuevos árboles jóvenes.

El importante incremento previsto del parque automotriz incorporará un volumen de gases contaminantes por combustión que agravará las condiciones del aire respirable en todo el sector, a menos que se aplique una rápida y sólida política de descarbonización de vehículos motorizados, como lo explica Todts (2018).

Los resultados de la investigación son válidos para todas las áreas urbanas donde se hayan construido y se proyecte construir, edificios en altura, emplazados en vías vehiculares perpendiculares a la dirección de los vientos predominantes. Las posibilidades de aumento de la concentración de gases contaminantes a nivel de

suelo serán más altas en la medida en que esos edificios configuren el efecto de cañón urbano.

El método cuantitativo que combina las tres técnicas aquí aplicadas -observación, análisis de contenido y modelamiento digital- es efectivo para lograr los resultados. No obstante, las técnicas de levantamiento de la información requerirán algunas precisiones para mejorar la calidad de los resultados. A pesar de que es muy probable que el cálculo de la superficie y del volumen el cono de sombra que se ha realizado, para la situación anterior a 2013, sea bastante cercano a la realidad, será necesario modelar el espacio urbano para ese año y calcular con precisión dicho cono. Por otra parte, si bien las condiciones de continuidad edificada y de perpendicularidad de las calles, en relación con los vientos predominantes, prefiguran una mala ventilación en dichas calles, esta afirmación es todavía hipotética. Los regímenes de vientos de microescala podrían modificar las condiciones locales de ventilación, por lo que solo la medición con los instrumentos adecuados permitirá validar esta afirmación. Respecto de la vegetación, hemos realizado una primera aproximación cuantitativa en relación con la disminución de la cantidad de árboles. Será todavía necesario conocer las especies de los árboles que han sido talados, ya que no todas son capaces de absorber gases contaminantes (Luis, 2016).

Conclusiones

En relación con el objetivo de este trabajo, los resultados de la investigación revelaron que, en el solsticio de invierno, durante los meses de inversión térmica, el cono de sombra *continuo* de 8.615.195,70 m³ que se produce es propicio para generar un aumento de la humedad y un descenso relativo de la temperatura, con el consiguiente incremento de la concentración de gases contaminantes a nivel de suelo. Durante los meses de inversión térmica, en torno al solsticio de invierno, las calles Conde del Maule, la vereda norte de Alameda, un sector de la avenida Ecuador y varias calles transversales se encuentran en un estado de sombra permanente. A manera de ilustración, algunas calles perpendiculares a las calles principales estudiadas, como es el caso de la calle Juan Francisco González,

se encuentra en penumbra debido a un edificio de 17 pisos (alrededor de 55 metros) que fue construido junto al frente, en calle Conde del Maule. Debido a la altura del edificio, las viviendas sobre Conde del Maule están sombreadas todo el año. Aquellas que se encuentran en los 50 metros más próximos a Conde del Maule, están sombreadas durante alrededor de nueve meses, entre los equinoccios. Antes de la construcción del edificio, todas esas viviendas estaban soleadas todo el año. A 32 metros hacia el poniente se encuentra la calle Sabino Silva. Esta, libre aún de edificio situado al norte, se beneficia de sol casi todo el año (Figura 10).

Un adecuado distanciamiento entre los edificios de Estación Central, que disminuyera la continuidad de la sombra en invierno, hubiese contribuido a generar condiciones básicas de asoleamiento para evitar el aumento de la concentración de gases contaminantes a nivel de suelo, producto del frío y la humedad. Al mismo tiempo, sin bien aún no hemos terminado de medir la intensidad, dirección y velocidad del viento, la configuración lineal continua de los nuevos edificios, a lo largo de Alameda, Conde del Maule y avenida Ecuador, va consolidando un obstáculo lineal perpendicular al 59 % de los vientos suroeste, sur, sureste en invierno y al 30 % de los vientos noroeste, norte y noreste. En total, 89 % de los vientos de invierno son perpendiculares a esas tres calles. Esta configuración permite prever un déficit de ventilación en invierno, el que genera una probable estanqueidad del aire que contribuye a la concentración de los gases contaminantes. Cabe añadir que, en verano, el 87 % de los vientos proviene del suroeste, sur y sureste. Aunque no es el tema que nos ocupa, esa pobre ventilación estival puede contribuir a que las masas de aire caliente se concentren en dichas calles sin ser disipadas.

Por otra parte, al haber cortado 341 árboles, se dejó de capturar una cantidad de CO₂ de 139 toneladas en un año. En contrapartida, el total de departamentos en proceso de construcción permite estimar el aumento de vehículos en una cifra cercana a 19.354 nuevas unidades. Ese total de vehículos emitirá 3,66 toneladas de CO₂/pasajero x km, aproximadamente, que se suman a las actuales emisiones. Si, de manera hipotética, consideramos que cada vehículo

se desplaza 20 km semanales en promedio, las emisiones totales alcanzarán 73,2 toneladas de CO₂ a la semana y 3.806 toneladas de CO₂ al año, como mínimo. Haber preservado los 341 árboles no resuelve la necesidad de captura del CO₂ emitido por los nuevos vehículos. Pero los números evidencian que aumentar la arborización y disminuir la motorización es el camino apropiado para capturar CO₂ y disminuir la emisión de gases de efecto invernadero. Hoy en día el aumento considerable de la sombra, la obstaculización de los vientos dominantes, la disminución de la biomasa arbórea y la expansión del parque automotriz generan condiciones propicias para el incremento de la concentración de gases contaminantes a nivel de suelo.

En caso de persistir esta tendencia de construcción continua o adosada, enfrentando edificios de gran altura en torno a las principales calles, especialmente avenida Ecuador y Conde del Maule, el riesgo de crear condiciones de cañón urbano de alta contaminación, es alto. En consecuencia, se ha demostrado que el proceso inmobiliario de la comuna de Estación Central posee las condiciones arquitectónicas y urbanas que pueden provocar un aumento de la concentración de gases contaminantes a nivel de suelo. Este está siendo actualmente medido con los instrumentos adecuados de modo de mejorar la precisión de algunos datos ya obtenidos. Este trabajo de medición y precisión de datos se llevará a cabo durante todo el año 2021. ⁴⁵

Referencias bibliográficas

- Aw, J., & Kleeman, M. J. (2003). Evaluating the first-order effect of intraannual temperature variability on urban air pollution. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 108(D12), 1-12. <https://doi.org/10.1029/2002JD002688>
- Barra López, D. (2019). *Análisis del efecto del arbolado urbano sobre la absorción de material particulado respirable (mp_{2,5}), mediante el software i - tree eco al interior del parque Ecuador en la ciudad de Concepción* [Tesis de grado]. Universidad de Chile, Santiago, Chile.
- Biblioteca Congreso Nacional (s.f.). *Clima y vegetación Región Metropolitana de Santiago. Chile nuestro país*. <https://www.bcn.cl/siit/nuestropais/region13/clima.htm>
- Buzzelli, M. (2008). A political ecology of scale in urban air pollution monitoring. *Transactions of the Institute of British Geographers*, 33(4), 502-517. <https://doi.org/10.1111/j.1475-5661.2008.00316.x>
- Cárdenas, L. A. y Uribe Araya, P. (2012). Acceso solar a las edificaciones. El eslabón pendiente en la legislación urbanística chilena sobre la actividad proyectual. *Revista de Urbanismo*, (26), 21-42. <https://doi:10.5354/0717-5051.2012.20922>
- Darçın, M. (2014). Association between air quality and quality of life. *Environmental Science and Pollution Research*, 21, 1954-1959. <https://doi.org/10.1007/s11356-013-2101-3>
- Decreto 47 de 1992 (Ministerio de Vivienda y Urbanismo). Nuevo texto de la Ordenanza General de la Ley General de Urbanismo y Construcciones. 16 de abril de 1992.
- Dirección Meteorológica de Chile. (2020a). Viento predominante anual (16 direcciones). <https://climatologia.meteochile.gob.cl/application/anual/vientoPredominanteAnual18Direcciones/330020/2019>
- Dirección Meteorológica de Chile. (2020b). Viento predominante anual (8 direcciones). <https://climatologia.meteochile.gob.cl/application/anual/vientoPredominanteAnual10Direcciones/330020/2019>
- Dirección Meteorológica de Chile. (2021). *Reporte anual de la evolución del clima en Chile*. Oficina de Cambio Climático, Sección de Climatología de la Dirección Meteorológica de Chile. Dirección General de Aeronáutica Civil. <https://cambioclimatico.mma.gob.cl/wp-content/uploads/2021/06/ReporteClimatico2020-edmay2021.pdf>
- Enger, E.D., & Smith, B. F. (2006). *Environmental science: a study of interrelationships* (10ª edición). McGraw-Hill.

- Escobedo, F. J., Wagner, J. E., Nowak, D. J., De la Maza, C. L., Rodríguez, M., & Crane, D. E. (2008). Analyzing the cost effectiveness of Santiago, Chile's policy of using urban forests to improve air quality. *Journal of Environmental Management*, 86(1), 148–157. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2006.11.029>
- Escobedo, F. J., Kroeger, T., & Wagner, J. E. (2011). Urban forests and pollution mitigation: Analyzing ecosystem services and disservices. *Environmental Pollution*, 159(8-9), 2078–2087. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2011.01.010>
- Giyasov, B., & Giyasova, I. (2018). The Impact of High-Rise Buildings on the Living Environment. *E3S Web of Conferences*, 33, 1-7. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20183301045>
- Gramsch, E., Gidhagen, L., Wahlin, P., Oyola, P., & Moreno, F. (2009). Predominance of soot-mode ultrafine particles in Santiago de Chile: Possible sources. *Atmospheric Environment*, 43(14), 2260–2267. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2009.01.047>
- Gramsch, E., Cáceres, D., Oyola, P., Reyes, F., Vásquez, Y., Rubio, M. A., & Sánchez, G. (2014). Influence of surface and subsidence thermal inversion on PM_{2.5} and black carbon concentration. *Atmospheric Environment*, 98, 290–298. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2014.08.066>
- Haghighat, F., & Mirzaei, P.A. (2011). Impact of non-uniform urban surface temperature on pollution dispersion in urban areas. *Building Simulation*, 4, 227. <https://doi.org/10.1007/s12273-011-0035-6>
- Hayati, H., & Sayadi, M.H. (2012). Impact of tall buildings in environmental pollution. *Environmental Skeptics and Critics*, 1(1), 8-11. <https://www.ingentaconnect.com/content/doi/2012/00000001/00000001/art00002;jsessionid=2b2cddd6tlbch.x-ic-live-01>
- Instituto Nacional de Estadísticas. (s.f.). Permisos de circulación. <https://www.ine.cl/estadisticas/economia/transporte-y-comunicaciones/permiso-de-circulacion/parque-de-vehiculos>
- Inzulza Contardo, J., Wolff Cecchi, C. & Vargas Lara, K. (2017). Acceso solar: un derecho urbano para la calidad de vida vulnerado desde la gentrificación contemporánea. El caso de la comuna de Estación Central, Chile. *Revista 180*, (39), 1-15. <http://www.revista180.udp.cl/index.php/revista180/article/view/283>
- Lipp, D. (2014). El cañón urbano su incidencia en la contaminación del aire. *Actas Congreso Internacional de Geografía*, 123-128. http://www.gaea.org.ar/Actas2014_Lipp.pdf
- Luis, J. (febrero 5, 2016). Los árboles más eficientes para la absorción de CO₂. *Conciencia Eco*. <https://www.concienciaeco.com/2016/02/05/los-arboles-mas-eficientes-la-absorcion-co2/>
- Makhelouf, A. (2009). The Effect of Green Spaces on Urban Climate and Pollution. *Iranian Journal of Environmental Health Science & Engineering*, 6(1), 35-40. <https://www.semanticscholar.org/paper/The-Effect-Of-Green-Spaces-On-Urban-Climate-And-Makhelouf/78217e85721b997256d08525a1a5fcc238007517>
- Makhelouf, A. (2012). Impact assessment of the construction of tall buildings in a big town on the urban climate and the air pollution. *E3 Journal of Environmental Research and Management*, 3(4), 064-074. http://e3journals.org/cms/articles/1336909780_Ali.pdf
- Mapas topográficos (s.f.). Santiago. <https://es-ar.topographic-map.com/maps/j7cj/Santiago/>
- Michelot, N. y Carrega, P. (2014). Topoclimatologie et pollution de l'air dans les Alpes-Maritimes: mécanismes et conséquences en images. *EchoGéo*, (29). <https://doi.org/10.4000/echogeo.13951>
- Mota, C., Alcaraz-López, C., Iglesias, M., Martínez-Ballesta, M.C. y Carvajal, M. (s.f.). *Investigación sobre la absorción de CO₂ por los cultivos más representativos de la Región de Murcia*. Departamento de Nutrición Vegetal, CEBAS-Consejo Superior de Investigaciones Científicas. http://www.lessco2.es/pdfs/noticias/ponencia_cisc_espanol.pdf

- Municipalidad de Estación Central. (2019). *Listado oficial edificaciones en altura*. Edición del autor.
- Nicholson, S. E. (1975). A pollution model for street-level air. *Atmospheric Environment*, 9(1), 19-31. [https://doi.org/10.1016/0004-6981\(75\)90051-7](https://doi.org/10.1016/0004-6981(75)90051-7)
- Oke, T. R. (1988). Street design and urban canopy layer climate. *Energy and Buildings*, 11(1-3), 103-113. [https://doi.org/10.1016/0378-7788\(88\)90026-6](https://doi.org/10.1016/0378-7788(88)90026-6)
- Osses, B. (10 de junio de 2019). Intendencia decreta alerta ambiental para este martes en la Región Metropolitana. *El Mercurio*. <https://www.emol.com/noticias/Nacional/2019/06/10/950842/Intendencia-decreta-alerta-ambiental-para-este-martes-en-la-Region-Metropolitana.html>
- Organización Panamericana de la Salud. (2018). *Contaminación del aire ambiental exterior y en la vivienda: Preguntas frecuentes*. https://www.paho.org/hq/index.php?option=com_content&view=article&id=14454:ambient-and-household-air-pollution-and-health-frequently-asked-questions&Itemid=72243&lang=es
- Paoletti, E., Bardelli, T., Giovannini, G., & Pecchioli, L. (2011). Air quality impact of an urban park over time. *Procedia Environmental Sciences*, 4, 10-16. <https://doi.org/10.1016/j.proenv.2011.03.002>
- Pava Meza, P. (2020). *Vegetación urbana como estrategia para reducir la contaminación del aire en áreas urbanas*. <https://repository.unimilitar.edu.co/bitstream/handle/10654/36084/PavaMezaPaolaAndrea2020.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Priego González de Canales, C. (2002). *Beneficios del arbolado urbano*. <https://digital.csic.es/bitstream/10261/24578/1/Beneficios%20del%20arbolado%20urbano.pdf>
- Quintanilla, V. (1984). El rol ecológico del árbol urbano en el medio ambiente de la Metrópoli de Santiago. *Revista Geográfica*, (100), 49-65. <https://www.jstor.org/stable/40993132>
- Ríos Bedoya, V., Marquet, O. y Miralles-Guasch, C. (2016). Estimación de las emisiones de CO2 desde la perspectiva de la demanda de transporte en Medellín. *Revista Transporte y Territorio*, 15, 302-322. <http://revistascientificas.filo.uba.ar/index.php/rtt/article/view/2862>
- Rojas Symmes, L. (2017). Ciudad vertical: la nueva forma de la precariedad habitacional. Comuna de Estación Central, Santiago de Chile. *Revista 180*, (39), 1-17. <http://www.revista180.udp.cl/index.php/revista180/article/view/365> [http://dx.doi.org/10.32995/rev180.Num-39.\(2017\).art-365](http://dx.doi.org/10.32995/rev180.Num-39.(2017).art-365)
- Sarricolea Espinoza P. y Martín-Vide, J. (2014). El estudio de la Isla de Calor Urbana de Superficie del Área Metropolitana de Santiago de Chile con imágenes Terra-MODIS y Análisis de Componentes Principales. *Revista de Geografía Norte Grande*, (57), 123-141. <https://doi.org/10.4067/s0718-34022014000100009>
- Sharan, M, Kumar Yadav, A., Singh, M.P., Agarwal, P., & Nigam, S. (1996). A mathematical model for the dispersion of air pollutants in low wind conditions. *Atmospheric Environment*, 30(8), 1209-1220. [https://doi.org/10.1016/1352-2310\(95\)00442-4](https://doi.org/10.1016/1352-2310(95)00442-4)
- Todts, W. (Dir.) (2018). *Transport & Environment*. European Federation for Transport and Environment AISBL.
- Tong, Z., Chen, Y., Malkawi, A., Adamkiewicz, G., & Spengler, J. D. (2016). Quantifying the impact of traffic-related air pollution on the indoor air quality of a naturally ventilated building. *Environment International*, 89-90, 138-146. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2016.01.016>
- Trinh, T. T., Trinh, T. T., Le, T. T., Nguyen, T. D. H., & Tu, B. M. (2018). Temperature inversion and air pollution relationship, and its effects on human health in Hanoi City, Vietnam. *Environmental Geochemistry and Health*, 41(2), 929-937. <https://doi.org/10.1007/s10653-018-0190-0>
- Vidal Rojas, R. (2002). *Fragmentation de la ville et nouveaux modes de composition urbaine*. L'Harmattan.

Weather Online. (s.f.). Wind-direction (enero 2010 - diciembre 2019). <https://www.woespana.es/weather/.../>

Weber, S., Kordowski, K., & Kuttler, W. (2013). Variability of particle number concentration and particle size dynamics in an urban street canyon under different meteorological conditions. *Science of The Total Environment*, 449, 102-114, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2013.01.044>