

Oferta Técnica

Licitación ID: 611134-8-LP19

"ESTUDIO PARA DETERMINAR UN FACTOR DE HECTÁREAS A COMPENSAR EN
ÁREAS VERDES Y MASAS DE VEGETACIÓN POR MATERIAL PARTICULADO -MP10
POR RESUSPENSIÓN- EN EL MARCO DEL PLAN DE PREVENCIÓN Y
DESCONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA (PPDA) DE LA RMS"

Informe N° 3

Preparado para:

Elvira Figueroa, Daniel Sánchez, Claudia Cortés

Área de Recursos Naturales y Biodiversidad de la SEREMI MMA RMS

Preparado por:

Cynnamon Dobbs, Magdalena Olave, Pilar Olave y Marcelo Miranda.

10 de diciembre, 2020.

Tabla de contenido

1	Resumen Ejecutivo	10
2	Introducción	11
3	Objetivos	12
3.1	Objetivo específico a)	13
3.2	Objetivo específico b)	13
3.3	Objetivo específico c)	13
3.4	Objetivo específico d)	13
3.5	Objetivo específico e)	13
	Exposición de los resultados de la consultoría ante la comunidad local interesada y/o técnicos..	13
4	Marco Teórico	14
4.1	Contaminación atmosférica en ciudades	14
4.1.1	Efectos de la contaminación atmosférica en la salud de las personas	15
4.1.2	Contaminación atmosférica en la Región Metropolitana de Santiago	16
4.1.3	Legislación de la calidad del aire en la Región Metropolitana de Santiago	22
4.2	Arbolado urbano	24
4.2.1	Árboles y la regulación de la calidad del aire	26
4.2.2	Antecedentes de la depositación de MP10 sobre la vegetación de la Región Metropolitana de Santiago	30
4.3	Depositación de MP10 por masas vegetacionales	32
4.3.1	Revisión de metodologías existentes para estimar la depositación de MP10.....	32
4.3.2	Método 1: Medición de MP10 depositado en la vegetación.....	32
4.3.3	Método 2: Basados en Modelos Matemáticos	34
4.3.4	Método 3: Modelos de depositación de MP10 derivado de sensores remotos.....	42
5	Área de estudio	42
6	Metodología	43
6.1	Objetivo específico a) Definir áreas de muestreo para arbolado en función de la distribución espacial de la calidad del aire –MP 10 por Resuspensión - de la Región Metropolitana de Santiago	43
6.1.1	Áreas de muestreo en área peri-urbana	45
6.1.2	Áreas de muestreo en áreas urbanas	46
6.2	Objetivo específico b) Caracterización del arbolado en las áreas de muestreo definidas de la Región Metropolitana de Santiago.	47
6.2.1	Campaña de terreno	51
6.3	Objetivo específico c) Propuesta de modelo que permita monitorear y cuantificar el aporte del arbolado para remover material particulado - MP10 por Resuspensión - por las coberturas arbóreas.	63
6.3.1	Descripción de la herramienta I-Tree	64
6.3.2	Modelos utilizados por la herramienta I-Tree para el cálculo de depositación de MP10	65
6.3.3	Variables que utiliza el modelo de I-Tree para el cálculo de depositación de MP10	67
6.3.4	Concentración de MP10 en la Región Metropolitana: análisis de datos desde estaciones de monitoreo de contaminantes	67
6.3.5	Mapas de distribución de concentración de MP10 en la RMS	68
6.3.6	Viento en la Región Metropolitana: análisis de datos de velocidad del viento	69

6.3.7	Análisis fenológico del largo de la temporada productiva para la Región Metropolitana de Santiago	70
6.3.8	Descripción y ajuste de la metodología de cálculo para obtención de depositación de árboles	73
6.3.9	Mapas de distribución de depositación de MP10	75
6.4	Objetivo d) Proponer un factor de compensación que establezca una superficie y líneas de acción para emisiones de Material Particulado -MP10 por Resuspensión-, con el fin de contribuir a la gestión en la mantención y creación de áreas verdes y masas vegetación en la RMS.....	78
6.4.1	Propuesta de publicación en formato digital que pueda ser utilizada como medio de difusión del estudio.	79
6.5	Objetivo e) Exposición de los resultados de la consultoría ante la comunidad local interesada y/o técnicos.	79
7	Resultados	80
7.1	Objetivo específico a) Definir áreas de muestreo para arbolado en función de la distribución espacial de la calidad del aire –MP10 por Resuspensión - de la Región Metropolitana de Santiago.....	80
7.1.1	Áreas de muestreo peri-urbanas	80
7.1.2	Áreas de muestreo urbanas.....	81
7.2	Objetivo específico b) Caracterización del arbolado en las áreas de muestreo definidas de la Región Metropolitana de Santiago.	82
7.2.1	Caracterización del arbolado a escala local	82
7.2.2	Caracterización del arbolado a escala de parcela.....	87
7.3	Objetivo específico c) Propuesta de modelo que permita monitorear y cuantificar el aporte del arbolado para remover material particulado - MP10 por Resuspensión - por las coberturas arbóreas	103
7.3.1	Obtención y análisis de concentración de MP10 en la Región Metropolitana de para ser utilizado en modelo I-Tree.....	103
7.3.2	Obtención y análisis para velocidades de vientos para ser utilizado en el modelo I-Tree	111
7.3.3	Obtención de periodo con hojas de árboles caducifolios a través de análisis fenológico de la vegetación de la Región Metropolitana para ser utilizado en modelo I-Tree.....	113
7.3.4	Resultados de cálculos de depositación de MP10 por la vegetación muestreada utilizando el modelo I-Tree.....	115
7.4	Objetivo d) Proponer un factor de compensación que establezca una superficie y líneas de acción para emisiones de Material Particulado -MP10 por Resuspensión-, con el fin de contribuir a la gestión en la mantención y creación de áreas verdes y masas vegetación en la RMS.....	130
7.4.1	Propuesta de factor de compensación	130
7.4.2	Propuesta de líneas de acción para programas de compensación de emisiones.....	132
7.4.3	Áreas prioritarias para proyectos de compensación de emisiones	133
7.4.4	Descripción de líneas de acción	135
7.4.5	Propuesta de gestión de líneas de acción.....	150
7.4.6	Propuesta de publicación en formato digital que pueda ser utilizada como medio de difusión del estudio.	153
7.5	Objetivo e) Exposición de los resultados de la consultoría ante la comunidad local interesada y/o técnicos.	153
8	Conclusiones.....	154
9	Anexos.....	158
10	Referencias bibliográficas	159

Índice de Figuras

Figura 1. Comparación del tamaño MP10 y MP2,5 en relación a un grano de arena y un cabello humano. Fuente: http://airechile.mma.gob.cl/faq	16
Figura 2. Ingreso de MP10 al sistema respiratorio. Fuente: SEREMI Medio Ambiente RMS (2013).....	16
Figura 3. Promedio trienal de concentraciones de MP grueso (MP10) en estaciones de monitoreo del país, 2017. Fuente: Cuarto Reporte del Estado del Medio Ambiente, 2018.....	17
Figura 4. Fuentes de MP de diámetros menores a 2,5 [nm] por región del país. Fuente: Cuarto Reporte del Estado del Medio Ambiente, 2018.	18
Figura 5. Representación espacial de indicadores urbanos en el Gran Santiago. Fuente: Fernández y Wu, 2018.	19
Figura 6. Ubicación de las estaciones de la red MACAM en la RMS. Fuente: Elaboración propia.	20
Figura 7. Concentración de MP10 para los meses de otoño-invierno del año 2016 para graficar el área de presencia de dicha concentración en un radio de 5 km. Fuente: Elaboración propia.	22
Figura 8. Servicios ecosistémicos provistos por la vegetación presente en la ciudad y alrededor de ésta. Fuente: adaptado de www.global.nature.org	25
Figura 9. Mecanismos de remoción de contaminantes atmosféricos desde la vegetación. Las partículas atmosféricas quedan depositadas en las hojas. La capacidad de captura depende de la rugosidad de éstas, la presencia de tricomas (pelos) y la presencia de ceras en superficies de hojas. Contaminantes gaseosos como compuestos orgánicos volátiles quedan atrapados en las ceras epicuticulares de algunas hojas. Fuente: Adaptado de Garrec (2019).	28
Figura 10. Relación entre área foliar y el tamaño del árbol como indicador de provisión de servicios ecosistémicos. Fuente: The Benefits of Trees, 2019.	30
Figura 11. Depositación de MP10 por masas vegetacionales. Fuente: Adaptado de USDA, 2019.	30
Figura 12. Depositación de MP10 sobre bosque nativo. Fuente: MMA (2018).	31
Figura 13. Partículas de polen observadas desde un escáner electrónico microscópico. Fuente: ATA, 2019.	33
Figura 14. Modelo de simulación de fluidos. Se muestra la concentración de contaminantes al utilizar distintas posiciones de la vegetación en relación a los muros de los edificios en una calle de ciudad. Fuente: Jeanjean et al., 2015.	39
Figura 15. Área urbana y peri-urbana. Fuente: Elaboración propia a partir de datos de IDE (2016).	44

Figura 16. Densidades de bosque según estudio de CONAF y CIREN (2013). Fuente: Elaboración propia a partir de datos de CONAF y CIREN (2013).....	46
Figura 17. Áreas verdes de uso público de la RMS. Fuente: Elaboración propia a partir de datos de INE, 2016.	47
Figura 18. Esquema de ordenamiento metodológico.	48
Figura 19. Bandas espectrales. Fuente: Centro de Investigaciones Geoespaciales (CIG), Copernicus, ESA, EFFIS y JRC (2019).	49
Figura 20. Equipo Garmin GPSMAP 64 S a utilizar en campaña de terreno. Fuente: Elaboración propia.	52
Figura 21. Individuos de <i>Lithraea caustica</i> con varios vástagos. Fuente: Autoría propia.	53
Figura 22. Huincha diamétrica. Fuente: Elaboración propia.	53
Figura 23. Medición del diámetro a altura del pecho (DAP). Fuente: Elaboración propia.....	54
Figura 24. Medición de DAP en casos de varios vástagos.	54
Figura 25. Ceptómetro Decagon AccuPar LP-80 utilizado para la medición del Índice de Área Foliar. Fuente: Autoría propia.....	55
Figura 26. Coberturas de estrata arbórea a nivel de parcela. a)80%, b)50%, c)30, d)10%. Fuente: Elaboración propia.	56
Figura 27. Altura del árbol. Fuente: Elaboración propia.....	56
Figura 28. Hipsómetro. Fuente: Autoría propia.....	57
Figura 29. Medición de altura con hipsómetro según puntos de observación de quién realiza la medición. Fuente: Elaboración propia.....	58
Figura 30. Altura de inicio de copa. Fuente: elaboración propia.....	58
Figura 31. Medición de diámetro de copa. Fuente: Elaboración propia.	59
Figura 32. Porcentajes de copa viva. Fuente: Elaboración propia.....	59
Figura 33. Porcentajes de daño de la copa. La sección amarilla corresponde a la parte de la copa que presenta hojas de colores amarillos y rojos. Fuente: Elaboración propia.	60
Figura 34. Selección de localización de parcela de muestreo en áreas urbanas. Fuente: Google Earth Pro.	61
Figura 35. Diagrama de flujo sobre el uso de Modelo de Depositación de MP10. Fuente: elaboración propia.....	63

Figura 36. Ejemplo de representación de serie temporal de datos de NDVI, donde: (a) Inicio de la temporada productiva, (b) Fin de la temporada productiva, (c) Largo de la temporada productiva, y (f) NDVI. Fuente: Lund University (2018).....	72
Figura 37. Proceso de elaboración de mapas de depositación de MP10.	76
Figura 38. Distribución de áreas de bosque nativo. Fuente: elaboración propia a partir de datos de CONAF y CIREN (2013).	82
Figura 39. Pisos vegetacionales en la RMS según Luebert y Pliscoff (2006). Fuente: Elaboración propia	83
Figura 40. Distribución de especies dominantes del bosque esclerófilo en la RMS. Fuente: Elaboración propia a partir de datos de CONAF y CIREN (2013).	84
Figura 41. Especies nativas más frecuentes del tipo forestal bosque esclerófilo de la RMS según MMA (2018): a) <i>Quillaja saponaria</i> , b) <i>Lithraea caustica</i> , c) <i>Cryptocarya alba</i> , d) <i>Acacia caven</i> , e) <i>Peumus boldus</i>	84
Figura 42. Especies de árboles más frecuentes en las áreas verdes de Santiago. Fuente: Hernández y Villaseñor (2018).....	86
Figura 43. Ejemplo de especies exóticas de arbolado urbano la RMS que pueden ser encontradas en los puntos de muestreo del área urbana: a) <i>Sequoia sempervirens</i> , b) <i>Catalpa bignonioides</i> , c) <i>Prunus cerasifera</i> , d) <i>Robinia pseudoacacia</i> , e) <i>Acer negundo</i> , f) <i>Liquidambar styraciflua</i>	87
Figura 44. Distribución de parcelas peri-urbanas según especies dominantes y zonas de análisis.	89
Figura 45. Ubicación de puntos de muestreo en área urbana dentro de buffer de 5 km desde estaciones MACAM.	91
Figura 46. Puntos de muestreo en área urbana. Fuente: Elaboración propia.	92
Figura 47. Distribución de las parcelas de muestreo para el área peri-urbana de la RMS. Fuente: Elaboración propia a partir de datos de CONAF y CIREN (2013).	93
Figura 48. Sección de Planilla Excel en que se organizaron los datos levantados en terreno. Fuente: elaboración propia.....	93
Figura 49. Composición de especies arbóreas de parcelas ubicadas en zona Noroeste. Fuente: elaboración propia.	96
Figura 50. Composición de especies arbóreas de parcelas ubicadas en zona Costa. Fuente: Elaboración propia.	96
Figura 51. Composición de especies arbóreas en parcelas muestreadas en zona Andes. Fuente: elaboración propia.	97

Figura 52. Composición de especies arbóreas en parcelas muestreadas en zona Sur. Fuente: elaboración propia.....	98
Figura 53. Ejemplo ficha área peri-urbana.....	99
Figura 54. Frecuencia de especies en área urbana. Fuente: elaboración propia.....	100
Figura 55. Ejemplo ficha área urbana.....	102
Figura 56. Tendencia anual de la concentración de MP10 promedio para el periodo 2016 a 2019 para cada estación de la Red MACAM de la RMS. Fuente: elaboración propia.....	103
Figura 57. Promedio de concentraciones horarias de MP10 de la Red MACAM (2016-2019). Fuente: elaboración propia.....	104
Figura 58. Concentración MP10 promedio durante la temporada estival (Diciembre, Enero y Febrero) para el periodo 2016 a 2019 por cada estación de la Red MACAM. Fuente: elaboración propia.....	105
Figura 59. Concentración MP10 promedio durante la temporada invernal (Junio, Julio y Agosto) para el periodo 2016 a 2019 por cada estación de la Red MACAM. Fuente: elaboración propia.....	105
Figura 60. Concentración máxima de MP10 durante la temporada estival (Diciembre, Enero y Febrero) para el periodo 2016 a 2019 por cada estación de la Red MACAM. Fuente: elaboración propia.....	106
Figura 61. Concentración máxima de MP10 durante la temporada invernal (Junio, Julio y Agosto) para el periodo 2016 a 2019 por cada estación de la Red MACAM. Fuente: elaboración propia.....	107
Figura 62. Distribución espacial de concentraciones de MP10 para el período estival en la RMS, dentro de un radio de 5 kilómetros. Fuente: elaboración propia.....	108
Figura 63. Distribución espacial de concentraciones de MP10 para el período estival en el área metropolitana de la RMS, dentro de un radio de 5 kilómetros. Fuente: elaboración propia.....	109
Figura 64. Distribución espacial de concentraciones de MP10 para el período invernal en la RMS, dentro de un radio de 5 kilómetros. Fuente: elaboración propia.....	110
Figura 65. Distribución espacial de concentraciones de MP10 para el período invernal en el área metropolitana de la RMS, dentro de un radio de 5 kilómetros. Fuente: elaboración propia.....	111
Figura 66. Velocidad promedio del viento según estación MACAM entre las 00 y 11 horas, y 12 a 23 horas para el periodo invernal y estival. Fuente: elaboración propia.....	112
Figura 67. Velocidad máxima del viento según estación MACAM entre las 00 y 11 horas, y 12 a 23 horas para el periodo invernal y estival. Fuente: elaboración propia.....	113

Figura 68. Dirección del viento dominante según estación MACAM entre las 00 y 11 horas, y 12 a 23 horas para el periodo invernal y estival. Fuente: elaboración propia.....	113
Figura 69. Regiones definidas según Diagrama de Voronoi a partir de las parcelas peri-urbanas de la RMS. Fuente: Elaboración propia.....	124
Figura 70. Regiones definidas según Diagrama de Voronoi a partir de las parcelas urbanas de la RMS. Fuente: Elaboración propia.	124
Figura 71. Mapa de depositación anual para la RMS de coberturas de bosque denso, bajo criterios de copa completa. Fuente: Elaboración propia.	125
Figura 72. Mapa de depositación anual para la RMS de coberturas de bosque denso, bajo criterios de copa actual. Fuente: Elaboración propia.....	126
Figura 73. Mapa de depositación anual para el sector norte del área urbana de la Región de las áreas verdes densas, bajo criterios de copa completa. Fuente: Elaboración propia.	127
Figura 74. Mapa de depositación anual para el sector sur del área urbana de la Región de las áreas verdes densas, bajo criterios de copa completa. Fuente: Elaboración propia.	128
Figura 75. Mapa de depositación anual para el sector norte del área urbana de la Región de las áreas verdes densas, bajo criterios de copa actual. Fuente: Elaboración propia.	129
Figura 76. Mapa de depositación anual para el sector sur del área urbana de la Región de las áreas verdes densas, bajo criterios de copa actual. Fuente: elaboración propia. Objetivo d) Propuesta de líneas acción primarias y secundarias para incorporar en programas de compensación de emisiones.....	130

Índice de Tablas

Tabla 1. Concentraciones máximas definidas para distintos contaminantes atmosféricos.	14
Tabla 2. Comparación de concentraciones de MP10.	14
Tabla 3. Descripción de las estaciones de monitoreo de calidad del aire de la red MACAM de la RMS.	20
Tabla 4. Normativa de máximas emisiones de MP10 anuales a lo largo de los años.	24
Tabla 5. Depositación de MP10 por tipo de bosque según la clasificación del Catastro de Bosque Nativo de CONAF y CIREN (2013).....	31
Tabla 6. Resumen de estudios relevantes que estiman el rol de la vegetación urbana en la calidad del aire. Cabe destacar que todos estos se basan en estimaciones de depositación seca.	40
Tabla 7. Longitudes de onda para Bandas 4 y 8, del satélite Sentinel de resolución 10 m.....	49

Tabla 8. Ficha área peri-urbana.	50
Tabla 9. Ficha área urbana.	50
Tabla 10. Planilla de muestreo utilizada para registro de mediciones en terreno realizadas en la parcela.	62
Tabla 11. Planilla de muestreo utilizada para registro de mediciones en terreno realizadas en árboles.	62
Tabla 12. Lugares donde se realizaron las parcelas de muestreo en el área peri-urbana de la RMS.	80
Tabla 13. Áreas verdes en las que se realizaron las parcelas de muestreo del área urbana de la RMS.	81
Tabla 14. Distribución de vegetación en el Gran Santiago.	84
Tabla 15. Parques de uso público sobre 50 [ha] en la ciudad de Santiago.	85
Tabla 16. Parcelas Urbanas realizadas según comuna.	89
Tabla 17. Listado de parcelas peri-urbanas según zona de análisis y número de parcelas.	90
Tabla 18. Descripción de estructura y función de las parcelas de muestreo peri-urbanas de la RMS. Datos en parentesis representan la desviacion estandar de la muestra.	94
Tabla 19. Descripción de estructura y función de los individuos de las parcelas de muestreo peri-urbanas de la Región Metropolitana. Datos en parentesis representan la desviacion estandar de la muestra.	95
Tabla 20. Estadísticas descriptivas de parcelas en área urbana. Datos en parentesis representan la desviacion estandar de la muestra.	99
Tabla 21. Estadísticas descriptivas de individuos en parcelas de área urbana. Datos en parentesis representan la desviacion estandar de la muestra.	100
Tabla 22. Estadísticas descriptivas relativas al Largo de la temporada productiva para cada zona de análisis.	114
Tabla 23. Promedio y desviación estándar (en paréntesis) para la depositación por zona utilizando concentración de MP10 media y máxima para árboles en condiciones de copa actual. Datos en parentesis representan la desviacion estandar de la muestra.	115
Tabla 24. Promedio y desviación estándar (en paréntesis) para la depositación por zona utilizando concentración de MP10 media y máxima para árboles en condiciones de copa completa. Datos en parentesis representan la desviacion estandar de la muestra.	116

Tabla 25. Promedio y desviación estándar (en paréntesis) para la depositación por especie utilizando concentración de MP10 media y máxima para árboles en condiciones de copa actual. Datos en parentesis representan la desviacion estandar de la muestra.	117
Tabla 26. Promedio y desviación estándar (en paréntesis) para la depositación por especie utilizando concentración de MP10 media y máxima para árboles en condiciones de copa completa.	120
Tabla 27. Promedio y desviación estándar (en paréntesis) para la depositación por zona utilizando concentración de MP10 media y máxima para árboles en condiciones de copa actual.	122
Tabla 28. Promedio y desviación estándar (en paréntesis) para la depositación por zona utilizando concentración de MP10 media y máxima para árboles en condiciones de copa completa.	123
Tabla 29. Factor de compensación por masas vegetacionales y áreas verdes para compensar 1 [T] de MP10 emitido.	131
Tabla 30. Factor de compensación para compensar 1 [T] de MP10 emitido promediando valores obtenidos en situación de Concentración máxima y media de MP10.	131
Tabla 31. Factor de compensación para compensar 1 [T] de MP10 emitido promediando valores obtenidos en situación de Concentración máxima de MP10 en el área urbana.	132
Tabla 32. Resumen de líneas de acciones primarias y secundarias propuestas que pueden ser aplicadas en las áreas prioritarias de PCE identificadas para el área urbana.	136
Tabla 33. Resumen de líneas de acciones primarias y secundarias propuestas que pueden ser aplicadas en las áreas prioritarias de PCE identificadas para el área peri-urbana.	137
Tabla 34. Escala de prioridad de implementación para gestión de líneas de acción.	150
Tabla 35. Propuesta de gestión de líneas de acción según prioridad de implementación.	151
Tabla 36. Número de acciones mínimas exigidas según prioridad de implementación.	153

1 Resumen Ejecutivo

Se contextualiza la legislación referente a la calidad del aire de la Región Metropolitana de Santiago (RMS), siendo esta reflejada en Plan de Prevención y Descontaminación Atmosférica (PPDA) vigente, establecido en el Decreto Supremo N° 31 del año 2016, del Ministerio del Medio Ambiente. Destacando en este Decreto Supremo el Capítulo IX, cuyos artículos detallan medidas de compensación por medio de la creación y mantención de áreas verdes y masas de vegetación. En este contexto, surge la presente licitación cuyo objetivo es determinar un factor de hectáreas a compensar en áreas verdes y masas de vegetación por emisiones de MP10 [T/año] –por Resuspensión–.

Para dar un acabado entendimiento a lo anterior, se realizó revisión bibliográfica enfocada en el rol de la vegetación en y cercana a las ciudades en la captura de contaminantes del aire, principalmente para MP10, entendiendo el mecanismo de depositación y las condiciones de las masas vegetacionales.

Para realizar la estimación de la depositación de MP10 desde la vegetación de la RMS, se realizó una descripción desde bibliografía a modo de caracterizar la vegetación de la RMS para áreas urbanas como peri-urbanas.

Se realizó revisión de modelos utilizados en trabajos tanto nacionales como internacionales, que estiman la cantidad de MP10 que podrían captar las distintas masas de vegetación, los que son alimentados con los datos obtenidos desde mediciones en terreno.

Se realizó un levantamiento de datos desde terreno en 77 parcelas de muestreo tanto en vegetación de áreas urbanas como peri-urbanas de la RMS, caracterizando el arbolado de las áreas medidas. Las parcelas fueron agrupadas en 5 zonas de análisis, que son Andes, Costa, Noreste, Sur y zona Urbana.

A partir del análisis y procesamiento de la información de terreno, se obtuvieron los datos de índice de área foliar, área de copa (m^2) y el porcentaje de copa completa, que serán utilizados para calcular la depositación de MP10 por la vegetación en las ecuaciones del modelo I-Tree.

Se realizó un análisis de tendencias en cuanto a las concentraciones de MP10 en la Región Metropolitana de Santiago con datos obtenidos desde la Red de Monitoreo Automático de Calidad del Aire y Meteorología (MACAM) del departamento de redes de monitoreo de la división de la calidad de aire. Se observaron peaks de máximas concentraciones durante los meses de junio, julio y agosto, y mínimas entre diciembre, enero y febrero. A nivel de día, se observó que el peak se genera entre las 6 y 11 horas.

Dada la situación actual de pandemia, no se pudo llevar a cabo la campaña de invierno planificada para el mes de junio para monitorear el índice de área foliar durante esta temporada. Estos datos fueron estimados mediante un análisis de fenología obteniendo los valores del Largo de la temporada productiva, para obtener el número de días en que los árboles caducos mantienen sus hojas durante el año, y por tanto realizan depositación de MP10.

De los resultados de depositación por árbol, se observó que los árboles del área urbana, son los que más depositan [T/año/árbol], debido a que se mantienen en mejores condiciones de copa que los árboles peri-urbanos; dado por las buenas condiciones de sitio que poseen, principalmente riegos regulares. El valor de depositación por hectárea [T/año/ha] presenta los mayores valores en la zona costa y sur, en que se presentan mayores densidades de bosque.

Por último, la propuesta de factor de compensación es de 3,1 [Ha] para áreas peri-urbanas y de 1,4 [Ha] para áreas urbanas. En la propuesta de líneas de acción gestionables para PCE se identificaron las áreas prioritarias para Proyectos de Compensación de Emisiones (PCE) y se describieron líneas de acción primarias y secundarias, tanto para área urbana, como para peri-urbana, incluyendo información relativa al aporte de cada una de estas en el aumento de la biomasa foliar para contribuir a la depositación de MP10. En lo que respecta a la gestión de las líneas de acción, se propuso clasificarlas según prioridad de implementación para facilitar labores de la SEREMI-MA RMS al aplicarlas en Programas de PCE.

2 Introducción

Uno de los evidentes efectos del fenómeno de urbanización que ocurre a nivel global es la disminución de la calidad del aire, lo que se ha convertido en una fuente de riesgo a la salud de las personas mermando la calidad de vida en las ciudades (Cakmak et al., 2007). De acuerdo a la Organización Mundial de la Salud la contaminación atmosférica es responsable del 23% de las muertes a nivel mundial, asociadas a muertes prematuras, accidentes cerebrovasculares, enfermedades pulmonares y cáncer al pulmón (WHO, 2018). De acuerdo a una revisión de investigaciones relacionadas a calidad del aire realizado por Kurt et al. (2016) se encontró que las partículas contaminantes que presentan mayor incidencia en la salud cardio-pulmonar de las personas corresponden al ozono y el material particulado (en adelante MP).

La alta concentración de contaminantes atmosféricos se ha visto relacionado a un aumento en los ingresos a centros de salud tanto en Chile como en otros países, muchas causadas por la presencia de MP en las vías respiratorias (Cakmak et al., 2007). Esto provoca enfermedades respiratorias tales como infecciones respiratorias, bronquitis aguda y crónica, asma; y cardiovasculares, como infartos y ataques al corazón (Garcia-Chevesich et al., 2014; Toro et al., 2015; Escobedo y Nowak, 2009; Ruckerl et al., 2011; Zelikoff et al., 2003; Zha et al., 2018). Es así como para Chile, el Cuarto Reporte del Estado del Medio Ambiente (2018), del Ministerio del Medio Ambiente, detalla la existencia de 90.000 casos de bronquitis aguda asociadas a la exposición de MP, así como 3.500 casos de enfermedades cardiopulmonares y 1500 cardiovascular.

Específicamente para la Región Metropolitana de Santiago (en adelante RMS), Ostro et al. (1996) identificaron que un aumento de 10 [microgramos/m³] en el MP10 diario se relacionaba a un aumento del 1 % en la mortalidad. Prieto et al. (2007) estudiaron la incidencia de enfermedades respiratorias derivadas de la concentración de contaminantes en el aire en la comuna de Cerro Navia (Santiago, Chile) detectando un 27% más de incidencia en enfermedades pulmonares en niños y cerca de un 17% para adultos mayores. Scapini et al. (2018), encontraron una relación entre la deficiente calidad del aire y un aumento en las visitas a urgencias por infecciones respiratorias agudas, influenza, neumonía, bronquitis y crisis

bronquial obstructiva en la ciudad de Santiago, lo cual variaba de acuerdo a la estación del año y el tipo de enfermedad.

En vista de lo anterior, muchas ciudades del mundo están desarrollando e implementando estrategias para mejorar la calidad del aire, mediante el uso de vegetación en áreas urbanas. Estas estrategias, a su vez, ofrecen otras soluciones a diversos problemas urbanos asociados a cambio climático e inequidades ambientales (Douglas, 2010).

Algunos autores como Nowak et al. (2006; MP y otros gases), Dobbs et al. (2011; MP y otros gases), Escobedo et al. (2011, MP y otros gases), Zha et al. (2018; MP) y Weber (2013; MP), han estudiado la capacidad del arbolado urbano de remover contaminación atmosférica, reducir temperaturas extremas, proveer hábitat para un gran número de especies de fauna urbana, proveer espacios de recreación. Los autores resaltan el rol del arbolado dentro y alrededor de la ciudad para mejorar la calidad de vida de sus habitantes, promoviendo ciudades más sustentables y resilientes. De esta forma, se entiende que la vegetación se conforma como un elemento urbano que tiene un rol no solo estético, sino también un rol socio-ecológico al entregar servicios ecosistémicos que mejoran el bienestar de sus habitantes y que aportan a la conservación de la biodiversidad en ciudades.

Específicamente para calidad de aire, la depositación del MP10 por medio de la vegetación, está determinada, por una parte, factores espaciales relativas a la ubicación y tamaño de las áreas verdes (Escobedo y Nowak, 2009; Vos et al., 2013; Elmqvist et al. 2015), y por otra, a factores de composición relativos a las especies y a la diversidad de edades de la vegetación que conforma la cobertura arbórea (Qiu et al., 2018). Teniendo en cuenta que a mayor variedad de especies vegetales y edades de estas dentro del área verde, mayor será la complejidad de la masa arbórea en cuanto a alturas, diámetro de las copas, tipos y densidades del follaje (características de hojas), y la distribución espacial de los árboles en el entorno, todo lo cual potencia la capacidad de depositación de MP10 por la vegetación (Grote et al., 2016; Qin et al., 2019; Chen et al., 2016). Esto cuando se compara con un área verde con las mismas especies, pero con una distribución lineal y homogénea en edades.

De lo anterior, surge la interrogante de cuál es la capacidad del arbolado urbano y peri-urbano de la RMS para proveer el servicio de purificación del aire (depositación de MP10) y qué especies vegetales son las más eficientes en cumplir este objetivo. Gran parte de esta evaluación incluye comprender la cantidad, calidad y distribución de la vegetación urbana en la Región Metropolitana de Santiago y cómo ésta, se relaciona a la presencia y concentración del MP10.

3 Objetivos

El objetivo general de esta Licitación, es la elaboración de un estudio para determinar el factor de hectáreas a compensar equivalente a una tonelada de emisión de Material Particulado - MP10 por Resuspensión- en Áreas Verdes y Masas de Vegetación, con el fin de desarrollar Programas de Compensación de Emisiones (PCE) en creación y/o mantención en áreas verdes y masas de vegetación en la RMS.

3.1 Objetivo específico a)

Definir áreas de muestreo para arbolado en función de la distribución espacial de la calidad del aire –MP10 por Resuspensión - de la Región Metropolitana de Santiago.

3.2 Objetivo específico b)

Caracterización del arbolado en las áreas de muestreo definidas de la Región Metropolitana de Santiago (RMS). Desde los datos obtenidos de la campaña de terreno se actualiza la caracterización de la vegetación urbana y peri-urbana de la RMS. Además, se actualizan las fichas de caracterización de la vegetación de la RMS con los datos obtenidos desde terreno.

3.3 Objetivo específico c)

Monitorear y cuantificar el aporte del arbolado, para la captación y remoción de material particulado - MP10 por Resuspensión- de la RMS. Para el cumplimiento de este objetivo, se aborda la realización de la campaña de terreno de verano, el análisis de la concentración de MP10 y la velocidad del viento que acontece en la Región y a partir de lo anterior, la estimación de la depositación de MP10 de los árboles medidos en terreno.

Propuesta de líneas de acción gestionable para el desarrollo de PCE en áreas verdes y masas de vegetación para dar cumplimiento al objetivo d).

Para dar cumplimiento de este objetivo se entregan líneas de acción a ser aplicadas para potenciar la depositación de MP10 por parte de las masas vegetacionales y/o arbolado urbano, entregando antecedentes que justifican su aplicación al incrementar la biomasa de los árboles.

3.4 Objetivo específico d)

Proponer un factor de compensación que establezca una superficie y líneas de acción para emisiones de Material Particulado -MP10 por Resuspensión-, con el fin de contribuir a la gestión en la mantención y creación de áreas verdes y masas vegetación en la RMS.

Propuesta de publicación en formato digital que pueda ser utilizada como medio de difusión del estudio.

3.5 Objetivo específico e)

Exposición de los resultados de la consultoría ante la comunidad local interesada y/o técnicos.

4 Marco Teórico

4.1 Contaminación atmosférica en ciudades

La contaminación del aire es uno de los problemas más comunes en las ciudades de tamaño mediano (de 500 mil a 1,5 millón de habitantes) y grande (más de 1,5 millones de habitantes) a nivel mundial (OECD, 2019). La Organización Mundial de la Salud (WHO, 2018) reconoce a 4 contaminantes como los más incidentes en la salud de las personas: MP10, MP2,5, O₃ y NO₂. El MP10 lleva su nombre de acuerdo a su diámetro aerodinámico que determina la intensidad de sus impactos en la salud. Es así como el MP10 se refiere a partículas de diámetros inferiores o iguales a 10 micrones. De esta forma, en el MP10 se pueden distinguir dos fracciones, la fracción gruesa, es decir partículas de tamaño entre 2,5 y 10 micrones de diámetro aerodinámico y la fracción fina, aquella menor o igual a 2,5 micrones de diámetro aerodinámico.

Los estándares de concentraciones definidos por la WHO para los contaminantes mencionados se encuentran en Tabla 1.

Tabla 1. Concentraciones máximas definidas para distintos contaminantes atmosféricos.

Contaminante	Norma de la WHO	Normativa Chilena D.S 59/1998 MINSEGPRES
MP10 (24 horas)	50 [µg/m ³]	150 [µg/m ³]
MP10 (anual)	20 [µg/m ³]	50 [µg/m ³]

Fuente: Elaboración propia según WHO (2018) y D.S N° 59/1998.

Países como China e India presentan altos niveles de contaminación atmosférica, por sobre los estándares internacionales (Tabla 2) derivada de su actividad productiva (Yang et al., 2018) Europa, por otra parte, ha logrado mejorar lentamente la calidad del aire de sus ciudades, sin embargo, entre un 20% y un 44% de las ciudades de la Unión Europea están expuestas a concentraciones de MP10 que exceden el límite diario de calidad del aire, 50 [µg/m³] (Guerreiro et al., 2014). Esto implica que la contaminación atmosférica sigue siendo la fuente más grande de riesgo ambiental para el continente (Annesi-Maesano, 2017). Por otra parte, Estados Unidos, país que presenta una amplia y estricta regulación sobre la calidad del aire, ha logrado, hoy en día, que la gran mayoría de sus ciudades cumplan con los estándares establecidos por la WHO (Yang et al., 2018) (Tabla 2).

Tabla 2. Comparación de concentraciones de MP10.

Media Diaria	2015				Normativa WHO ³
	RMS ²	China ¹	India ¹	EEUU ¹	
MP10 [µg/m ³]	219	81,85	99,83	19,28	50 [µg/m ³] (media diaria)

Fuente: Elaboración propia según ¹Yang et al., 2018, ²Ministerio del Medio Ambiente, 2016 y WHO, 2018.

En lo que respecta a las ciudades latinoamericanas y del Caribe, de 104 ciudades analizadas por Riojas-Rodríguez et al. (2016), sólo una, Salvador de Bahía, Brasil, cumplía el año 2015 con los estándares de la WHO para MP10 de 20 [$\mu\text{g}/\text{m}^3$] anuales, mientras que San José de Costa Rica y Montevideo se encuentran a menos de 10 [$\mu\text{g}/\text{m}^3$] sobre la norma del WHO. Esto contrasta drásticamente con los valores de la RMS para el mismo año, donde la concentración anual de MP10 era de 83 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (Ministerio del Medio Ambiente, 2016), un 415% por sobre la norma definida por la WHO.

4.1.1 Efectos de la contaminación atmosférica en la salud de las personas

El Material particulado (MP) en general está compuesto por partículas de diferentes orígenes, siendo aquellas partículas derivadas de reacciones de combustión las más abundantes, y que además son capaces de trasladar altas concentraciones de otros contaminantes (Sioutas et al., 2005); El material particulado se clasifica de acuerdo a su tamaño de diámetro de partículas.

El MP10 corresponde a un contaminante atmosférico cuyas partículas son de un tamaño menor a 10 micrones las que dado su pequeño tamaño, pueden ingresar al sistema respiratorio de las personas hasta penetrar el pulmón y eventualmente llegar al sistema circulatorio provocando graves enfermedades (Dominici et al., 2006). El MP2,5 corresponde a un contaminante cuyo diámetro es menor a 2,5 micrones, este último se encuentra contenido en el MP10 y presenta aún mayores riesgos a la salud de las personas dada su facilidad para ingresar por las vías respiratorias. La Figura 1 ilustra la dimensión del MP10 y MP2,5 en relación a elementos cotidianos.

Se debe mencionar que el MP10 por resuspensión es el resultado de partículas de polvo que no caen por gravedad al suelo, si no que quedan suspendidos en el aire, estas partículas provienen desde fuentes naturales tales como la erosión, las erupciones volcánicas, la descomposición de la vegetación y tormentas de polvo (MMA, 2016). La fracción fina MP2,5 es aún más pequeña que el MP10 y se deriva directamente de procesos de combustión presentes en quema de leña para calefacción, combustión en chimeneas industriales y desde vehículos entre varios.

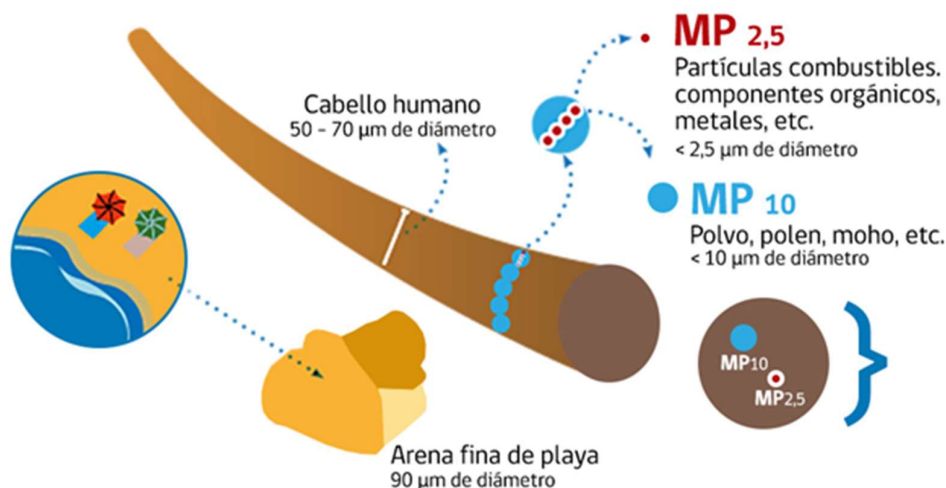


Figura 1. Comparación del tamaño MP10 y MP2,5 en relación a un grano de arena y un cabello humano. Fuente: <http://airechile.mma.gob.cl/faq>

La exposición a MP10 produce diversos efectos en la salud, tanto a nivel pulmonar como cardiovascular, los cuales dependen del tipo de partícula y su concentración, así como al tiempo y nivel de exposición (Pope y Dockery, 2006). En lo que respecta a la mortalidad y morbilidad asociada a la exposición a MP10 en Chile, el Cuarto Reporte del Estado del Medio Ambiente (2018) del Ministerio del Medio Ambiente plantea que en el 2017 hubo alrededor de 3.500 casos de mortalidad prematura asociada a enfermedades cardiovasculares, siendo estos casos superados en número únicamente por cuadros de bronquitis aguda. De estos últimos, existe un registro de 90.000 casos. La Figura 2 muestra cómo ingresa el MP10 al organismo de una persona y cuáles son los efectos que este ocasiona para la salud.

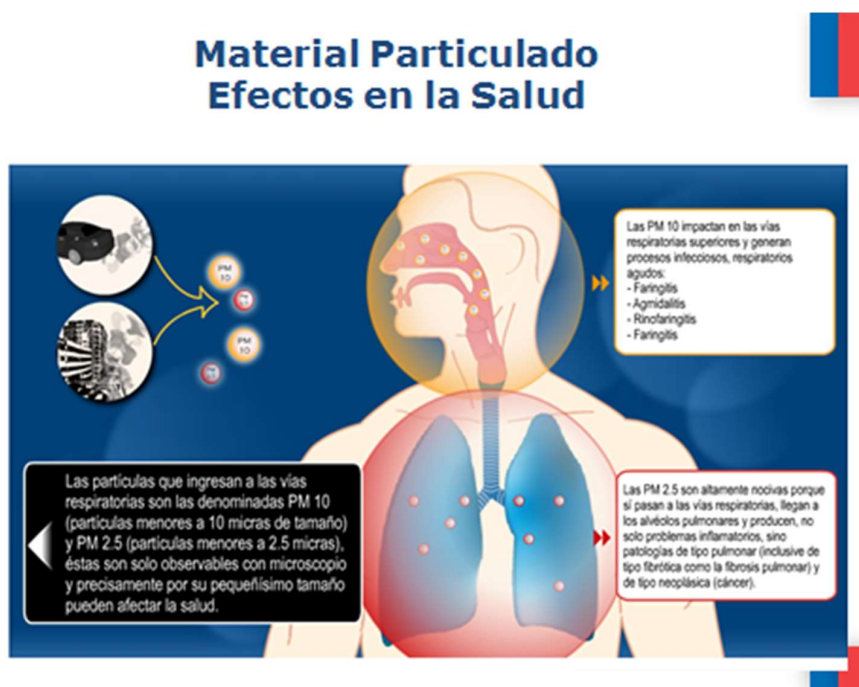


Figura 2. Ingreso de MP10 al sistema respiratorio. Fuente: SEREMI Medio Ambiente RMS (2013).

El trabajo de Díaz-Robles et al. (2015) realizado en Chile, concluyó que existe una directa relación entre la exposición a MP y la probabilidad de desarrollar cáncer al pulmón y enfermedades cardiovasculares. Otros autores, como Nitta et al. (2010), determinaron que la diaria exposición de niños y ancianos al MP10, cataliza enfermedades respiratorias crónicas como el asma. García-Chevesich et al. (2014) estimaron que alrededor de 20.000 personas sufren enfermedades respiratorias debido a la baja calidad del aire en Santiago, ocasionando más de 700 muertes durante la temporada de invierno.

4.1.2 Contaminación atmosférica en la Región Metropolitana de Santiago

En lo que refiere a la situación chilena, un gran número de ciudades chilenas exceden los estándares de la WHO respecto a las concentraciones tanto diarias como anuales de MP10

(Toro et al., 2015). Lo mismo ocurre frente a la normativa chilena, comunas como Coyhaique, Santiago, Osorno, Padre Las Casas, superan las concentraciones definidas por la Norma de Calidad Primaria para Material Particulado Respirable MP10 D.S. N°20/2015 (Figura 3).

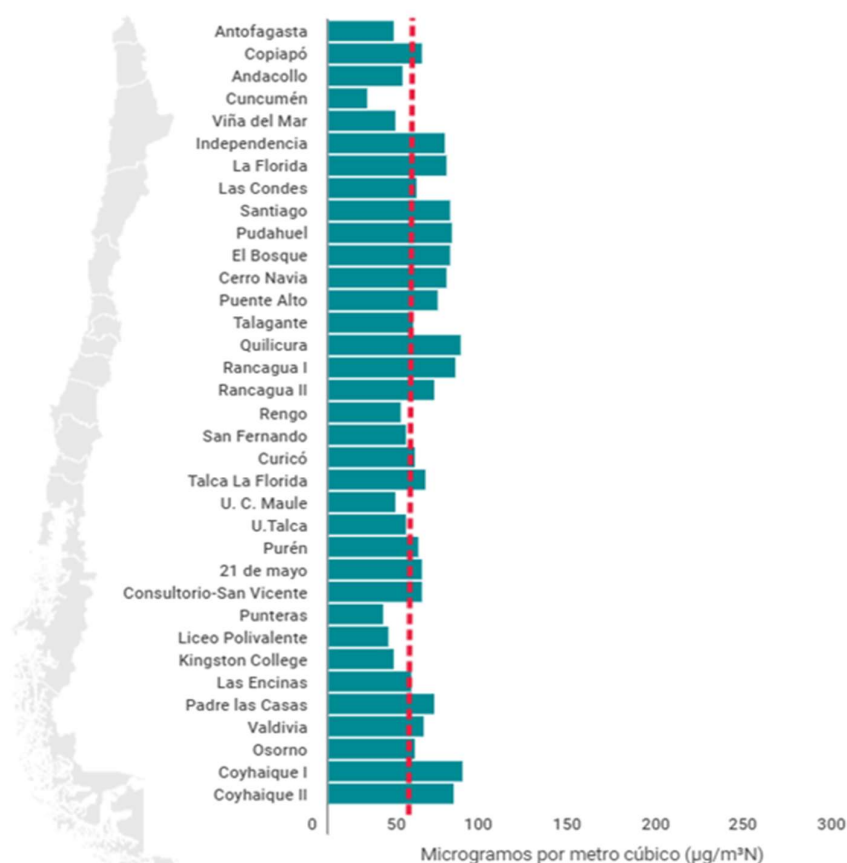


Figura 3. Promedio trienal de concentraciones de MP grueso (MP10) en estaciones de monitoreo del país, 2017. Fuente: Cuarto Reporte del Estado del Medio Ambiente, 2018.

La depositación del MP10 depende no sólo del diámetro y forma de las partículas contaminantes, sino que también de factores ambientales como la humedad, velocidad del viento, temperatura y turbulencia, lo que tiene incidencia directa sobre la velocidad y la cantidad MP10 en circulación (Nguyen et al., 2015). Las condiciones geográficas de la RMS, en cuanto a su ubicación en valles interiores de la zona central, favorecen una precaria ventilación de la cuenca (García-Chevesich et al., 2014), reflejándose esto en una presencia de concentraciones de MP10 mayores a las establecidas en el D.S. N°59/1998.

Como se muestra en la Figura 4, las principales fuentes de contaminación en la RMS corresponden a combustión de leña residencial y en menor medida al parque automotriz de la ciudad. Esta situación se repite en la mayoría de las ciudades del país, siendo la combustión de leña la principal fuente de contaminantes, especialmente desde la Quinta Región hacia el sur. En la zona norte la contaminación es asociada a las centrales termoeléctricas teniendo mayor incidencia en la calidad del aire.

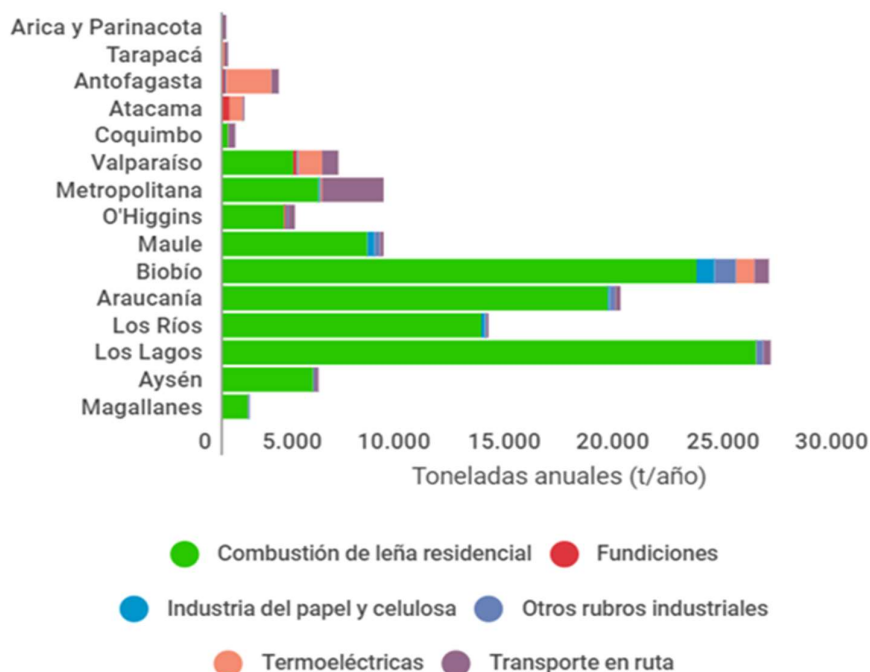


Figura 4. Fuentes de MP de diámetros menores a 2,5 [nm] por región del país. Fuente: Cuarto Reporte del Estado del Medio Ambiente, 2018.

La RMS presenta eventos de concentraciones de MP10 sobre la norma, siendo críticos en los periodos de otoño-invierno (Egas et al., 2018; Muñoz et al., 2017). Estos episodios de contaminación se relacionan con la baja ventilación de la ciudad, asociada a su ubicación geográfica al encontrarse rodeada de cadenas montañosas como lo son la cordillera de Los Andes y la de La Costa (Muñoz et al., 2017). La baja ventilación de la cuenca se relaciona con una inversión térmica superficial que impide la depositación de contaminantes, promoviendo la baja calidad del aire y el escaso movimiento de masa de aire (D.S. N°31/2016).

Si se analiza en detalle la calidad del aire del gran Santiago, se puede apreciar ciertos patrones a escala espacial y socioeconómica. Fernández y Wu (2018), realizaron un análisis multivariable del Santiago Metropolitano de la contaminación del aire mostrando cómo la contaminación ambiental se concentra en el cuadrante sur-oeste del Gran Santiago (Figura 5). Esto coincide con los sectores desprovistos de vegetación y de menores recursos, mientras que las áreas con mejor calidad del aire corresponden a al cuadrante noreste que presenta mayor cobertura vegetal y mayores ingresos económicos (Figura 5).

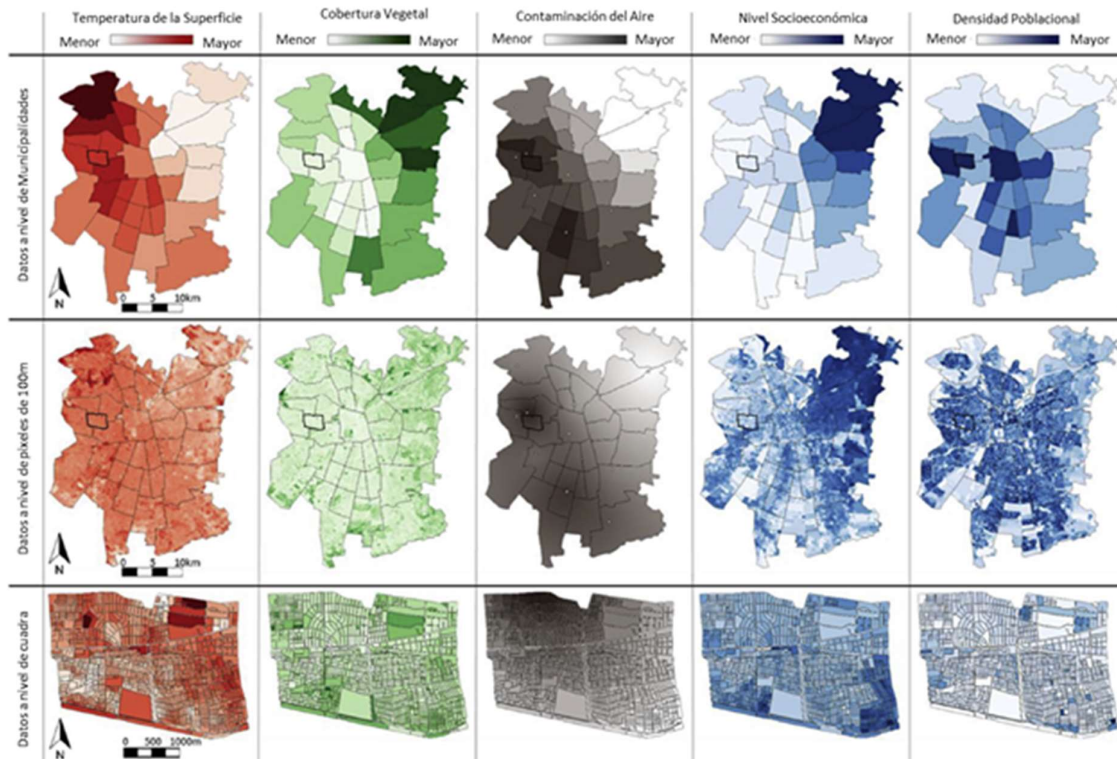


Figura 5. Representación espacial de indicadores urbanos en el Gran Santiago. Fuente: Fernández y Wu, 2018.

Actualmente la RMS cuenta con 11 estaciones operativas de monitoreo de calidad del aire, denominada Red de Monitoreo Automático de Calidad del Aire y Meteorología (en adelante Red MACAM) (Figura 6 y Tabla 3). 10 estaciones de monitoreo se encuentran dentro del Gran Santiago, siendo la estación de Talagante la única estación fuera del área metropolitana. Estas estaciones miden diversos contaminantes criterios, como MP10, MP2,5, SO₂, NO₂, O₃, CO, entre otros.

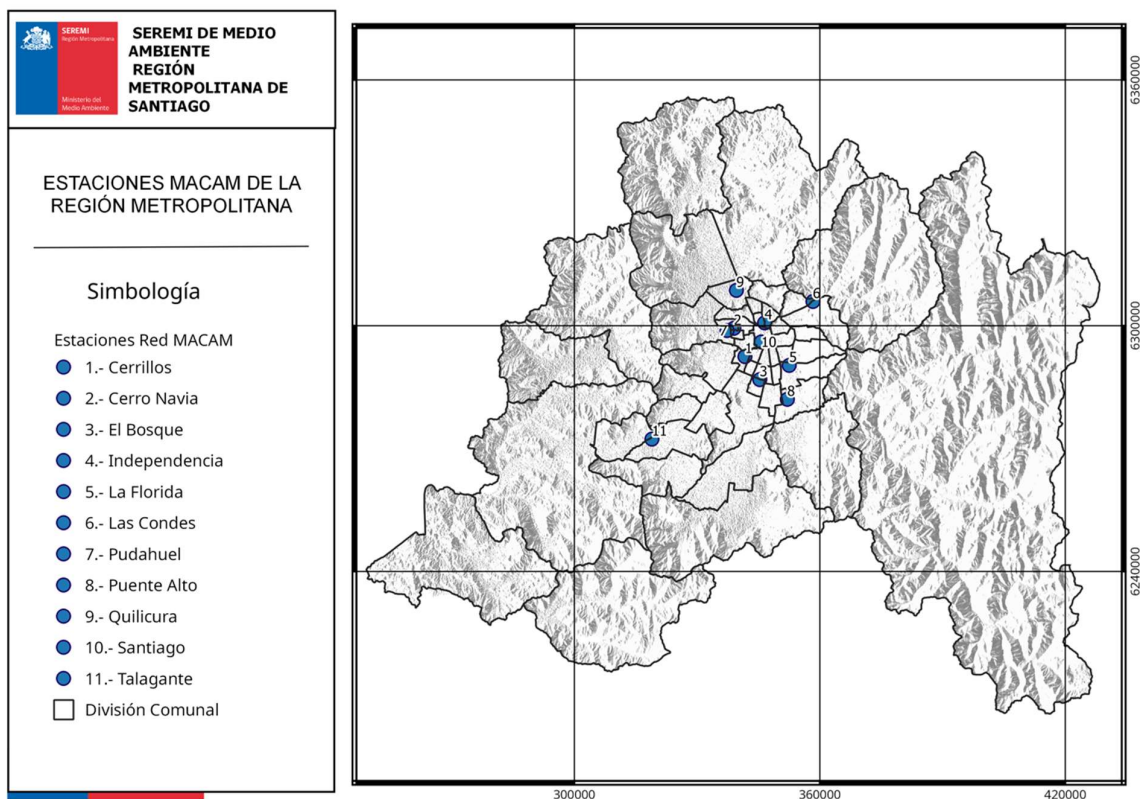


Figura 6. Ubicación de las estaciones de la red MACAM en la RMS. Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3. Descripción de las estaciones de monitoreo de calidad del aire de la red MACAM de la RMS.

	Estación	Inicio de monitoreo de MP10	Fin de monitoreo de MP10	Medición de MP10 [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	Técnica de Medición
1	Cerrillos	Sin Datos	Sin Datos	No	-
2	Cerrillos I	1.04.1997	11.01.2017	Si	Microbalanza de elemento oscilante TEOM-Thermo 1400AB
3	Cerro Navia	27.03.2001	Actual	Si	Atenuación BETA-MET ONE 1020
4	El Bosque	05.04.1997	Actual	Si	Atenuación BETA-MET ONE 1020
5	Independencia	02.04.1997	Actual	Si	Atenuación BETA-MET ONE 1020
6	La Florida	28.05.1997	Actual	Si	Atenuación BETA-MET ONE 1020

	Estación	Inicio de monitoreo de MP10	Fin de monitoreo de MP10	Medición de MP10 [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	Técnica de Medición
7	Las Condes	24.04.1997	Actual	Si	Atenuación BETA-MET ONE 1020
8	Pudahuel	04.04.1997	Actual	Si	Atenuación BETA-MET ONE 1020
9	Puente Alto	21.05.2008	Actual	Si	Atenuación BETA-MET ONE 1020
10	Quilicura	05.02.2016	Actual	Si	Atenuación BETA-MET ONE 1020
11	Quilicura I	19.05.2008	23.05.2016	Si	Microbalanza de elemento oscilante TEOM-Thermo 1400AB
12	Parque O'Higgins	02.04.1997	Actual	Si	Atenuación BETA-MET ONE 1020
13	Talagante	Sin Datos	Sin Datos	No	-

Fuente: Elaboración propia a partir de datos desde Red MACAM.

En cuanto a las concentraciones de MP10 registradas por la Red MACAM¹ durante el periodo de otoño e invierno de 2016², se constató que el sector poniente de la capital presenta adversas condiciones de calidad de aire en relación a las concentraciones de MP10 (Figura 7). Resultados que son coincidentes con las evaluaciones realizadas por Fernández y Wu (2018).

¹ No se consideraron datos de la Estación de Talagante al no encontrarse registros en línea de las concentraciones de MP10.

² Se emplearon datos de 2016 y no actuales, ya que la estación de Cerrillos presentaba datos hasta mediados de 2017 únicamente.

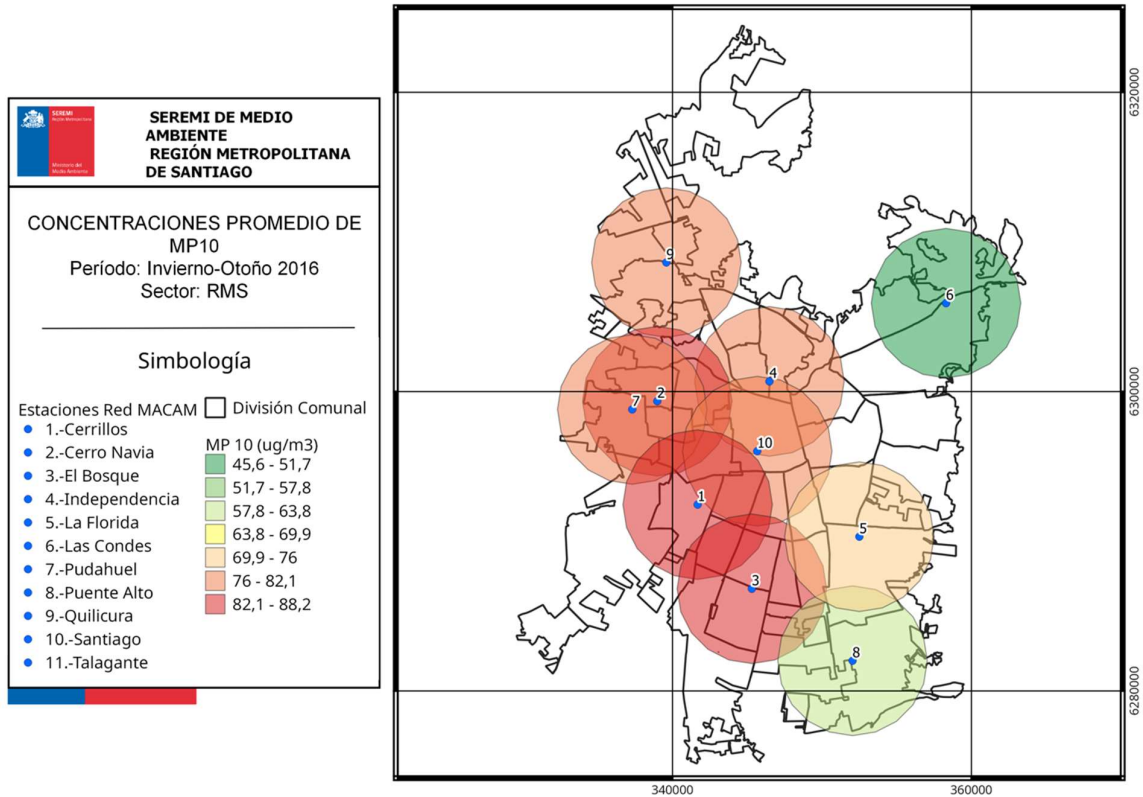


Figura 7. Concentración de MP10 para los meses de otoño-invierno del año 2016 para graficar el área de presencia de dicha concentración en un radio de 5[km]. Fuente: Elaboración propia.

4.1.3 Legislación de la calidad del aire en la Región Metropolitana de Santiago

La Región Metropolitana de Santiago fue declarada zona saturada por Material Particulado Respirable (MP10), Ozono Troposférico (O₃) y Monóxido de Carbono (CO); y zona latente por Dióxido de Nitrógeno (NO₂), mediante el Decreto Supremo N°131, de 1996, del Ministerio Secretaría General de la Presidencia (MINSEGPRES). Una vez declarada como zona saturada y latente la Región Metropolitana de Santiago y según lo dispuesto en la ley N° 19.300, sobre Bases Generales del Medio Ambiente, y el Decreto Supremo N° 94, de 1995, de MINSEGPRES, se dictó el primer Plan de Prevención y Descontaminación Atmosférica (en adelante PPDA) para la Región Metropolitana de Santiago, el cual fue aprobado por el Decreto Supremo N°16, de 1998, de MINSEGPRES.

Este instrumento de gestión ambiental tiene como objetivo lograr el cumplimiento de normas primarias de calidad del aire, con el fin de proteger la salud de los habitantes de la región. El PPDA fue actualizado, por primera vez mediante el Decreto Supremo N°58, de 2003 y posteriormente, fue reformulado mediante el Decreto Supremo N°66, de 2009, ambos del MINSEGPRES. Finalmente, la última actualización se formuló mediante el Decreto Supremo N° 31, de 2016, del Ministerio del Medio Ambiente (en adelante MMA).

Con el fin contribuir a la reducción de la contaminación atmosférica en la RMS el actual PPDA (D.S. N°31/2016 del MMA) establece en los siguientes artículos:

-Artículo 63, señala que *“La compensación de emisiones para la Región Metropolitana de Santiago se hará por medio de programas de compensación de emisiones aprobados por la SEREMI del Medio Ambiente y fiscalizados por la Superintendencia del Medio Ambiente”*.

-Artículo 64, *“Todos aquellos proyectos y actividades que ingresan al SEIA, deberán cumplir las siguientes condiciones:*

“Deberán compensar sus emisiones totales anuales, directas e indirectas, aquellos proyectos o actividades nuevas y las modificaciones de los proyectos existentes, que en cualquiera de sus etapas generen un aumento sobre la situación base, en valores iguales o superiores a 2,5 (T/año) para el caso del contaminante MP10”.

-Artículo 99, *“El Gobierno Regional Metropolitano de Santiago continuará con la meta de aumentar la dotación de áreas verdes, construcción de parques, plazas y masas de vegetación que rodean la Cuenca de Santiago de la Región Metropolitana de Santiago, en 100 nuevas hectáreas, procurando obtener la aprobación de recursos del Fondo Nacional de Desarrollo Regional (FNDR) u otras fuentes de financiamiento. Para ello, se priorizarán los siguientes tipos de programas:*

a) Programa para la gestión de áreas verdes. Se procurará la habilitación prioritaria de áreas verdes y espacios públicos en aquellas comunas más deficitarias en este tipo de áreas y espacios, según las definiciones señaladas en el Artículo 1.1.2 del D.S. N°47, de 1992, del Ministerio de Vivienda y Urbanismo, que fija Nuevo texto de la Ordenanza General de Urbanismo y Construcciones. Se entenderá por “comunas más deficitarias” aquellas comunas emplazadas en la Región Metropolitana de Santiago y que sean definidas como tales por la SEREMI de Vivienda y Urbanismo RM.

b) Programa para la gestión de masas de vegetación que rodean la Cuenca de Santiago. Con la finalidad de favorecer la circulación de los vientos en la cuenca de Santiago, se promoverá la mantención y reforestación de las masas de vegetación que rodean la cuenca de Santiago, y de los corredores verdes, los que adicionalmente contribuirán a la conectividad ecológica entre los diferentes ecosistemas presentes en la región. Se entenderá por “corredores verdes” el cordón de vegetación continuo que ayuda a restablecer la estabilidad dinámica de los ecosistemas naturales, asegurando la conservación de los componentes y servicios ambientales entre las masas de vegetación que rodea la cuenca de Santiago.”

-Artículo 100, establece que *“La SEREMI del Medio Ambiente apoyará el aumento de las áreas verdes mediante la exigencia de compensación de emisión de material particulado según lo estipulado en el artículo 63, mediante la mantención y generación de áreas verdes y masas de vegetación”*.

En la Tabla 4 se resume la evolución de normativas relativas al MP10 para la RMS.

Tabla 4. Normativa de máximas emisiones de MP10 anuales a lo largo de los años.

Contaminante	Normativa			
	D.S. N°16/1998	D.S. N°58/2004	D.S. N°66/2009	D.S. N°31/2016
Emisiones máximas				
MP10 [T/año]	No define	10	2,5	2,5

Fuente: Elaboración propia, adaptado de D.S. N°16/1998, D.S. N°58/2004, D.S. N°66/2009 y D.S. N°31/2016.

4.2 Arbolado urbano

De acuerdo a la Organización de Alimentación y Agricultura de las Naciones Unidas (FAO), el arbolado urbano es el sistema de bosques, grupos de árboles y árboles individuales ubicados en calles, parques, jardines y terrenos baldíos de áreas urbanas y peri-urbanas³ (Salbitano et al., 2016). También puede estar presente en áreas con presencia de cuerpos de agua como humedales y pertenecer a la vegetación aledaña a cursos de agua.

El arbolado urbano se configura como el componente estructural de la vegetación en ciudades, que permite una transición entre ambientes urbanos y rurales. Se presenta como uno de los componentes naturales más comunes de las áreas dentro y alrededor de las ciudades, que entregan diversos servicios ecosistémicos en favor al bienestar de la sociedad (Dobbs et al., 2011; Escobedo et al., 2011; Pataki et al., 2011).

En cuanto a esto último, los bosques y árboles presentes en los paisajes urbanos son los principales proveedores de servicios ecosistémicos dentro de los cuales se puede mencionar la mitigación al cambio climático, remoción de contaminantes del aire, la recreación y la mantención de buena salud física y mental, aportando a mantener y mejorar el bienestar humano de los habitantes de las ciudades (Cilliers et al., 2012; Dobbs et al., 2011; De Groot et al., 2010; Dobbs et al., 2018). En la Figura 8, se muestran ejemplos de servicios ecosistémicos entregados por el arbolado urbano hacia las personas que viven en las ciudades.

³ Se entiende por área peri-urbana la superficie después del límite de crecimiento urbano definido en el Plan Regulador Metropolitano.

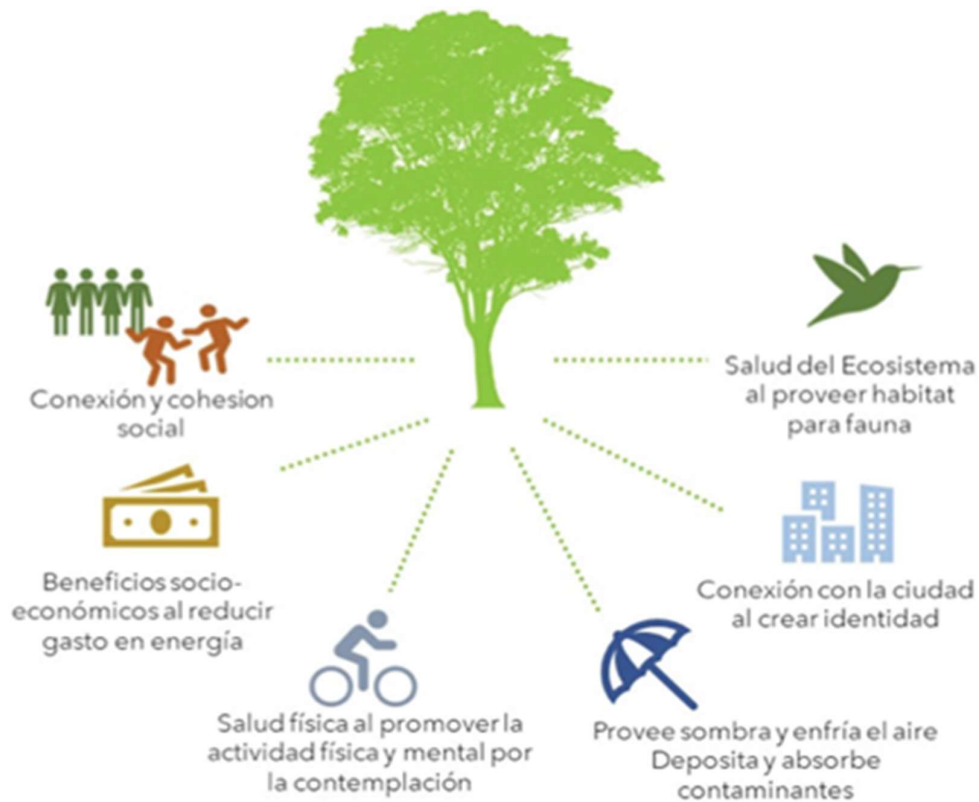


Figura 8. Servicios ecosistémicos provistos por la vegetación presente en la ciudad y alrededor de ésta. Fuente: adaptado de www.global.nature.org.

Los servicios ecosistémicos proporcionados por el arbolado urbano, hacen contribuciones importantes a la capacidad de recuperación del sistema ecológico de las ciudades, por ejemplo, al amortiguar, mitigar y adaptar el ambiente a efectos de perturbaciones externas como lo son las derivadas del del cambio climático. Mantener las copas de los árboles urbanos en buen estado, contribuye a atenuar el aumento de las temperaturas durante los meses de verano, mediante la generación de sombreadamiento evitando que el pavimento se caliente e irradie calor al aire.

Lo anterior reduce las temperaturas locales disminuyendo los efectos de las islas de calor en la ciudad y mejorando el bienestar de las personas que la habitan, al mejorar la sensación térmica y disminuir la incidencia de malestares derivados de altas temperaturas tales como como calambres en el cuerpo, deshidratación, insolación, jaquecas y pérdida del equilibrio (Ballester, 2008).

El arbolado urbano aporta a la mantención y preservación de la biodiversidad en las ciudades, lo que contribuye a la conservación de especies tanto nativas, como de especies exóticas que estén con problemas de conservación en su distribución natural (conservación ex-situ). Todas las especies vegetales presentes en las ciudades son capaces de proveer hábitat para un gran número de especies de fauna, tales como insectos, aves y murciélagos (Livesley et al., 2016), especies que proveen servicios importantes para la ciudadanía como por ejemplo el control de plagas urbanas. Beninde et al. (2015) mencionan que coberturas de árboles del 30% y áreas

verdes mayores a 0,5 hectáreas realizan importantes aportes a la biodiversidad urbana, brindando hábitat y alimento a especies de fauna y facilitando el establecimiento de otras especies vegetales.

El arbolado urbano también contribuye a la salud y bienestar de los seres humanos (Figura 8; van den Bosch et al., 2015; Hartig y Khan, 2016; van den Berg, 2016). El experimentar naturaleza afecta las capacidades cognitivas, afectivas y las dimensiones psicológicas de las personas, por contacto por vivir próximo a esta, caminar por calles arboladas o pasar tiempo en el jardín de la casa (Wheeler et al., 2015; Mitchell et al., 2015). La inclusión de manera más robusta del componente natural o vegetal en la planificación no sólo robustece las respuestas de adaptación y mitigación al cambio climático sino también a hacer las ciudades más vivibles jugando un rol en la prevención y la amortiguación de problemas tales como el estrés y la ansiedad, cada vez más presentes en áreas urbanas (Bratman et al., 2019).

El arbolado urbano, contrario a soluciones tecnológicas, contribuyen no sólo a la resolución de un problema, tal como el mejoramiento de la calidad del aire, sino también a mitigar otros problemas ambientales tales como el manejo de agua, inequidades ambientales, cambio climático y la salud de las personas (Dobbs et al., 2011).

La vegetación urbana realiza grandes aportes al proveer a las personas el servicio ecosistémico de purificación y mejoramiento de la calidad del aire, a través del mecanismo de depositación de las partículas de contaminantes generadas desde industrias y transporte sobre su follaje, ramas y tronco (Kroeger et al., 2018). En las secciones siguientes se profundizará en este servicio ecosistémico.

4.2.1 Árboles y la regulación de la calidad del aire

Actualmente en muchas ciudades del mundo los esfuerzos de incorporación de vegetación en ciudades y en su periferia son cada vez más recurrentes, dado que se presentan como estrategias para la reducción de los niveles de contaminación del aire (Escobedo et al., 2011) apuntando a mejorar la calidad de vida de las personas en la ciudad (Jim y Chen, 2008), a la vez en que se alinea a estrategias de mitigación y adaptación a los efectos del cambio climático.

Estudios realizados en Estados Unidos, aplicando el modelo de estimación de servicios ecosistémicos para el arbolado urbano, I-Tree⁴ estimaron que el aporte en calidad del aire por parte del arbolado urbano de diversas ciudades era del 1%, implicando la depositación de miles de toneladas al año. Esta magnitud por ejemplo, para la ciudad de Los Ángeles, con problemas de calidad del aire, alcanzan las 1500 toneladas anuales, con una media de 8 [g/m²] (Nowak et al., 2006).

Siguiendo la misma metodología de I-Tree, Baumgardner et al. (2012) los bosques de alrededor de ciudad de México eran capaces de remover 100 [T] de contaminantes atmosféricos al año, correspondiendo al 2% de las emisiones de esa ciudad. Con el mismo modelo se evaluaron los efectos de incrementos en cobertura arbórea en la ciudad y sus consecuencias para la calidad

⁴ www.itreetools.org

del aire mostrando que para ciudades de Inglaterra, que un incremento en la cobertura arbórea de un 4% a un 16% trajo una reducción del 10% en la concentración de MP10 correspondientes a 10 toneladas de MP10 (McDonald, 2007). Mientras que aumentos en la cobertura arbórea en la ciudad de Chicago incrementaron en un 11% la depositación anual de MP10, llegando a 234 toneladas por año (Nowak 1994).

Estos estudios muestran que la vegetación urbana tiene una incidencia positiva sobre la purificación y mejora de la calidad del aire dada su capacidad de remover de contaminantes atmosféricos (Zha et al., 2018). Las partículas atmosféricas pueden ser depositadas al pasar cerca de una superficie, ahí las plantas juegan un rol importante dado que representan una superficie extensa por unidad de volumen, aumentando la probabilidad de depositación en relación a otras superficies en las áreas urbanas, tales como edificios (Janhäll 2015).

Los árboles se han considerado como colectores pasivos de las partículas del aire tanto orgánicas (polen) como inorgánicas (partículas del suelo, MP10), conformándose como filtradores biológicos captadores de MP10 mediante sus estructuras aéreas, principalmente follaje (Muñoz et al., 2017).

Las partículas del aire, en su mayoría, quedan retenidas en las superficies de las hojas para luego ser lixiviadas al suelo por el lavado de la lluvia o por caída de las hojas (Nowak et al., 2014). Las partículas de menor tamaño (<0.1 μm) pueden ser absorbidas por los estomas de las hojas de los árboles luego de ser depositadas en su superficie. En la Figura 9 se presenta un esquema explicativo del mecanismo de captura y remoción de contaminantes atmosféricos.

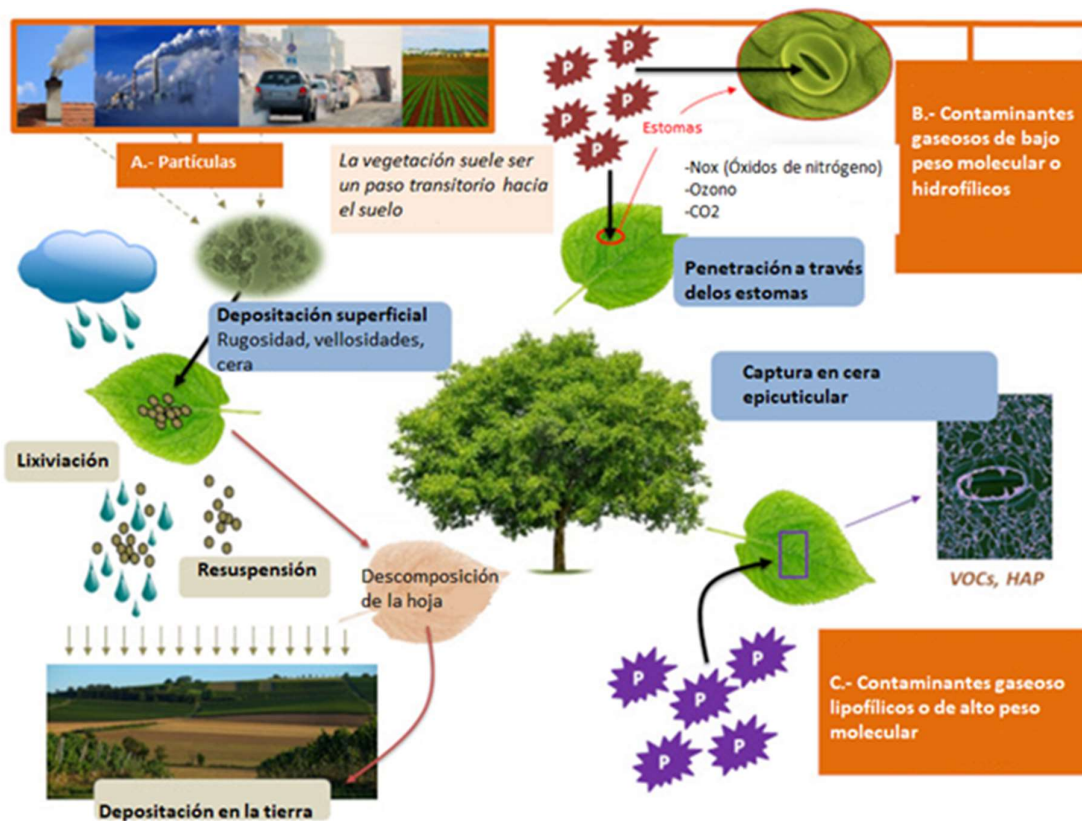


Figura 9. Mecanismos de remoción de contaminantes atmosféricos desde la vegetación. Las partículas atmosféricas quedan depositadas en las hojas. La capacidad de captura depende de la rugosidad de éstas, la presencia de tricomas (pelos) y la presencia de ceras en superficies de hojas. Contaminantes gaseosos como compuestos orgánicos volátiles quedan atrapados en las ceras epicuticulares de algunas hojas. Fuente: Adaptado de Garrec (2019).

El aporte generado por la sombra proveniente de las copas de los árboles en la ciudad afecta de manera positiva a la depositación de partículas de contaminación atmosférica sobre las hojas, al incidir en los factores micro meteorológicos locales (Saebo et al., 2012; Popek et al., 2018). Esto se produce por la mayor humedad a escala local derivado de la reducción de la temperatura del ambiente que potencia el aumento en las tasas de depositación de contaminantes sobre las hojas de los árboles (Ryu et al., 2019; Jeanjean et al., 2017).

La eficiencia del árbol para cumplir el rol de depositación de contaminantes del aire dependerá de dos factores: el primero de las características de sus hojas y el segundo de la forma y organización de los árboles en la ciudad (Grote et al., 2016). A continuación, se detallan los factores mencionados.

Características de las hojas: La capacidad de depositación de MP10 por las hojas de la vegetación varía según la especie y es influenciada por las características propias de la especie, especialmente de acuerdo a los rasgos de las hojas. Los estudios de Zha et al. (2018), Viecco et al., (2018) y Nguyen et al. (2015) concluyeron que la presencia de superficies rugosas, morfología⁵ y tamaño de hojas, densidad de vellosidades (tricomas), densidad de estomas y el desarrollo y grosor de coberturas cerosas, determinará la capacidad de la especie para capturar MP10. Las especies que retienen más se caracterizan por tener vellosidades en las hojas y una superficie de hoja mayor. Esto nuevamente demuestra que la captura de contaminantes resulta más eficiente seleccionando árboles de acuerdo a sus características morfo-anatómicas (Egas et al., 2018).

Los estudios de Zha et al. (2018) y Nguyen et al. (2015) concluyeron que especies de hojas anchas (latifoliadas) y con superficies rugosas capturan más MP10 que aquellas de superficies lisas. Especies de coníferas como pinos y cedros, presentan mayor efectividad en la captura de MP10 dada la forma de sus copas, su tipo de hoja y su condición de follaje siempreverde. Li et al. (2016) estudió que superficies de hojas rugosas y con presencia de poros son favorables para la acumulación de MP10. El estudio determinó que el césped, si bien es poco eficiente en la captura de MP10, cumple un rol importante en la reducción el re-ingreso del MP10 desde el suelo al aire, es decir, previene el levantamiento de polvo.

Willis y Petrokofski (2017) encontraron que el material depositado sobre las hojas también incide en el funcionamiento fisiológico de las especies. Este obstruye los estomas por exceso de depositación de contaminantes atmosféricos, afectando el funcionamiento de los árboles. Dado esto para lugares de alta concentración de contaminantes, como por ejemplo avenidas

⁵ Se refiere a la forma de la hoja de acuerdo a la base de esta, su peciolo, la disposición de las venas y la forma de la lámina. Así la forma de la lámina puede ser simple (ej. Quillay), compuesta (ej. Castaño de las Indias), pinada (ej. Espino), palmada (ej. Palma chilena).

de alto tráfico, es necesario seleccionar especies que tengan mayor tolerancia a la contaminación.

La investigación realizada por Guerrero-Leiva et al. (2016) sobre la depositación de MP10 por especies del arbolado urbano en Santiago demostraron que el Laurel (*Nerium oleander*) es el que deposita mayor cantidad, reteniendo más MP10 que el Pitosporo (*Pittosporum tobira*), Plátano oriental (*Platanus x acerifolia*) y Arce (*Acer negundo*). A su vez, de las especies estudiadas, la que retiene menos MP10 es la Robinia (*Robinia pseudoacacia*). De los datos publicados por el proyecto CONICYT-FONDEF IDEA (2015) sobre la depositación de MP10 en tres especies arbóreas urbanas (Quillay, Ligustro y Ciruelo), no se encontraron diferencias en la capacidad de depositación de estas.

Estas características pueden considerarse como indicadores de la capacidad del árbol para la depositación de MP10 (Muñoz et al., 2017) al momento de seleccionar especies para programas de compensación.

Forma y organización de los árboles en la ciudad: La depositación de MP10 en el follaje también depende de factores meteorológicos, especialmente de la velocidad del viento, la precipitación, la temperatura y la humedad (Mo et al., 2015). Por lo que el tipo de vegetación, la cantidad y el tamaño de los individuos afecta la capacidad de depositación de MP10. La distancia a la fuente de contaminación también es un importante factor a considerar cuando se quiere utilizar vegetación para remover contaminantes (Mori et al., 2018).

Variables como la cobertura de la copa de los árboles, el área foliar, el tamaño de los árboles y la diversidad en composición de especies y en su estructura (diversidad de edades y alturas) son factores a tener en cuenta para la depositación de contaminantes (Baldauf, 2017). La estructura que posee la masa de árboles, indicado por las diferencias en las alturas alcanzadas por los árboles propias de cada especie, puede alterar los perfiles de viento promoviendo la intercepción local (Chen et al., 2016). Árboles de dimensiones más grandes (altura y cobertura de copa), tienen mayor capacidad de depositación que árboles pequeños. Es decir, mayores tamaños de árboles implican una mayor biomasa, lo que entregando mayor diversidad de servicios ecosistémicos y por tanto más beneficios a las personas (Figura 10).

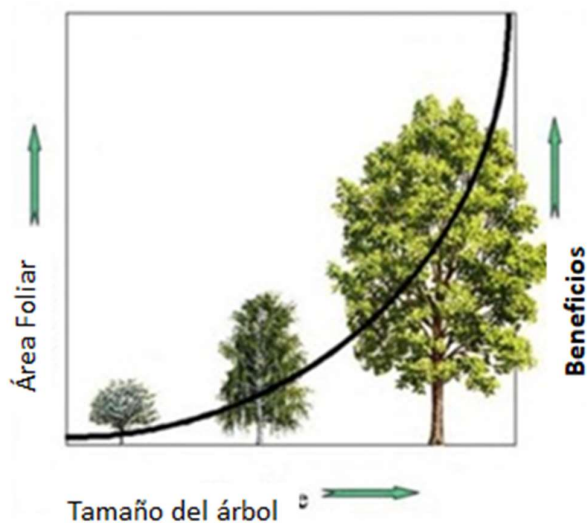


Figura 10. Relación entre área foliar y el tamaño del árbol como indicador de provisión de servicios ecosistémicos. Fuente: The Benefits of Trees, 2019⁶.

Para las áreas verdes una variada composición de especies vegetales y con no solo árboles, sino también con especies arbustivas y herbáceas como el césped, optimizan la depositación del MP10. Esto es porque agregan textura y dinamismo al paisaje urbano y fomentan la ventilación del espacio urbano (Gunawardena et al., 2017; Qiu et al., 2018). Al evitar distribuciones de árboles en líneas rectas y adoptando una distribución en tipo bosque se podría incrementar la depositación del MP10, reduciendo la presencia de contaminantes del aire hasta en un 75% (Fares et al., 2016).

El tamaño del área verde también es un factor a considerar al estudiar el servicio ecosistémico de depositación de MP10 por la vegetación. El tamaño de un área verde condicionará el tipo de vegetación, sus densidades y altura de la vegetación, coberturas de las copas, composición de especies, índice de área foliar y distribución de las especies en el espacio de área verde (Chen et al., 2016).

En la Figura 11 se muestra cómo la calidad del aire varía desde altos niveles de concentración de contaminantes, en el inicio del corredor de vegetación, hacia concentraciones más bajas, hacia el interior del bosque (Fares et al., 2016).



Figura 11. Depositación de MP10 por masas vegetacionales. Fuente: Adaptado de USDA, 2019.

4.2.2 Antecedentes de la depositación de MP10 sobre la vegetación de la Región Metropolitana de Santiago

En el estudio “Determinación del Servicio Ecosistémico de Purificación del Aire en el Área del Proyecto Gef Montaña”, realizado por el MMA en 2018, cuya área de estudio comprendía la RMS y parte de la Quinta Región, se estudió la capacidad de depositación de MP10 sobre la vegetación nativa de los remanentes del bosque esclerófilo.

⁶

Recuperado de <https://www.urbantreealliance.org/resources/why-trees/>

Se encontró que los valores de deposición de MP10 por parte del bosque nativo en la periferia del Gran Santiago fueron más altos en bosques ubicados en sectores montañosos de la Cordilleras de Los Andes y de la Costa y más bajo en las áreas ubicadas en los valles interiores de la RMS. En la Figura 12 se observa que los mayores valores de deposición de MP10 se concentran en el área sur-oeste de la RMS, correspondiente a cordones montañosos con menor grado de degradación.

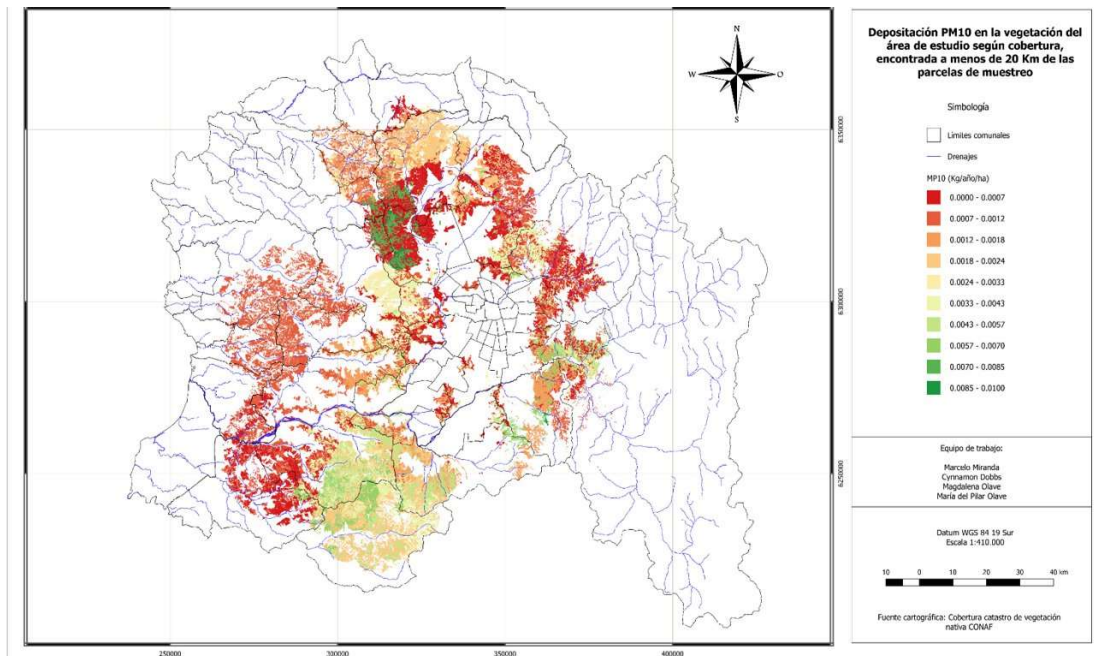


Figura 12. Deposición de MP10 sobre bosque nativo. Fuente: MMA (2018).

De acuerdo al tipo de cobertura se pudo obtener la deposición del bosque esclerófilo de la RMS en sus diferentes densidades de cobertura, siendo el bosque denso el que presenta una mayor capacidad de deposición, siendo casi casi tres veces superior que los bosques muy abiertos (Tabla 5).

Tabla 5. Deposición de MP10 por tipo de bosque según la clasificación del Catastro de Bosque Nativo de CONAF y CIREN (2013).

Cobertura de bosque (%)	Deposición anual MP10 promedio [g/año/ha]
Muy abierto (10-25)	1,557
Abierto (25-50)	1,511
Semidenso (50-75)	3,142
Denso (>75)	4,243

Fuente: adaptado del estudio Determinación del Servicio Ecosistémico de purificación del aire en el área del proyecto GEF Montaña, desarrollado por el Ministerio del Medio Ambiente en 2018.

4.3 Depositación de MP10 por masas vegetacionales

4.3.1 Revisión de metodologías existentes para estimar la depositación de MP10

En la presente sección se detallan los tres métodos que se encontraron para cuantificar la depositación de MP10 por parte de la vegetación. El primero consiste en medir directamente el MP10 depositado sobre la vegetación, el segundo método utiliza modelos matemáticos de depositación seca para la estimación de la depositación, y el tercero, menos común, utiliza información derivada de sensores remotos para lograr la estimación de depositación.

Se detallan a continuación.

4.3.2 Método 1: Medición de MP10 depositado en la vegetación

Existen distintas formas de medición de MP10 de manera experimental, todos requieren de la toma de muestras de hojas desde un ambiente controlado (experimental) o desde terreno, y el posterior pesaje de éstas. A continuación, se detallan cada una de estas mediciones y los órdenes de magnitud de sus resultados.

Se pueden realizar experimentos en ambientes controlados para evaluar la depositación de la vegetación al medir el efecto en la concentración de contaminantes. Papaioannou et al. (2013) evaluaron los cambios en concentración de contaminantes utilizando un experimento en cámara cerrada donde se conoce la concentración de MP10 entrante y se mide la concentración de este después de pasar por una capa vegetal, en este caso de pastos. Este experimento estima que existe una reducción entre un 20-40% en la concentración de MP10.

Stapleton et al. (2016) realizaron el experimento mencionado en Santiago de Chile, para evaluar cambios de concentración de partículas después de pasar por un filtro de arbustos, estimando reducciones de 6% en la concentración de estos al interior de una oficina. Para la realización de este tipo de experimentos se debe contar con una habitación sellada de baja tasa de infiltración, con temperatura y humedad controlada a través de inyección de aire frío y caliente a velocidad constante. Además, la habitación debe contar con una radiación constante de manera de que la vegetación que se esté probando pueda realizar fotosíntesis (Viecco et al., 2018).

También se pueden evaluar los efectos de la vegetación en espacios no controlados tales como calles. Tan et al. (2005) realizaron mediciones de concentración de contaminantes en las calles de Singapur descubriendo que existe un aporte de aproximadamente un 6% en la reducción de contaminantes en calles desde techos y muros verdes.

El pesaje e identificación de las partículas recolectadas desde la vegetación, se puede medir a través de un escáner de microscopía electrónica, que permite identificar a través de realizar transectos en la imagen, el tipo de partículas que existen, su tamaño y su densidad. En la Figura 13 se muestra un ejemplo de la imagen obtenida desde este método. Resultados de un estudio

en la ciudad de Manchester (Speak et al., 2012) estimó depositaciones secas de MP10 que variaban entre 0,42 [g/m²/año] a 1,81 [g/m²/año] para especies de herbáceas y pastos.

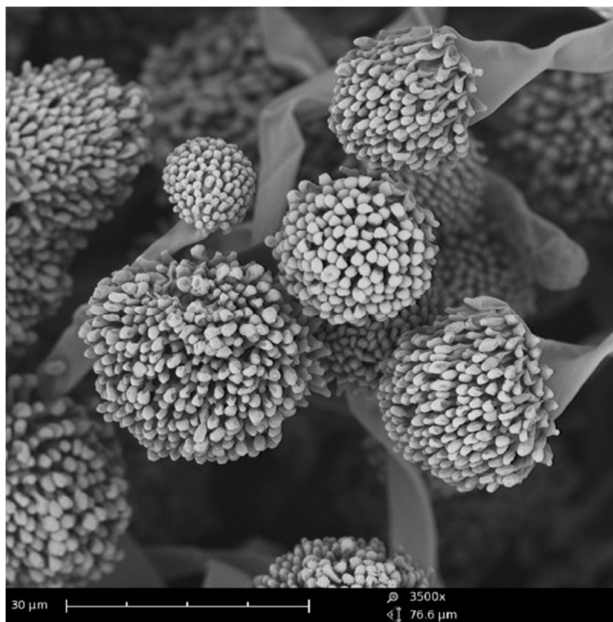


Figura 13. Partículas de polen observadas desde un escáner electrónico microscópico. Fuente: ATA, 2019⁷.

El pesaje de MP10 en las hojas también se puede lograr a través de métodos gravimétricos, en que el lavado del material y su pesaje permite determinar la masa depositada. Para éste método, se recolectan hojas que son procesadas en una cámara cerrada de flujo laminar para prevenir contaminación cruzada. Posterior a ello, las hojas son lavadas con agua destilada y revueltas en un vortex para ser filtrado en una malla metálica; luego de esto se hace pasar por un filtro al vacío para separar los distintos tamaños de partículas. Una vez secas las muestras, son pesadas en balanzas de precisión. Para la obtención de MP10 depositado en la cera de la hoja, se sigue el mismo procedimiento pero lavando con cloroformo en vez de agua destilada (Viecco et al., 2018).

Dzierzanowski et al. (2011) y Przybysz et al. (2014) utilizaron el método anterior estimando depositaciones que varían entre 8 [microgramos/cm²] hasta 146 [microgramos/cm²] (éste último para *Hedera helix* considerada una planta que disminuye los contaminantes del aire).

Chen et al. (2016) evaluaron la efectividad de la vegetación como bio-filtro de material particulado utilizando el método gravimétrico y encontraron una reducción importante en la concentración de MP2,5 con variaciones de entre 6 [microgramos/cm²/día] hasta 70 [microgramos/cm²/día].

⁷ <https://www.atascientific.com.au/sem-imaging-applications-practical-uses-scanning-electron-microscopes/>

Para el cálculo de la deposición seca, se genera un indicador que se expresa en función de la superficie de la hoja (S) y del tiempo de exposición (t) al MP10, es la siguiente:

$$PM10 [\mu g \cdot cm^{-2} \cdot h^{-1}] = Peso (m^2) \times S^{-1} \times t^{-1} (Viecco et al., 2018)$$

4.3.3 Método 2: Basados en Modelos Matemáticos

Se presentan dos Modelos de deposición de MP10 basados en modelos matemáticos, que son: los Modelos de deposición seca de MP10 en la vegetación y los Modelos de concentración de MP10 que consideran los efectos de la vegetación. Se entrega Resumen de estudios relevantes que consideran la evaluación de los efectos de la vegetación en la calidad del aire.

4.3.3.1 Modelos de deposición seca de MP10 en la vegetación

Las partículas de contaminantes atmosféricos pueden ser depositadas cuando pasan cerca de una superficie, como por ejemplo de las hojas que componen las copas de los árboles. La deposición en la vegetación usualmente se describe en una sola dimensión y correspondiendo al proceso de cuando pasa una corriente de aire por encima de la hoja. Para este tipo de modelos solo se considera la superficie foliar y no su grosor, de acuerdo a la teoría del modelo de difusión de Brownian.

Cabe destacar que la deposición que se modela para la vegetación es seca y asume que la copa del árbol y su capacidad aerodinámica son homogéneas horizontalmente. La copa de los árboles para estos modelos se asume solamente considerando el follaje, dado que su superficie acumulada es mayor que otros componentes de la vegetación ubicados en la copa (i.e. flores, frutos, ramas).

La orientación de la hoja afecta a la tasa de colección del MP10. Para la simplicidad del modelo, se considera que la distribución angular de la hoja es espacialmente homogénea y no se considera que la interacción con el viento podría cambiar el ángulo. La deposición seca en la vegetación entonces es modelada como flujo de acuerdo a la siguiente ecuación dada por Petroff et al. (2008):

$$F = v_d * \Delta C$$

Donde F es el flujo, v_d representa la velocidad de deposición y ΔC representa la variación en la concentración de MP10.

El proceso de deposición es explicado por los siguientes subprocesos: primero el transporte de aire desde un espacio abierto hacia la superficie; segundo, el transporte se realiza a través de la capa laminar adyacente a esa superficie; y tercero, los procesos asociados a las propiedades intrínsecas de la superficie sobre la cual se realiza la deposición.

De esta forma, la velocidad de deposición en una superficie, es descrita como el recíproco de la resistencia a la deposición (R_{tot}). Este último, se calcula en base a la suma de tres tipos de resistencias relacionadas a los subprocesos de transporte anteriormente descritos, como se muestra en la siguiente ecuación (Davidson and Wu, 1990):

$$v_d = \frac{1}{R_{tot}} = \frac{1}{R_a} + \frac{1}{R_b} + \frac{1}{R_c}$$

Donde v_d es la resistencia aerodinámica, R_b es la resistencia de la capa límite y R_c es la resistencia de la superficie.

La resistencia aerodinámica se establece en cero dada su magnitud muy menor, lo que ocurre para el caso de partículas menores a 10 micrómetros de diámetro (Davidson et al., 1982). Las variables R_a y R_b dependen del recíproco de la velocidad de fricción (Petroff et al., 2008).

De acuerdo a Vong et al. (2010) la velocidad de depositación (v_d) depende de la estabilidad atmosférica de la capa límite, descrita por el largo de Monin-Obukov (L), y del tamaño de la partícula de acuerdo a una relación lineal (D_p , para este caso sería de 10 micrómetros), quedando descrito de la siguiente manera:

$$v_d = A * u_* * D_p * \left(1 + \left(-\frac{300}{L}\right)^{2/3}\right)$$

En que la capa límite para el MP10 es una constante empírica llamada A , que posee valores de 0,63 para bosques de pino (Vong et al., 2010), 1,35 para otros tipos de bosques (Gallagher et al., 1997) y 0,2 para pastos (Wesely et al., 1985).

Para partículas de diámetro menor a 10 micrómetros, las tasas de depositaciones pueden variar hasta en 100 veces, ya que la disminución en el tamaño de las partículas amplifica la relación de acuerdo a la masa y no al número de partículas. El número de partículas causa efecto en partículas de tamaños menores 0,1 micrómetro (Janhäll, 2015).

La velocidad de depositación depende del tipo de vegetación. Es por esto que se establece que la cantidad de MP10 depositada está directamente relacionada con el índice de Área Foliar (en adelante IAF), es decir la cantidad de hojas que pueden haber en 1 $[m^2]$ de suelo. La ecuación se expresa de la siguiente forma:

$$Cantidad\ depositada\ \left[\frac{g}{m^2}\right] = IAF * v_d * C * t$$

Donde IAF corresponde al Índice de Área Foliar, v_d es la velocidad de depositación, C es la concentración atmosférica del contaminante al tiempo t ; y t es el tiempo. Petroff et al. (2008) probaron el modelo de forma experimental en especies de coníferas y de latifoliadas entregando resultados confiables⁸.

Hay que destacar, que el modelo excluye los efectos de impactos de la turbulencia generada por vientos, fenómenos comunes en zonas urbanas, no así en los bosques donde estos experimentos son realizados. Por esto último, en el uso de los modelos de depositación

⁸ Especies de hojas anchas y planas (ej. Quillay, Plátano Oriental) en contraposición a las coníferas que tienen hojas angostas (ej. Pino, Araucaria)

desarrollados para vegetación, se recomiendan para ser utilizados en partículas de tamaños mayores a 0,1 - 0,3 micrómetros de diámetro.

De acuerdo a la ecuación anterior, queda expuesto que la depositación depende de la densidad de la vegetación dada por el índice de área foliar. Existen distintas formas de medir el área foliar, la más directa consiste en extraer una muestra de hojas de un volumen conocido y medir directamente la superficie que cubren esas hojas. Este método es difícil de realizar y depende de la especie, siendo más adecuado para especie con copas no porosas, es decir con alta densidad de hojas y en condiciones sin viento (Janhäll, 2016).

Otras formas de medir área foliar son a través de fotografías obtenidas desde una cámara con lente de ojo de pez, en que se toma una fotografía desde abajo de la copa y luego se contabiliza el espacio de cielo o luz que se registra en la fotografía. Algunos instrumentos especializados en la medición de área foliar, que entregan valores más exactos, como los ceptómetros, utilizan la cuantificación de la radiación que pasa a través de la copa, en contraste con la radiación que llega directamente al instrumento (sin interceptar con vegetación).

Freer-Smith et al. (2004) concluyeron que las velocidades de depositación de MP10 sobre la vegetación, son mayores para especies de coníferas que para especies de hoja ancha, siendo aún más para especies con acículas⁹ en comparación con coníferas de hojas anchas.

Para especies con tallos pequeños y hojas grandes, las velocidades de depositación son mayores en los tallos (o troncos) que en las copas, un ejemplo de ello es el Laurel en flor (*Nerium oleander*) (Guerrero-Leiva et al., 2016). Las especies de ambientes semi-áridos tienden a tener menores velocidades de depositación dado por el gran ancho de sus hojas (Freer-Smith et al., 2004). De acuerdo a lo anterior, es posible afirmar que, existen distintas velocidades de depositación que dependerán de la especie, aunque dados los datos experimentales actuales disponibles, no es posible su correcta parametrización (Janhäll, 2015).

En cuanto a las complejidades del modelo de depositación seca, en general los distintos softwares que la estiman utilizan ciertos supuestos que incrementan la incertidumbre de los resultados. Esto puede llevar a la sobrestimación de los resultados, dado por el uso de superficies de resistencia constantes que no se adecúan a la variación diaria en la concentración de contaminantes presentes en el aire (Cape et al., 2008).

El modelo I-Tree (anteriormente llamado Urban Forest Effects, acrónimo UFORE) se utiliza para el cálculo de depositación de MP10 por parte del arbolado urbano y se asocia al mejoramiento de la calidad del aire en una escala anual (www.itreetools.org).

El modelo I-Tree es uno de los modelos de depositación más ampliamente utilizados, habiendo sido aplicado en varias ciudades de los Estados Unidos, Canadá, España, México y Australia. El año 2002 (Escobedo y Nowak, 2009), el año 2014 (Fondecyt 1140319, datos no publicados) para arbolado urbano y el año 2015 (FONDEF 14I10335, datos no publicados) para techos verdes y arbolado, este modelo fue aplicado en el contexto de la ciudad de Santiago. Este modelo de

⁹ Ejemplo de especie de conífera con acícula: pino, abeto; ejemplo de conífera de hoja ancha: junípero

deposición seca asume que las condiciones meteorológicas y de concentración de contaminantes son homogéneos a escala hora y que estos son los mismos para toda la región en análisis. Utilizado dentro de la herramienta el modelo no permite ingresar distintas concentraciones de contaminantes ni meteorológicas por lo que los resultados no indican la efectividad de los árboles para depositar contaminantes de acuerdo a su distribución espacial (Cabaraban et al., 2013).

Este modelo se basa en mediciones de terreno de variables de las especies de arbolado, tales como tamaño del árbol (alturas y diámetros de tronco), que se registran por medio de censos o inventarios forestales para a través de ecuaciones alométricas estimar el área foliar de los árboles.

Cabe destacar que la mayoría de las ecuaciones alométricas utilizadas en esta herramienta se derivan de estimaciones de árboles de Norte América, por lo que es alta la incertidumbre en las estimaciones del área foliar de especie nativas de Chile. Este modelo tampoco considera la influencia de la vegetación en la dispersión de los contaminantes del aire dados por la redistribución de estos (debido a vientos) o por el aumento de la dilución atmosférica (Tiwari et al., 2019).

La última versión del modelo I-Tree integra un modelo de distribución de concentración de contaminantes y un modelo de predicción meteorológica, para estimar de manera espacialmente explícita el efecto de los árboles en la deposición de contaminantes atmosféricos. El modelo I-Tree funciona combinado con el Modelo multiescala de calidad del aire comunitario (CMAQ, sigla en inglés Community Multiscale Air Quality Model; desarrollado por la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos). La combinación permite generar una grilla de contaminantes que contiene datos de emisiones, advección vertical y horizontal, difusión, mezcla de nubes, transformaciones de la fase gaseosa de los químicos, reacciones de la fase acuosa de los químicos y los procesos de los aerosoles.

Lo anterior se integra con los modelos de predicción e investigación sobre el clima (Weather Research and Forecasting, siglas en inglés WRF) que permite generar datos de vientos en escala hora, temperatura, humedad, profundidad de la capa de mezcla e insolación solar que se requieren en el CMAQ. Este modelo es desarrollado por la Agencia Nacional de Administración Oceánica y Atmosférica (NOAA, siglas en inglés).

La combinación de los tres modelos anteriores permite calcular y generar mapas de velocidades de deposición seca (Vd) y de flujo de deposición (F). Se debe considerar, que este modelo sigue asumiendo que el índice de área foliar es una variable estática durante el año (Hirabayashi et al., 2012).

4.3.3.2 Modelos de concentración de MP10 que consideran los efectos de la vegetación

A continuación, se presentan los llamados Modelos computacionales de dinámicas de fluidos, que evalúan los efectos de la vegetación en la concentración de los contaminantes atmosféricos. Algunos de ellos son los utilizados por ENVI-Met (para estimaciones de energía) dentro de la plataforma abierta OpenFOAM que utiliza el modelo Promedio de Reynolds Navier-Stokes (RANS) $k-\epsilon$ y funciona simulando concentraciones de contaminantes a escalas micro (por ejemplo, una calle en la ciudad).

Otras plataformas que incorporan estos modelos incluyen el uso del software Fluent y CTAG¹⁰. Estos modelos no estiman el efecto en sí del árbol, sino más bien de los cambios en la concentración de los contaminantes del aire cuando existe una calle arbolada. Este tipo de herramientas requiere inputs de información en 3D de los edificios y la vegetación presentes en la calle en estudio (Jeanjean et al., 2015). Este modelo calcula el flujo del viento y trata a los árboles como medio poroso para contabilizar su efecto al agregar una fuente de momentum al flujo del viento. Se plantea de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$S = -\lambda\left(\frac{1}{2}\rho v|v|\right) \text{ (Guo y Maghitrang, 2012)}$$

Donde S , es el momentum de pérdida de la fuente [Pa/m], λ el factor de resistencia inerte o coeficiente de pérdida de presión [m^{-1}], ρ es la densidad del fluido [$kg\ m^{-3}$] y U es la velocidad del fluido [m/s]. Esto se evalúa experimentalmente utilizando como $\lambda=200$ [m/s] obtenido desde el túnel de viento en laboratorio. Con esto se puede modelar la dispersión de la contaminación, tomando en cuenta la difusividad de la turbulencia, que se plantea de acuerdo a la siguiente ecuación (Jeanjean et al., 2015):

$$\frac{\delta C}{\delta t} + \Delta(UC) = \Delta^2((D + K)C)$$

Donde C , es el escalar transportado, U es la velocidad del fluido, D es el coeficiente de difusión [m^2/s] y K es el coeficiente de difusión Eddy [m^2/s]. Este último coeficiente puede ser expresado como $K=\mu t/Sct$, donde μt es la viscosidad turbulenta [m^2/s] y Sct es el número de turbulencia de Schmidt.

De lo anterior, se entiende que estos modelos requieren de la obtención de los distintos parámetros de las ecuaciones desde experimentos de laboratorio que recrean un tunel y se incorporara la vegetación como el medio poroso que afecta al coeficiente λ . Posterior a ello, los factores estimados se prueban en un caso real de una calle de ciudad con su respectiva vegetación y se ajustan los factores a las condiciones locales. Las simulaciones también se complementan con mediciones locales de concentración de MP10, de temperatura y viento durante dos temporadas, para luego volver a realizar las simulaciones del modelo (Boccolieri et al., 2011).

A partir de esta información, se pueden generar simulaciones de concentraciones de contaminantes de acuerdo a distintas direcciones del viento y con árboles dispuestos en distintos ángulos. La visualización de los resultados de Jeanjean et al. (2015), se presentan de la Figura 14.

¹⁰ Software Fluent desarrollado por ANSYS, CTAG: Comprehensive Turbulent Aerosol dynamics and Gas chemistry.

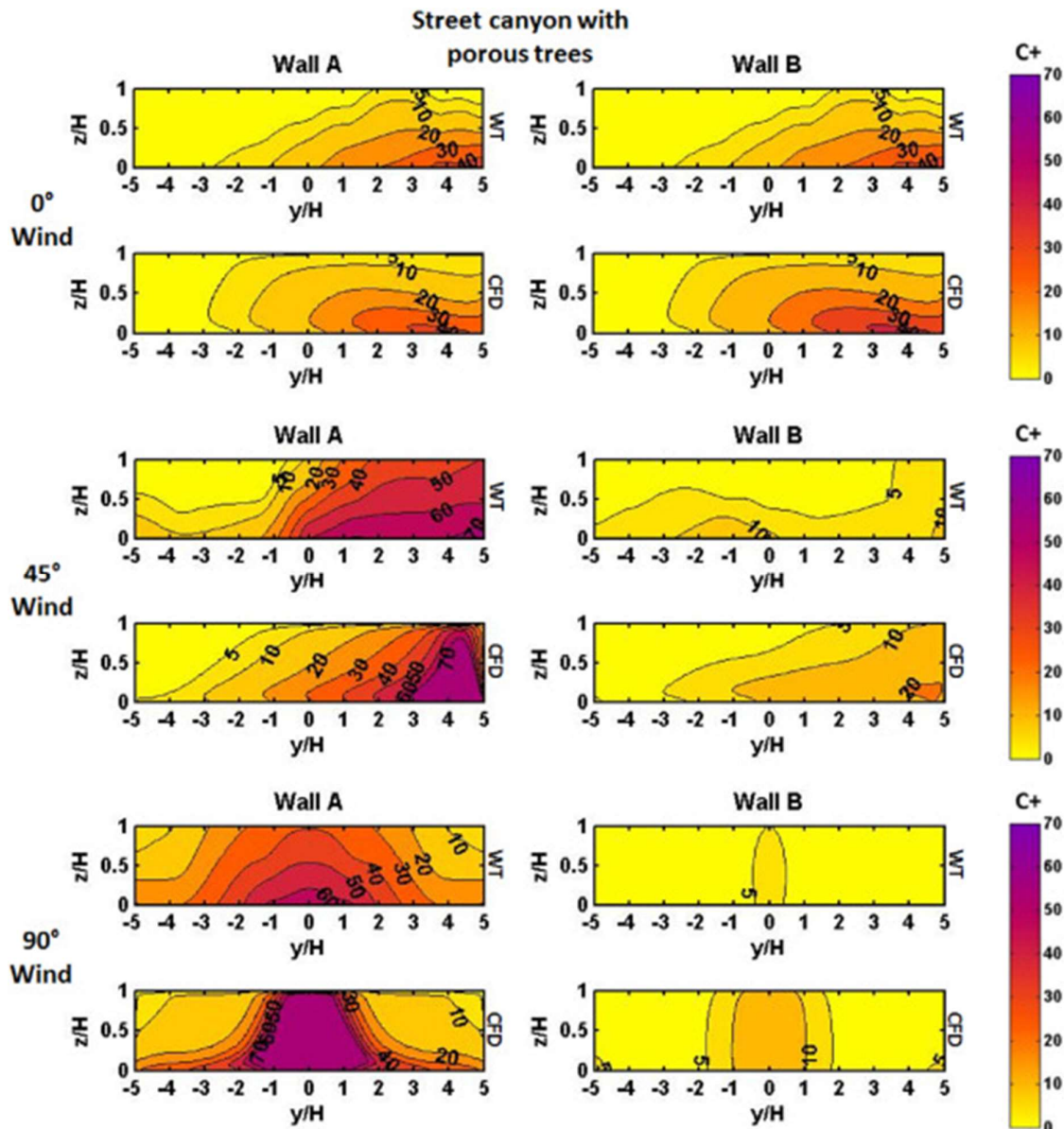


Figura 14. Modelo de simulación de fluidos. Se muestra la concentración de contaminantes al utilizar distintas posiciones de la vegetación en relación a los muros de los edificios en una calle de ciudad. Fuente: Jeanjean et al., 2015.

Estos modelos requieren de gran cantidad de recursos computacionales y tiempo. En general son aplicados a extensiones espaciales pequeñas (ejemplo 2x2 [km]) pero son capaces de mostrar el efecto de la vegetación en alta resolución. Aunque estos modelos presentan la capacidad para evaluar los efectos de geometrías complejas en los flujos de viento y contaminantes, aún incorporan a la vegetación en función del área foliar, asumiendo una depositación constante que no toma en cuenta los efectos de los cambios en temperatura y vientos en la simulación de la concentración de contaminantes. Se ha probado que incrementos de la velocidad del viento, llevan a una reducción en la concentración de partículas mayores a 50 [nm] y no exhibe cambio en las partículas menores a este tamaño (Steffens et al., 2012).

Estos modelos impiden separar las remociones de contaminantes que ocurren sólo por la vegetación, de las variables de la vegetación tales como diferentes especies, tamaño de las hojas y otros parámetros que afectan la transpiración de la copa de los árboles; lo que impide poderlas ingresar al modelo. Esto último, lleva a que estos modelos subestimen la depositación y sobre-estiman la concentración de contaminantes en el aire (Tiwari et al., 2019).

Los modelos estadísticos para estimar depositación de contaminantes, consisten en modelos matemáticos que son capaces de predecir las concentraciones de contaminantes a partir de mediciones de datos obtenidos desde terreno. Estos modelos incluyen ecuaciones de regresión de uso de suelo, modelos de entrenamiento de máquinas (machine learning models Kleine) y modelos de simulación de MonteCarlo (Rao et al., 2017; Deters et al., 2017; Mallet et al., 2008).

Estos modelos funcionan entrenando a la máquina a partir de un set de datos temporales de terreno, en que a través de relaciones matemáticas o probabilísticas son capaces de predecir escenarios futuros. Los modelos de uso de suelo basan los parámetros de cobertura del suelo en el índice de área foliar, tipo y distribución de la vegetación, patrón de uso del suelo, datos meteorológicos y concentraciones de contaminantes para derivar escenarios futuros (Habermann et al. 2015). Se debe conocer, que no existe una relación definida entre el uso de suelo por la vegetación y la concentración de contaminantes del aire, es decir, no es posible distinguir el efecto que es exclusivo de la vegetación en el uso de estos modelos (Tiwari et al. 2019).

4.3.3.3 Resumen de estudios relevantes que consideran la evaluación de los efectos de la vegetación en la calidad del aire

A continuación, se muestra un resumen de estudios relevantes, que consideran la modelación de la depositación de MP10 en la vegetación urbana (Tabla 6).

Tabla 6. Resumen de estudios relevantes que estiman el rol de la vegetación urbana en la calidad del aire. Cabe destacar que todos estos se basan en estimaciones de depositación seca.

Ciudad/País	Técnicas de medición de la concentración de MP10 y variables del modelo	Modelo utilizado para la estimación de la depositación	Fuente
Toronto, Canadá	Datos de terreno	I-Tree	Currie y Bass, 2008
Beijing, China	Datos de terreno	I-Tree	Yang et al., 2004
Chicago, Estados Unidos	Datos de terreno	I-Tree	Nowak, 1994
Sacramento, Estados Unidos	Datos de terreno	I-Tree	McPherson y Simpson, 1999
Baltimore,	CMAQ	I-Tree, CMAQ + WRF	Cabaraban et al.,

Ciudad/País	Técnicas de medición de la concentración de MP10 y variables del modelo	Modelo utilizado para la estimación de la depositación	Fuente
Estados Unidos			2013
Leicester, UK	OpenFOAM software (CFD)	OpenFOAM software (CFD)	Jeanjean et al., 2015
Marylebone, UK	OpenFOAM software (CFD)	OpenFOAM software (CFD)	Jeanjean et al., 2017
Antwerp, Bélgica	OpenFOAM software (CFD)	OpenFOAM software (CFD)	Vranckx et al., 2015
Lisboa, Portugal	URVE code (CFD)	URVE code (CFD)	Amorin et al., 2013
Aveiro	URVE code (CFD)	URVE code (CFD)	Amorin et al., 2013
Leicester, UK	OpenFOAM software (CFD)	OpenFOAM software (CFD)	Jeanjean et al., 2016
Shanghai, China	FLUENT (CFD)	FLUENT (CFD)	Li et al., 2016
Bari, Italia	FLUENT (CFD)	FLUENT (CFD)	Buccolieri et al., 2011
Santiago, Chile	Datos de terreno	I-Tree	Escobedo y Nowak, 2009
Shanghai, China	Datos de terreno	I-Tree	Yin et al., 2011
Florenia, Italia	Datos de terreno	I-Tree	Bardelli et al., 2011
Syracuse, Estados Unidos	Datos de terreno	I-Tree	Nowak et al., 2013
Auburn, Estados Unidos	Datos de terreno	I-Tree	Martin et al., 2013
West Midland y Glasgow, UK	FRAME Model	Análisis estadístico	McDonald et al., 2007
Berlin, Alemania	Datos de terreno	Modelo de regresión de uso de suelo	Ghassoun y Löwner, 2017
Strasbourg, Austria	Datos de terreno	I-Tree	Selmi et al., 2016
Chicago, Estados Unidos	Estaciones de Monitoreo	I-Tree	Yang et al., 2008

Ciudad/País	Técnicas de medición de la concentración de MP10 y variables del modelo	Modelo utilizado para la estimación de la depositación	Fuente
Unidos			
Chapel Hill, Estados Unidos	Datos de terreno	CTAG (CFD)	Steffens et al., 2012
Woodside, California, Estados Unidos	Datos de terreno	CTAG (CFD)	Deshmuk et al., 2018

Fuente: Adaptado de Tiwari et al., (2019).

4.3.4 Método 3: Modelos de depositación de MP10 derivado de sensores remotos

Estos modelos, por lo general llamados modelos híbridos, corresponden a combinaciones de distintos modelos que permiten estimar la depositación de contaminantes del aire. La aplicación de escala de este tipo de modelos es a escala global e incluye combinaciones de modelos meteorológicos, modelos de dispersión y modelos de pluma Gaussiana.

El problema de estos modelos es la disponibilidad de datos. Por ejemplo, el área foliar se puede estimar desde ecuaciones matemáticas que relacionan la radiación fotosintéticamente activa y la productividad primaria obtenida desde imágenes satelitales de sensores remotos (Gower et al., 1999; Aboelghar et al., 2010). La incertidumbre en este cálculo dependerá de la robustez del modelo para la obtención del dato de área foliar y de la pertinencia en que se aplica el modelo (misma localización o clima que para los que fue creado).

Otra dificultad de los modelos derivados de imágenes satelitales es referente a que las resoluciones de las imágenes desde las cuales se deriva el área foliar, no necesariamente es capaz de capturar toda la vegetación existente dentro de la ciudad. Lo más fiel a la realidad, son los satélites Sentinel, que con 10 [m] de resolución, permitirá identificar árboles con copas a lo más de 10 [m] de diámetro.

5 Área de estudio

El presente estudio será realizado en la RMS, ubicada en la zona central del país. Corresponde a una superficie de 15.000 [km²], caracterizada por un clima mediterráneo con un régimen anual de lluvia de 350 [mm] aproximadamente (Guerrero-Leiva et al., 2016). Dentro de los tipos de uso de suelos predominantes de la región, se pueden encontrar superficies urbanizadas, terrenos agrícolas y ambientes naturales como lo son los relictos de bosque nativo esclerófilo que se pueden encontrar en los sectores rurales y peri-urbanos de la región (Escobedo et al., 2008).

La Ley 20.283 del 2008 define bosque como “sitio poblado con formaciones vegetales en las que predominan árboles y que ocupa una superficie de por lo menos 5.000 [m²], con un ancho

mínimo de 40 [m], con cobertura de copa arbórea que supera el 10% de dicha superficie total en condiciones áridas y semi-áridas y el 25% en circunstancias más favorables”.

El bosque nativo de la RMS corresponde al tipo forestal bosque esclerófilo, bosque que a lo largo de la historia se ha visto fuertemente degradado, al punto que en la actualidad no existen bosques primarios en la región (Duchens, 1998). Esta degradación es y ha sido derivada de constantes presiones antrópicas asociadas a explotación de recursos naturales y al cambio de uso de suelo para la habilitación de terrenos para agricultura o bien, para su urbanización.

Las áreas de bosque nativo esclerófilo que existen actualmente en la RMS se encuentran en faldeos de cerros y algunas quebradas localizadas principalmente en la precordillera o de forma fragmentada al interior de valles. La superficie de bosques en la Región fue estimada en 373.354,3 [ha] en el año 2017 (CONAF, 2017).

6 Metodología

6.1 Objetivo específico a) Definir áreas de muestreo para arbolado en función de la distribución espacial de la calidad del aire –MP 10 por Resuspensión - de la Región Metropolitana de Santiago.

En esta sección, en acuerdo con el mandante, se describieron los criterios de definición para el establecimiento de las parcelas o puntos de muestreo que serán realizados durante la campaña de terreno.

Para definir las áreas de muestreo de arbolado en la RMS, en función de la calidad del aire (MP10), primero se separó la RMS en área urbana y área peri-urbana, siendo el área urbana toda la superficie que se incluye en el Plan Regulador Metropolitano de Santiago (PRMS), y la peri-urbana, toda la superficie que rodea el área urbana. Esta separación fue realizada sobre la base de que las fuentes de contaminación de MP10 en la RMS y por tanto los mayores niveles de concentración de MP10 se localizan en el centro de la Región (dado por la baja capacidad de dispersión de MP10), principalmente en las comunas del Gran Santiago. En la Figura 15. Área urbana y peri-urbana. Fuente: Elaboración propia a partir de datos de IDE (2016, www.ide.cl). se muestra área urbana y peri-urbana en la RMS.

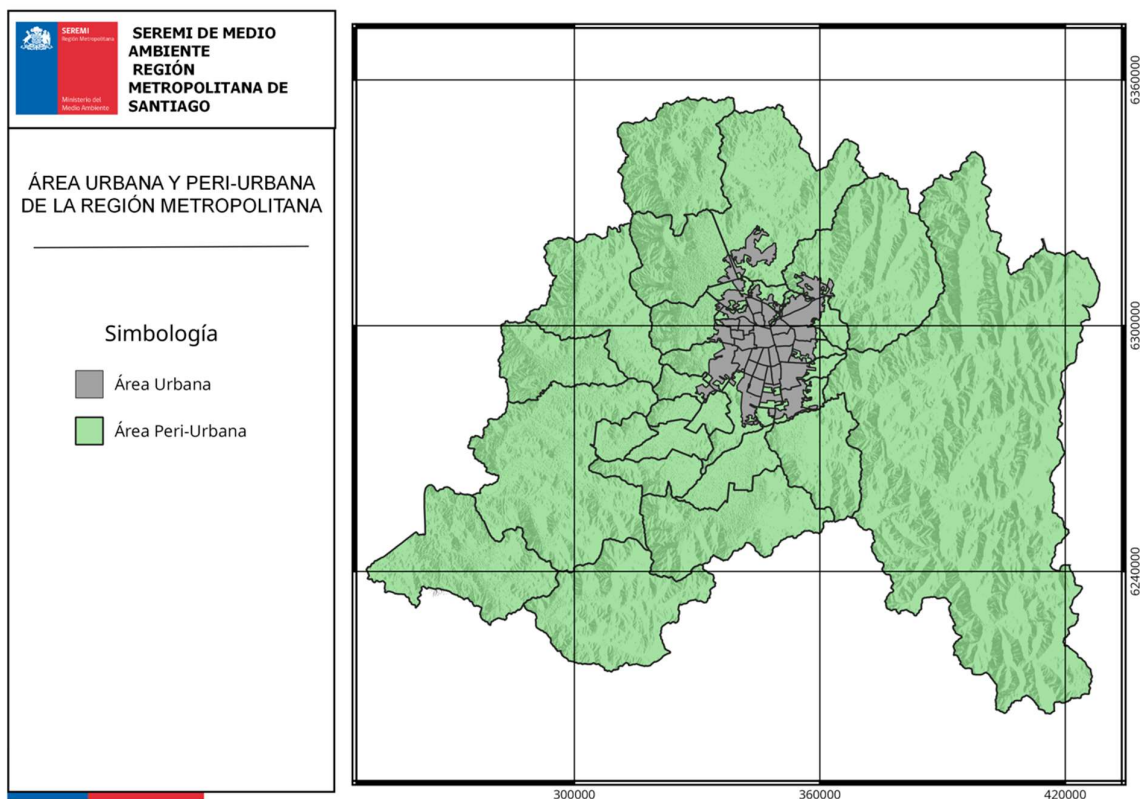


Figura 15. Área urbana y peri-urbana. Fuente: Elaboración propia a partir de datos de IDE (2016, www.ide.cl).

Según la clasificación anterior, se distribuyeron 70 parcelas de muestreo, de las cuales 35 se localizan en el área urbana, y 35 en el área peri-urbana. La cantidad de parcelas de muestreo propuestos corresponde a lo ofrecido por los consultores que realizan este estudio en la propuesta de licitación entregada en Mercado Público, y que posteriormente el mandante aceptó. El número de parcelas fue determinado en función del presupuesto ofrecido para llevar a cabo este estudio, asegurando que la distribución de estas parcelas permitiera representar la mayor diversidad de composición y estructura de la vegetación y arbolado. Como se mencionó, en la propuesta inicial de licitación, se comprometieron 70 parcelas y dadas las facilidades de muestreo que se visualizaron en el terreno, se agregaron 7 parcelas para aumentar la representatividad de la muestra, dando 77 parcelas totales.

Los criterios de selección de áreas de interés para definir la localización de las parcelas de muestreo fueron propuestos en base a la experiencia del equipo consultor y de común acuerdo con el mandante; son los siguientes:

1. Alta densidad de individuos arbóreos, tanto en área urbana como peri-urbana, las parcelas de muestreo fueron localizadas en bosquetes en que la masa vegetacional tenga alta presencia de individuos de especies arbóreas, es decir bosques densos.

2. Estado de desarrollo maduro en árboles, los árboles deben presentar estados de desarrollo maduros, es decir con Diámetro a la Altura del Pecho (DAP¹¹) mayor a 10 [cm], para el caso de bosques en áreas peri-urbanos y 20 [cm] para bosques en áreas urbanas; y alcanzar alturas superiores a 5 [m].

6.1.1 Áreas de muestreo en área peri-urbana

Para la selección de las áreas de muestreo en sectores peri-urbanos, se escogieron con el mandante, predios que cuenten con áreas de preservación de bosque nativo, de preferencia áreas destinadas a la conservación. Además, se incluyeron predios administrados por privados con presencia de bosque nativo con bajo nivel de impacto antrópico, es decir, lugares cercados, con ingreso restringido, y baja o nula presencia de actividades de explotación.

Una vez definidos los predios, se analizaron desde imágenes satelitales mediante Google Earth Pro evidenciando los sectores con mayor cantidad de masa boscosa, para ello se apoyó con los shapefiles derivados del estudio de CONAF y CIREN (2013) sobre clasificación del bosque nativo de la zona central de Chile. Esto permitió determinar los puntos exactos de las parcelas de muestreo, quedado definidas dentro de parches con densidades de bosque denso, categorías definidas en el reporte de CONAF y CIREN (2013).

La Figura 16 muestra un ejemplo de visualización del shapefile de un área peri-urbana, donde aparecen las coberturas de bosque denso, es decir con más de 75% de cobertura de bosque. Cabe mencionar que en dicha figura no se presentan límites administrativos dada la escala en que es mostrada, puesto que tiene por objeto facilitar al lector la visualización de los polígonos según coberturas de bosque entregados por CONAF y CIREN (2013).

¹¹ Diámetro del tronco de un árbol que se mide a la altura del pecho, considerado universalmente a 1,3 m sobre el suelo.

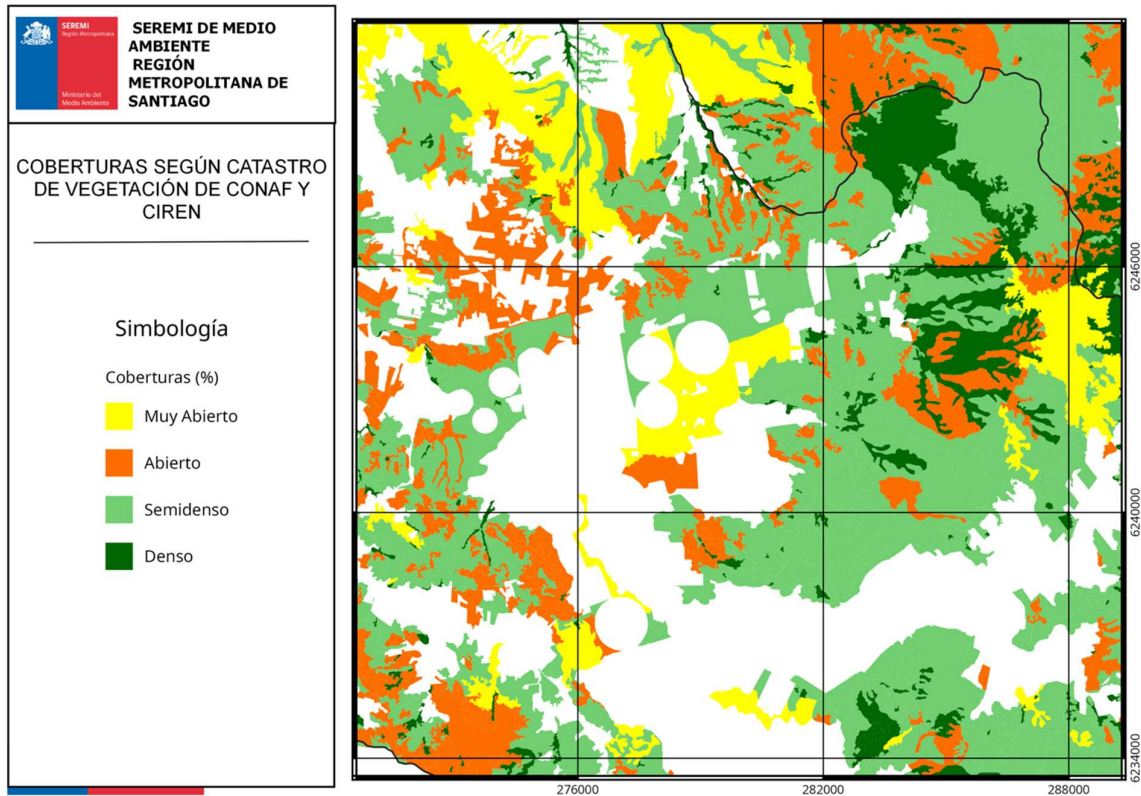


Figura 16. Densidades de bosque según estudio de CONAF y CIREN (2013). Fuente: Elaboración propia a partir de datos de CONAF y CIREN (2013).

6.1.2 Áreas de muestreo en áreas urbanas

Para la selección de las áreas de muestreo en sectores urbanos, se trabajó en base al shapefile de INE (2016), que define todas las áreas verdes de uso público dentro de la RMS, y que se muestran en la Figura 17. Los criterios definidos a continuación fueron acordados con el mandante.

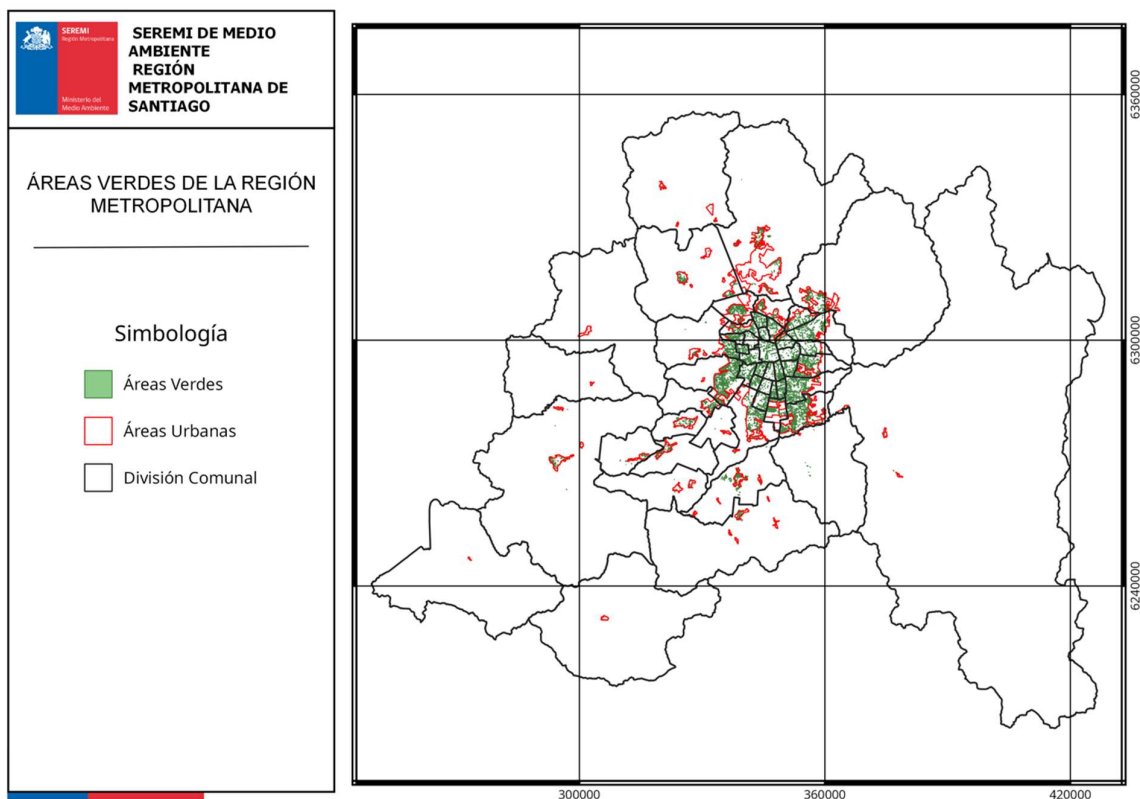


Figura 17. Áreas verdes de uso público de la RMS. Fuente: Elaboración propia a partir de datos de INE, 2016.

Considerando la baja dispersión del MP10, se utilizó como criterio de selección de las áreas verdes, que los puntos de muestreo se encuentren a una distancia máxima de 5 [km] de alguna estación de la Red MACAM. Este buffer de 5 [km] fue definido en base al trabajo del SEA (2012), que expone que las mediciones pierden representatividad a partir de esta distancia desde el lugar de medición. Habiendo realizado el filtro desde el buffer, se identificaron todas las áreas verdes que tuvieran una superficie mínima de 0,5 [Ha], siendo una superficie que permite el establecimiento de mayor cobertura arbórea. Finalmente, la distribución de las parcelas de muestreo en el área urbana, fue definida con objeto de incluir la mayor representatividad territorial de la vegetación urbana, abarcando la mayor cantidad de comunas dentro del área del PRMS.

6.2 Objetivo específico b) Caracterización del arbolado en las áreas de muestreo definidas de la Región Metropolitana de Santiago.

Con la finalidad de guiar la comprensión del lector en la Figura 18 se expone un diagrama de flujo que integra las secciones metodológicas que tienen por finalidad la caracterización de la vegetación presente en el área de estudio y la estimación de la depositación de MP10 por dicha vegetación.

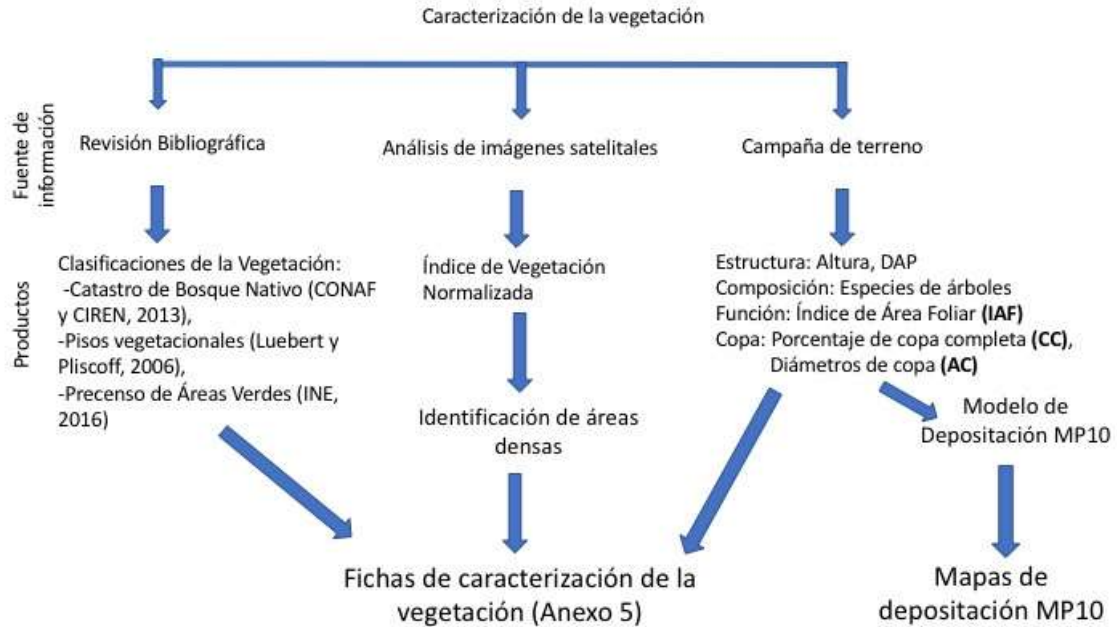


Figura 18. Esquema de ordenamiento metodológico.

Como muestra la Figura 18 la caracterización del arbolado en las áreas de muestreo, se realizará en base a tres fuentes de información: revisión bibliográfica, análisis de imágenes satelitales y toma de datos del área de muestreo mediante de una campaña de terreno (Sección Campaña de terreno) Estos tres niveles de análisis se realizarán tanto para el área urbana como peri-urbana.

La revisión bibliográfica incluye el Catastro del Bosque Nativo (CONAF y CIREN, 2013), Clasificación de Pisos Vegetacionales de Luebert y Pliscoff (2006) para áreas peri-urbanas y el Precenso de Áreas Verdes del INE (2016) para el caso de las áreas urbanas. Además se incluye el análisis espacial a través de los archivos vectoriales de las fuentes de información mencionadas.

La segunda fuente de información proviene del análisis de imágenes satelitales, específicamente del producto de Índice de Vegetación Normalizada (NDVI). Este análisis permite identificar la cobertura arbórea dentro de cada parcela de muestreo. Para el caso de las parcelas urbanas se podrá distinguir en las áreas verdes, la sección de esta que corresponde a superficies continuas de verde que cubran áreas mayores a 500 m² y que presentan peak de productividad primaria en primavera. Esto último permite discriminar entre vegetación arborea y otros tipos de vegetación dentro de las áreas verdes.

Para esto se utiliza la información derivada del análisis de imágenes satelitales Sentinel 2, con una resolución de 10 [m]. A partir de esta se calcula el NDVI, que es un indicador de la actividad fotosintética de la vegetación. Para obtener este índice se emplean las bandas NIR (infrarrojo cercano) y Red (roja) (Figura 19 y Tabla 7). Para este análisis se utilizaron imágenes del 9 de Septiembre 2019 para el análisis de la productividad de primavera y 5 de Agosto del 2019 para el analisis de productividad de invierno.

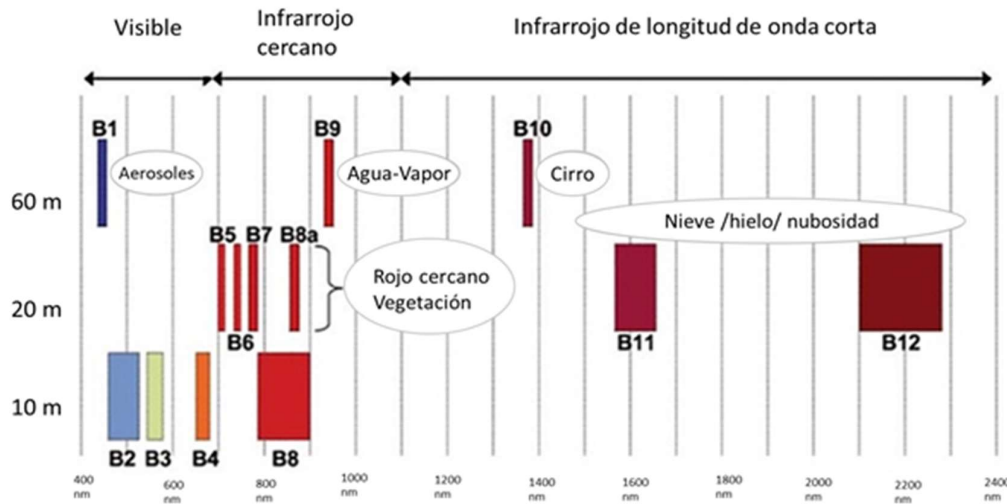


Figura 19. Bandas espectrales. Fuente: Centro de Investigaciones Geoespaciales (CIG), Copernicus, ESA, EFFIS y JRC (2019).

Tabla 7. Longitudes de onda para Bandas 4 y 8, del satélite Sentinel de resolución 10 m.

Banda de Sentinel 2	Longitud de onda central [μm]
Banda 4 (Red)	0,665
Banda 8 (NIR)	0,842

Fuente: Centro de Investigaciones Geoespaciales (CIG), Copernicus, ESA, EFFIS y JRC (2019).

Para la separación entre vegetación herbácea y arborea, se utilizará la banda roja y el NDVI de invierno, definiendo como vegetación arborea aquella que presenta valores de NDVI mayores a 0,4 y reflectividad menor a 1000 en la banda del rojo, y la vegetación herbácea la con valores de NDVI menores a 0,4 y reflectividad en el rojo sobre 1000. Además se complementa este análisis identificando los píxeles en los cuales se presenta un incremento muy alto del NDVI durante la primavera, lo cual corresponde a vegetación de tipo herbácea que presenta un peak de productividad durante esta estación.

La información resultante de la caracterización del arbolado en las áreas de muestreo definidas de la RMS tanto desde revisión bibliográfica, revisión de información presente en archivos shapes, análisis de NDVI y la información sobre caracterización de la vegetación a nivel de parcela medida en la campaña de terreno (descrita en la siguiente sección), será expuesta en fichas resumen para cada una de las parcelas de muestreo medidas. En las Tabla 8 y 9 se muestran fichas tipo para área peri-urbana y urbana, respectivamente.

Tabla 8. Ficha área peri-urbana.

Nombre de la Parcela (asociado al nombre del Predio visitado)	
Fotografía vista aérea	Fotografía general de la parcela
Administración	
Comuna	
Formación vegetacional	
Zona de análisis	
Valor NDVI (primavera) Valor NDVI (invierno)	
Composición y estructura de la parcela Cobertura arbórea Individuos en la parcela Individuos por hectárea Área basal Índice de Área Foliar	
Caracterización de individuos muestreados Riqueza de especies Altura \bar{x} DAP \bar{x} Copa viva \bar{x} Daño copa viva \bar{x} Índice de Área Foliar	

Tabla 9. Ficha área urbana.

Nombre de la Parcela (asociado al nombre del área verde visitada)	
Fotografía vista aérea	Fotografía general de la parcela
Administración	

Comuna	
Superficie del área verde	
Valor NDVI (primavera) Valor NDVI (invierno)	
Composición y estructura de la parcela Cobertura arbórea Individuos en la parcela Individuos por hectárea Área basal Índice de Área Foliar	
Caracterización de individuos muestreados Riqueza de especies Altura \bar{x} DAP \bar{x} Copa viva \bar{x} Daño copa viva \bar{x} Índice de Área Foliar \bar{x}	

6.2.1 Campaña de terreno

La tercera fuente de información es la realización de campañas de terreno, que tienen por finalidad obtener datos reales de la vegetación, medidos en árboles del bosque nativo en áreas peri-urbanas y de árboles presentes en áreas verdes medidos en áreas urbanas, para caracterizar la vegetación de las parcelas de muestreo.

Parte de los datos que se registran desde las parcelas de muestreo, son los necesarios para introducir en el modelo I-Tree para obtener los resultados de la depositación de MP10 por la vegetación, por ejemplo los relacionados a la copa de los árboles, y al Índice de Área Foliar. También se registran datos que permiten describir la estructura y composición de las masas de vegetación medidas, para caracterizar el arbolado en estudio a nivel de parcela, por ejemplo la riqueza de especies presentes en cada parcela de muestreo y el número de estratas de vegetación.

Las parcelas de muestreo que se planificó realizar en la campaña de terreno de verano, son las que se describen en las secciones siguientes de Áreas de muestreo peri-urbanas y Áreas de muestreo urbanas.

6.2.1.1 Mediciones de variables e instrumentos utilizados.

1. Registro de coordenada GPS. Utilizando un equipo Garmin GPSMAP 64 S, se marca el punto central de cada parcela. Las coordenadas geográficas quedan guardadas en la memoria del dispositivo en Sistema de Coordenadas UTM, Datum WGS84, Huso 19,

asociado al ID de cada parcela de muestreo. Esta información será descargada en gabinete, posterior a la visita a terreno, obteniéndose un archivo shapefile con todas las parcelas de muestreo realizadas. Las coordenadas geográficas de cada parcela son tabuladas en la planilla de muestreo, a modo de respaldo de este dato.



Figura 20. Equipo Garmin GPSMAP 64 S a utilizar en campaña de terreno. Fuente: Elaboración propia.

2. Conteo de individuos arbóreos. Dentro del área de 400m² de la parcela de muestreo, se registra el número de individuos arbóreos presentes en la parcela. Se contabilizan todos los individuos cuya altura sea superior a 3 m, pues son los que realizarán aportes a las mediciones de Índice de Área Foliar.
3. Número de vástagos. Esta información corresponde a la cantidad de troncos o fustes (vástagos) que posee un individuo arbéreo. En el bosque esclerófilo presente en la RMS, es frecuente encontrar individuos de especies tales como *Quillaja saponaria* y *Lithraea caustica*, con presencia de varios vástagos, derivado de la extracción del fuste principal (explotación), lo que genera procesos fisiológicos internos en el individuo que se traducen en la brotación de nuevos y múltiples vástagos desde el tocón del árbol que queda.



Figura 21. Individuos de *Lithraea caustica* con varios vástagos. Fuente: Autoría propia.

4. DAP (Diámetro a la Altura del Pecho, [cm]). El DAP corresponde al diámetro que posee el fuste de un árbol a los 1,3 [m] desde el suelo, altura a la que se encuentra en promedio el pecho de una persona (promedio mundial) (Figura 23). Esta medición se realiza utilizando una huincha diamétrica (Figura 22), huincha especial para medir el diámetro de objetos cilíndricos como lo es el fuste del árbol, en que las graduaciones de la regla están tabuladas para indicar directamente el diámetro del objeto al utilizarla sobre el perímetro de éste.

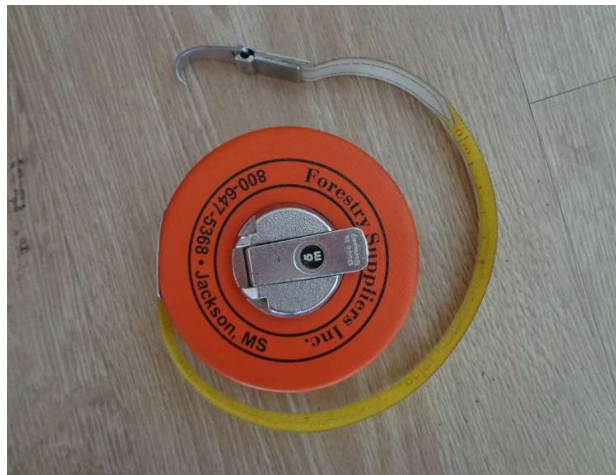


Figura 22. Huincha diamétrica. Fuente: Elaboración propia.

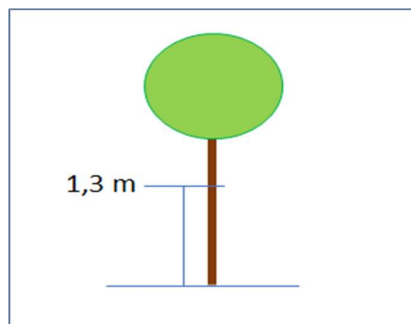


Figura 23. Medición del diámetro a altura del pecho (DAP). Fuente: Elaboración propia.

En casos de árboles con varios vástagos, cuando sean dos, se promedian los DAP de ambos vástagos y se registra este promedio; en caso de presentar más de dos vástagos, se mide y registra el DAP del vástago promedio. En la Figura 24 se muestran dichos casos.

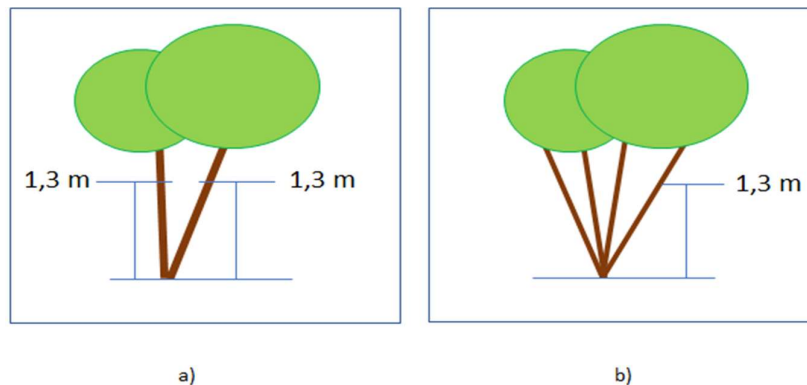


Figura 24. Medición de DAP en casos de varios vástagos. a) Corresponde a la medición del DAP en un árbol con dos vástagos en que se promedian ambos DAP; b) Corresponde a la medición del DAP en un árbol con múltiples vástagos, en que se registra el DAP de un vástago promedio. Fuente: Elaboración propia.

5. IAF (Índice de Área Foliar). Corresponde a un índice adimensional que resulta de la división aritmética del área de todas las hojas de un árbol (expresada en m^2) y el área de suelo sobre el cual se encuentra establecido el árbol (expresado en m^2).

El IAF será medido con un instrumento llamado ceptómetro linear moldeo Decagon AccuPar LP-80 (Figura 25), instrumento que censa la cantidad de radiación solar. La medida de radiación solar es transformada automáticamente en valores de IAF (m^2 follaje/ m^2 en la superficie proyectada).



Figura 25. Ceptómetro Decagon AccuPar LP-80 utilizado para la medición del Índice de Área Foliar. Fuente: Autoría propia.

Este instrumento debe ser calibrado previo a realizar las mediciones. La calibración consiste en posicionar la varilla en un área donde llegue la radiación solar directamente (sin interceptar ningún elemento vegetal), de manera de registrar esa cantidad de radiación como “sin canopia”, se debe configurar esta medición en el instrumento. Luego de la calibración, se debe posicionar la varilla del ceptómetro bajo la copa de un árbol, en que la cantidad de radiación será menor que la establecida en la calibración, entregando un valor de IAF que irá entre 0 y 10, cuanto más bajo el valor de IAF, menos es el área foliar de la copa del árbol.

En algunas ocasiones el instrumento podría arrojar un evidente valor errado, por ejemplo cuando el ceptómetro entregue valores bajos de IAF en parcelas en que no se vislumbren puntos de radiación directa solar, se entiende a priori desde la experiencia del equipo de muestreo en terreno, que en estas condiciones el valor de IAF debiera ser más alto que 2, por tanto, se debe proceder a re-calibrar el instrumento posicionando nuevamente la varilla en un área donde llegue la radiación solar directa, y configurando este punto en el instrumento como “sin canopia”.

6. Cobertura estrata arbórea (%). Esta información indica el porcentaje de cobertura de todas las copas de los árboles presentes dentro de la parcela, se determina mediante estimación visual. Para definir este porcentaje, se recorre de manera pedestre la superficie de la parcela de muestreo (400 m²) mirando hacia las copas de los árboles, observando qué tan cubierta está la superficie de la parcela por las copas. En la Figura 26, se ejemplifica esta medición.

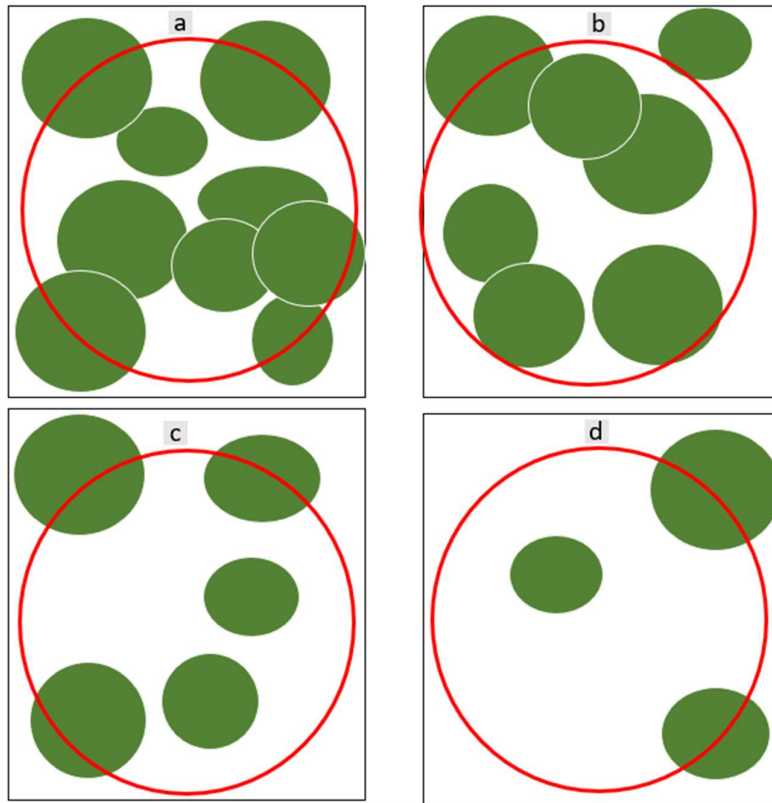


Figura 26. Coberturas de estrata arbórea a nivel de parcela. a)80%, b)50%, c)30, d)10%. Fuente: Elaboración propia.

7. Altura del árbol [m]. Se registra la altura de todos los árboles presentes en la parcela de muestreo, cuyo DAP sea mayor a 10 [cm], la altura corresponde al largo total del árbol desde el nivel del suelo hasta su parte más alta (Figura 27).

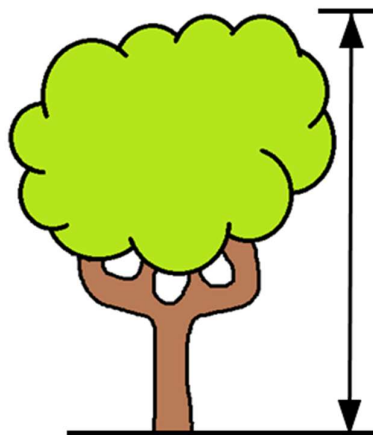


Figura 27. Altura del árbol. Fuente: Elaboración propia.

La medición de altura se realiza mediante un instrumento llamado hipsómetro (hipso- altura, metro-medición, Figura 28), el cual entrega directamente la medida de altura [m]. El mecanismo por el cual trabaja según la teoría de Trigonometría, específicamente

en la fórmula de la tangente ($\text{tangente}(\text{ángulo}) = \text{cateto adyacente} / \text{cateto opuesto}$), al conocer la distancia que existe entre el observador y el árbol ($\text{cateto adyacente} = 15 \text{ [m]}$, dado por factura del instrumento), y el ángulo de inclinación (ángulo), el instrumento tringula entregando el valor del cateto opuesto que corresponde a la altura del árbol.



Figura 28. Hipsómetro. Fuente: Autoría propia.

Para lo anterior, existen dos opciones: la primera es que el observador se encuentre más alto que el punto de observación del árbol (parte más baja y parte más alta del árbol) en cuyo caso el valor de altura dará valor negativo; el segundo caso, es que el observador se encuentre por debajo del punto de observación del árbol, en valor de altura será entregado por el hipsómetro con signo positivo. Cuando los valores sean del mismo signo, deben ser restados, y cuando los valores sean con signo negativo deben ser sumados. Estas situaciones son ejemplificadas en la Figura 29.

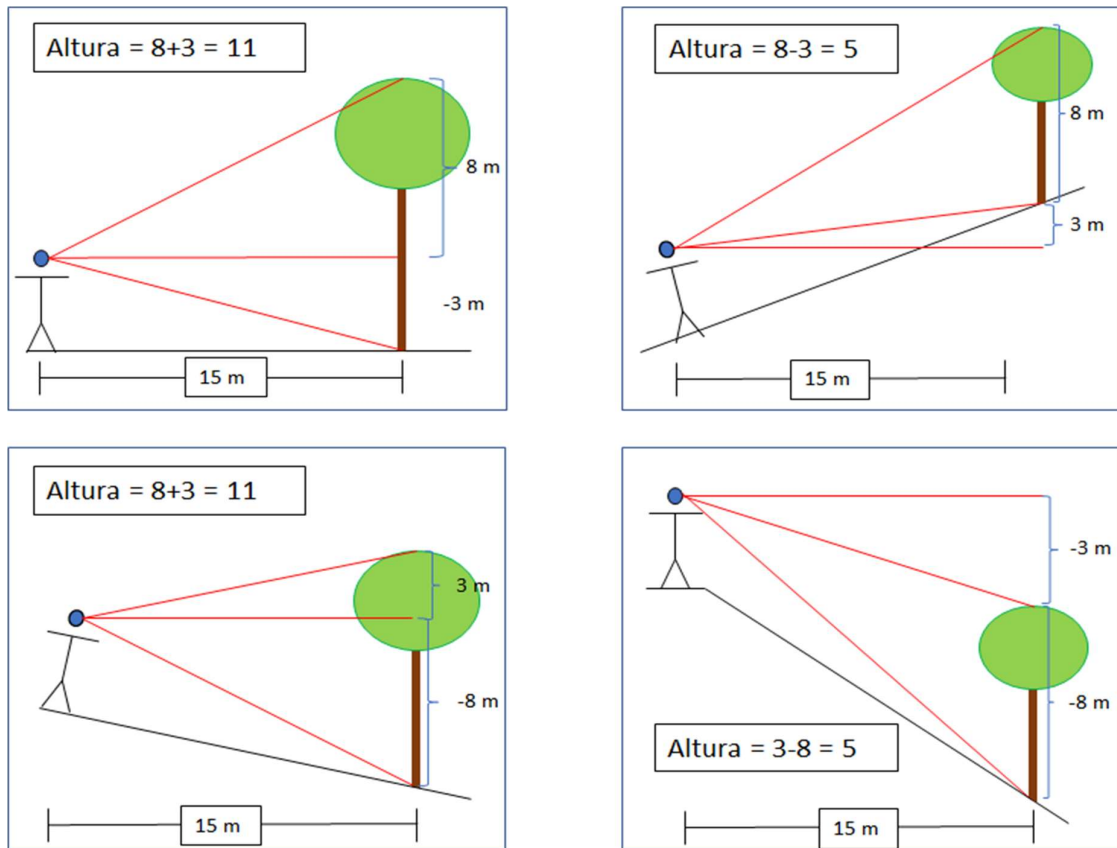


Figura 29. Medición de altura con hipsómetro según puntos de observación de quién realiza la medición. Fuente: Elaboración propia.

8. Altura inicio de copa [m]. Esta medición corresponde a la distancia que existe desde el nivel del suelo hasta la rama desde la cual salen las hojas de la copa del árbol que se encuentran más bajas (Figura 30). La medición se realiza con una huincha métrica.

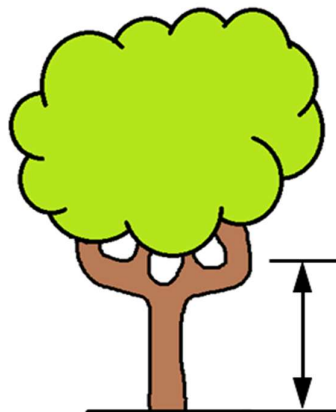


Figura 30. Altura de inicio de copa. Fuente: elaboración propia.

9. Diámetros de copa en orientaciones Norte-Sur (NS) y Este-Oeste (EO) [m]. Estas mediciones entregan datos sobre el tamaño de la copa del árbol. Se medirán utilizando

una huincha métrica posicionada en la orientación NS y EO, en que se mide la distancia de las hojas extremas en cada orientación (Figura 31).

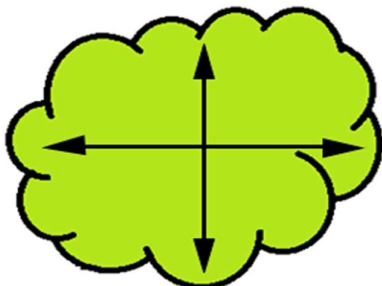


Figura 31. Medición de diámetro de copa. Fuente: Elaboración propia.

10. Porcentaje de copa viva (%): El porcentaje de copa viva corresponde a la proporción del follaje que está vivo del total de la copa de un árbol. Ramas caídas, ramas muertas, o la inclinación del follaje hacia un lado (ausencia de follaje en el otro lado), evidencia que la copa no está en su 100% de completitud. Cuanto más bajo el porcentaje de copa viva, el árbol presenta menos vigor, por tanto su cantidad de hojas no es el óptimo. Esta variable será estimada mediante percepción visual. En la Figura 32, se ejemplifica la gradiente de porcentajes de copa viva. Esta medición será registrada solamente durante la campaña de primavera-verano, cuando las especies caducas presentan su follaje desplegado.

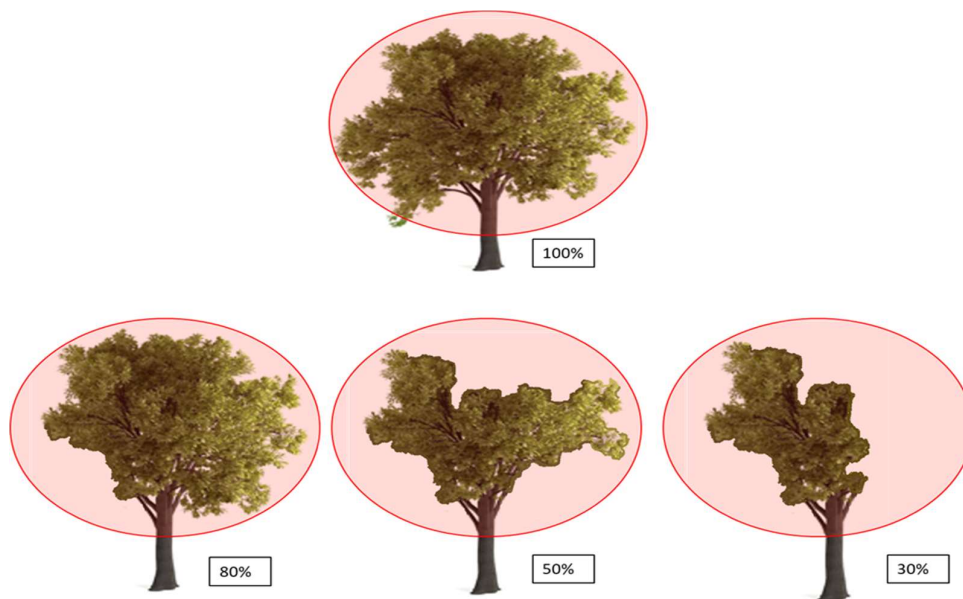


Figura 32. Porcentajes de copa viva. Fuente: Elaboración propia.

11. Porcentaje de daño de la copa: corresponde al estado de salud de la copa del árbol. Este valor es estimado mediante percepción visual, y teniendo en cuenta la medición anterior sobre porcentaje de copa viva, se define el daño que posee la copa existente. La pregunta a la que responde esta variable es ¿Qué porcentaje de la copa existente en el árbol presenta algún grado de amarillamiento de sus hojas? Cuando el follaje es sano y

uniformemente verde, el valor asignado es de 0%, mientras que una copa con presencia de cierto porcentaje de hojas amarillas, el porcentaje irá desde 0% hasta 100%, este último caso se da cuando las hojas del árbol están todas muertas. La Figura 33 ejemplifica esta variable.

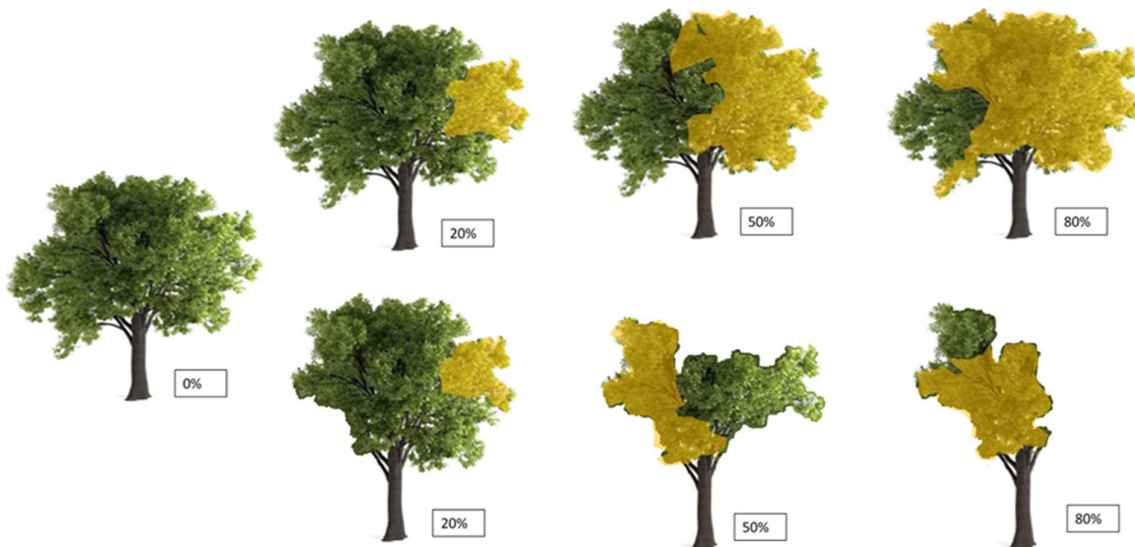


Figura 33. Porcentajes de daño de la copa. La sección amarilla corresponde a la parte de la copa que presenta hojas de colores amarillos y rojos. Fuente: Elaboración propia.

12. Fotografías: Cada parcela de muestreo será registrada mediante fotografías generales del estado de la parcela. Este registro permite dar apoyo a las mediciones anteriormente descritas.

6.2.1.2 Pasos para el levantamiento de datos en terreno

Paso 0. Planificación de la campaña de terreno en gabinete.

Habiendo definido los predios del área peri-urbana y las áreas verdes del áreas urbanas a visitar durante la campaña de terreno, descritas en las siguientes secciones Áreas de muestreo peri-urbanas y Áreas de muestreo urbanas, se elaboró un archivo de formato *kmz* (utilizando el software Qgis) con la localización específica en que se establecerán las parcelas de muestreo, esto mediante la observación de imágenes satelitales desde Google Earth Pro. Para el caso de las áreas urbanas, las parcelas de muestreo fueron localizadas dentro del área verde, en lugares en que se observe mayor densidad de la masa arbórea, como se muestra en la Figura 34, y para las áreas peri-urbanas las parcelas se localizan en parches de vegetación clasificada como cobertura densa, como se ejemplificó en la Figura 16.



Figura 34. Selección de localización de parcela de muestreo en áreas urbanas. Fuente: Google Earth Pro.

Para el caso de las áreas peri-urbanas, la visualización por el Google Earth Pro, se complementó con la visualización del shapefile de CONAF y CIREN (2013) sobre densidades de bosque para la RMS, en que se seleccionaron los polígonos cuya densidad de bosque fueran del tipo denso se localizaron las parcelas dentro de este tipo de polígonos.

El archivo resultante (.kmz) se carga en el dispositivo GPS, para que una vez en el terreno se pueda llegar al punto exacto definido en el gabinete.

Paso 1. Llegada a parcela de muestreo desde archivo kmz.

Habiendo llegado al lugar designado para establecer la parcela de muestreo en el terreno, lo primero es verificar la presencia de masa vegetacional de interés para muestrear, de ser efectiva la presencia, se procede a continuar con el paso 2.

De no ser evidente la presencia de vegetación de interés para el muestreo, ya sea porque el lugar ha sido impactado recientemente, o bien la clasificación realizada por CONAF y CIREN (2013) difiere de la realidad del terreno, se procede a realizar un recorrido pedestre, con la finalidad de relocalizar la parcela de muestreo correspondiente a ese predio o área verde, hacia un lugar en que sí se presente vegetación de interés de tipo densa, con individuos con alturas sobre 5 [m] y DAP superiores a 10 y 20 [cm] para peri-urbano y urbano respectivamente. Luego se procede al paso 2.

Paso 2. Establecimiento de la parcela de muestreo.

Al llegar al punto definido en el archivo kmz, se marca el punto central de la parcela, mediante el dispositivo GPS, y a modo de respaldo se registran las coordenadas geográficas en la planilla de muestreo, junto con el nombramiento de la parcela mediante un ID, por ejemplo la Parcela 1 en Parque Natural San Carlos de Apoquindo, su ID es "SC1".

A partir de la marcación de punto central se procede al establecimiento de la parcela de muestreo mediante dos huinchas métricas extendidas hasta los 22 [m]. Para visualizar los

límites de la parcela de muestreo se extienden dos huinchas métricas, una en la orientación norte-sur y la otra en la orientación este-oeste, en que el valor de 11 [m] de cada huincha debe quedar en el punto central de la parcela, luego cada huincha se extiende hasta los 22 [m]. Este trazado da un total aproximado de 400 [m²] de parcela circular, cuyo radio es de 11 [m]. ($\text{Pi} \cdot 11^2 = 400$). Esta dimensión de las parcelas de muestreo es especificada y requerida por el modelo I-Tree.

Paso 3. Caracterización de la parcela de muestreo.

Una vez visibilizada el área de la parcela, se registra el número de estratas presentes en ésta, siendo éstas 1. Arbórea, 2. Arbustiva y 3. Herbácea. Además, se estima visualmente la cobertura de la estrata arbórea (0 a 100%) y se cuenta el número de árboles del estrato arbóreo cuyas copas se encuentren sobre 3 [m] de altura. Complementario a lo anterior, se realizan 5 mediciones de IAF con el Ceptómetro: una en cada punto cardinal de la parcela (a 9 [m] desde el centro de la parcela, para evitar tomar datos del borde de ésta) y otra en el centro de la parcela. Por último, se realiza registro de la parcela mediante al menos 2 fotografías. Las mediciones a nivel de parcela se registran en la planilla de muestreo mostrada en la Tabla 10.

Tabla 10. Planilla de muestreo utilizada para registro de mediciones en terreno realizadas en la parcela.

Lugar	ID Parcela	Coordenadas	# estratas	Cob estrato arboreo	IAF centro	IAF Norte	IAF Sur	IAF Este	IAF Oeste	# Árboles	Fotos

Paso 4. Caracterización de los árboles presentes en las parcelas de muestreo.

Se caracterizará todos los árboles presentes dentro de la parcela cuyo DAP sea mayor a 10 [cm]. Se registrará su especie, su número de vástagos, DAP, se medirá la altura del inicio de su copa desde el suelo, los diámetros de copa en orientación Norte-Sur y Este-Oeste, y se medirá su IAF en los 4 puntos cardinales (a 50 [cm] desde el centro del árbol, con la varilla del ceptómetro apuntando hacia su tronco), se registrará el promedio de IAF por árbol. Finalmente, mediante estimación visual se definirá el porcentaje de copa completa (0 a 100%), y el nivel de daño que presente dicha copa (0 a 100%). Las mediciones de caracterización de los árboles se registran en la planilla de muestreo mostrada en la Tabla 11.

Tabla 11. Planilla de muestreo utilizada para registro de mediciones en terreno realizadas en árboles.

Lugar	Especie	ID	Altura [m]	DAP [cm]	Diámetro copa Norte-Sur [m]	Diámetro copa Este-Oeste [m]	Altura inicio copa [m]	COB copa completa (%)	Daño de copa (%)	IAF	Fotos

6.3 Objetivo específico c) Propuesta de modelo que permita monitorear y cuantificar el aporte del arbolado para remover material particulado - MP10 por Resuspensión - por las coberturas arbóreas.

En esta sección, se describe y justifica el modelo I-Tree de depositación de MP10 a utilizar para calcular la depositación de MP10 por masas vegetacionales de la RMS. Se describen las ecuaciones del modelo y las variables necesarias para obtener los datos que serán inputs para ser utilizados en el cálculo de depositación de MP10. En la Figura 35 se presenta un diagrama explicativo para orientar el entendimiento sobre el funcionamiento del modelo I-Tree que se utilizará para el cálculo de depositación y que será abordado en las siguientes secciones.

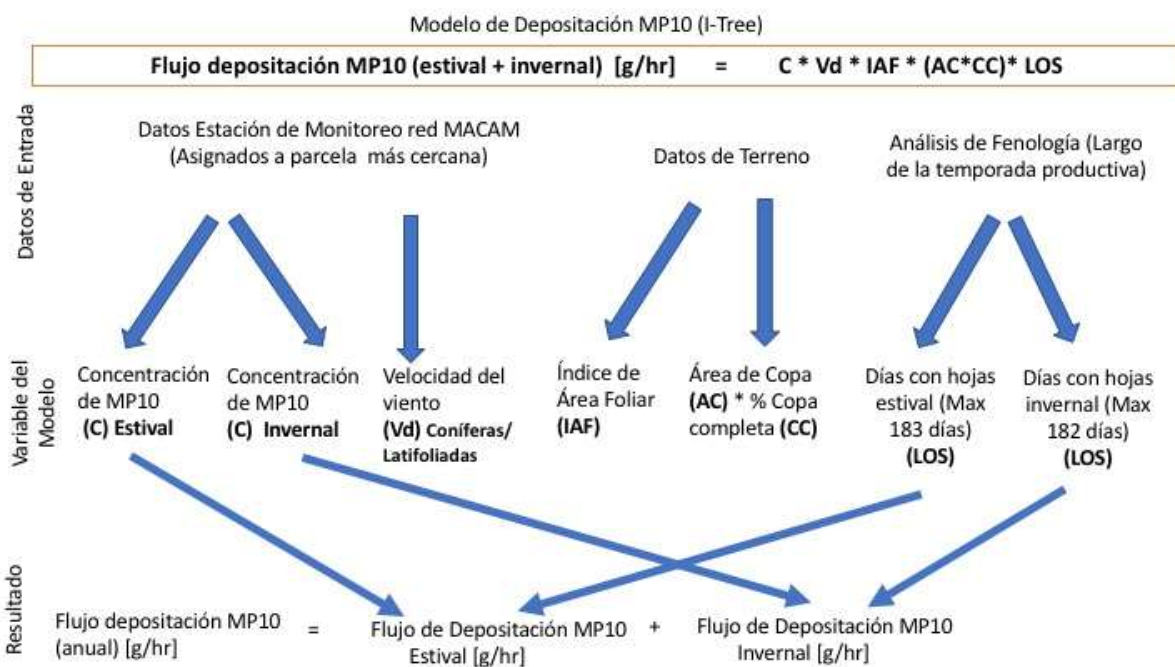


Figura 35. Diagrama de flujo sobre el uso de Modelo de Depositación de MP10. Fuente: elaboración propia.

Donde,

Datos Estación de Monitoreo red MACAM se describe en la Sección Obtención y análisis de concentración de MP10 en la Región Metropolitana de para ser utilizado en modelo I-Tree y sección Obtención y análisis para velocidades de vientos para ser utilizado en el modelo I-Tree;

Datos de terreno se describe en la Sección Estructura y composición de bosques peri-urbanos medidos en campaña de terreno y sección Estructura y composición del arbolado urbano medido en campaña de terreno;

Análisis de Fenología se describe en la Sección Obtención de periodo con hojas de árboles caducifolios a través de análisis fenológico de la vegetación de la Región Metropolitana para ser utilizado en modelo I-Tree.

6.3.1 Descripción de la herramienta I-Tree

De acuerdo a lo revisado de los modelos disponibles en la literatura internacional, es pertinente utilizar el modelo I-Tree para la evaluación de la depositación de MP10, dado que el modelo es ampliamente utilizado, permitiendo a través de mediciones simples y datos disponibles, estimar la depositación seca de MP10 por masas vegetacionales.

Cabe agregar, que el modelo ya ha sido aplicado anteriormente a la ciudad de Santiago (RMS) tanto en el año 2002 (Escobedo y Nowak, 2009) como el 2014 (Fondecyt 1140319, datos no publicados). Este modelo permite de manera no costosa ampliar el muestreo en etapas futuras y monitorear el progreso del potencial de depositación de MP10 por masas vegetacionales después de implementados los Programas de Compensación de Emisiones.

I-Tree son una serie de herramientas libres y basadas en ciencia que permiten cuantificar los beneficios del arbolado urbano y su valor monetario, permitiendo apoyar la gestión y el reconocimiento del arbolado como elemento fundamental dentro y alrededor de las áreas urbanas. La herramienta fue desarrollada por el Servicio Forestal de Estados Unidos en el año 2006 y se encuentra basado en el antiguo UFORE desarrollado por investigadores del mismo Servicio Forestal el año 2000, ha sido utilizado por una variedad de municipios, organizaciones no gubernamentales, investigadores y estudiantes. La herramienta puede estimar a variadas escalas los beneficios de los árboles, desde árboles individuales a regiones completas. La herramienta se deriva del trabajo conjunto de Servicios Forestal, Davey Tree Expert Company, National Arbor Day Foundation, Society of Municipal Arborists, International society of Arboriculture and Casey Trees¹².

La herramienta a través de información de estructura (tamaños) y composición (diversidad) de arbolado en terreno permite cuantificar una serie de servicios ecosistémicos, dentro de los cuales se encuentra la depositación de MP10. Esta aproximación produce resultados útiles para

¹² www.itreetools.org

la gestión del arbolado, valores de una variedad de servicios ecosistémicos y puede utilizarse para el monitoreo de alguna variable ambiental o del arbolado en sí.

La herramienta cuenta con la posibilidad de realizar los cálculos de servicios ecosistémicos derivados de imágenes satelitales de media a alta resolución. Cuenta con varios módulos dentro de los cuales se incluye los de cuantificación de servicios ecosistémicos y por ende el de depositación de MP10, que son I-Tree Eco, I-Tree Landscape e I-Tree Canopy. I-Tree Eco es una herramienta de escritorio que cuantifica la estructura, las amenazas, los beneficios y los valores provistos de depositación de MP10 desde las poblaciones de árboles.

I-Tree Landscape es una aplicación web que de manera rápida permite cuantificar información del bosque y la población de la ciudad, áreas en riesgo para priorizar plantaciones y protección de éstas. I-Tree canopy es una herramienta web que permite estimar las coberturas de suelo y sus servicios ecosistémicos asociados a partir de imágenes de Google Earth, permitiendo realizar análisis temporales (www.itreetools.org). Además, cuenta con otra serie de módulos para selección de especies, modelación de la hidrología asociada al arbolado, proyecciones de servicios ecosistémicos futuros y beneficios de nuevas plantaciones, entre otras.

6.3.2 Modelos utilizados por la herramienta I-Tree para el cálculo de depositación de MP10

Esta sección describe las ecuaciones y supuestos utilizados para estimar la depositación, la sección siguiente define las variables que alimentan el modelo.

Para la estimación de la depositación se utilizará el módulo I-Tree ECO de la herramienta I-Tree. Este módulo estima servicios ecosistémicos del arbolado, tales como captura y secuestro de carbono, depositación de contaminantes atmosféricos, emisiones de compuestos orgánicos volátiles y de polen.

Para el presente proyecto sólo se estimará la depositación de MP10. La aplicación del modelo puede ser a nivel de árbol o a nivel de unidad muestral (parcela de muestreo). Para el caso del presente proyecto, se realiza la estimación en ambas escalas, para obtener depositaciones por tipo de cobertura y por tipo de especie de árbol.

Para la depositación, el modelo utiliza datos levantados desde terreno sobre estructura y composición de la vegetación, junto a datos meteorológicos y de concentración de contaminantes para estimar la depositación.

La herramienta I-Tree Eco estima la depositación seca basado en el flujo de los contaminantes (Hirabayashi et al., 2012) la cual se encuentra dada por el producto de la velocidad de depositación y la concentración del contaminante:

$$F = V_d \times C$$

$$F_{min} = V_{d,min} \times C$$

$$F_{max} = V_{d,max} \times C$$

Donde: F = Flujo del MP10 [g/hr], F_{min} = Flujo mínimo del MP10 [g/hr], F_{max} = Flujo máximo del MP10 [g/hr], V_d = Velocidad de depositación [m/s], V_{dmin} = Velocidad mínima de depositación [m/s], V_{dmax} = Velocidad máxima de depositación [m/s] y C = Concentración atmosférica del MP10 [g/hr].

Para el cálculo de la velocidad de depositación, se asume que sólo existe depositación en los períodos en que el árbol tiene hojas (in-leaf period, especies caducas) y se deriva de los cálculos realizados por Lovett (1994), donde define velocidades de depositación promedio, mínimas y máximas, de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$V_d = V_{d,PM,promedio} \times \frac{BAI + IAF}{BAI + IAF_{MP10}}$$

$$V_{d,min} = V_{d,PM,min} \times \frac{BAI + IAF}{BAI + IAF_{MP10}}$$

$$V_{d,max} = V_{d,PM,max} \times \frac{BAI + IAF}{BAI + IAF_{MP10}}$$

Donde $V_d, PM, Promedio$ = Velocidad de depositación promedio para MP10 (=0,64 m/s) , $V_{d,PM,min}$ = Velocidad de depositación mínima para MP10 (=0,25 m/s) , $V_{d,PM,max}$ = Velocidad de depositación máxima para MP10 (=1,00 m/s) , IAF_{MP10} = Índice de área foliar para la depositación de la partícula, asume valor = 6, BAI = Índice de la corteza, IAF = índice de área foliar. Se debe mencionar que el índice de corteza, es una variable poco utilizada en la mayoría de los estudios de que aplican este modelo (Hirabayashi et al., 2012; Escobedo y Nowak, 2009).

Este cálculo se puede aplicar a nivel de individuo (árbol) o a nivel de unidad muestral (parcela). Para aplicarlo a nivel de individuo se debe ingresar el área foliar del individuo y para hacer el cálculo a nivel parcela se debe ingresar el área foliar de la parcela. En caso de ser aplicado a nivel de parcela y esta cuenta con individuos tanto perennes como caducifolios, la velocidad de depositación se debe calcular por separado para el periodo en que sólo los árboles perennes se mantienen con hojas (otoño-invierno).

Con la ecuación de flujo se obtiene la depositación seca en escala de hora, lo cual permite obtener el promedio diario y su variación durante el año.

Como se mencionó en la sección Descripción y ajuste de la metodología de cálculo para obtención de depositación de árboles , la función no permite ingresar datos espaciales de contaminación, área foliar y meteorología. Es por esto que para el caso del presente proyecto se utilizaran las ecuaciones y sus supuestos, sin embargo se calculará la depositación ingresando datos de área foliar medidos en terreno, concentración de MP10 hora y meteorología de la estación MACAM más cercana al punto de muestreo. Esto permitirá la obtención de estimaciones de depositación espacialmente explícitas, destacando el rol de la vegetación en sectores de alta concentración de contaminantes. Con esta aproximación se podrán generar mapas de depositación para la RMS.

Cabe destacar de que la estimación de la depositación de MP10 no se hará utilizando la herramienta I-Tree Eco, se considerarán solamente las ecuaciones que ésta utiliza, dado que

sino la herramienta calcula el Índice de Área Foliar basado en relaciones alométricas ajustadas para la especie o género y no utiliza datos locales. Con esta aproximación es posible reducir la incertidumbre del modelo.

6.3.3 Variables que utiliza el modelo de I-Tree para el cálculo de depositación de MP10

Para la estimación del modelo de depositación de MP10, se requiere de la información levantada en terreno sobre las variables mencionadas a continuación.

Concentración/hora de MP10: Esta variable ingresa para el cálculo del flujo de depositación (C). Para esto, se utilizarán los datos horas de las estaciones MACAM más cercanas a cada punto de muestreo, considerando el año más reciente que las estaciones tengan información procesada y disponible. En caso de existir dos o más estaciones a menos de 5 [km] del punto de muestreo, se realizará una interpolación espacial, tipo kriging o triangulación de Voronoi (promedio espacial).

Índice de Área Foliar: se ingresa para el cálculo de la velocidad de depositación de acuerdo al modelo desarrollado por Lovett (1994). Este es un indicativo de la superficie disponible para que exista depositación.

Diámetro de copa: Se utiliza para estimar la depositación del árbol o parcela completo, al multiplicar la depositación por metro cuadrado (F) por la cobertura del árbol o parcela.

Altura del árbol, altura de inicio de copa, porcentaje de copa completa: Se utiliza para evaluar la estructura vertical y horizontal de la copa de los árboles, y su entendimiento en el contexto de bosque o área verde en que se encuentren. El MP10 se deposita sobre las hojas que están presentes en la copa de los árboles.

6.3.4 Concentración de MP10 en la Región Metropolitana: análisis de datos desde estaciones de monitoreo de contaminantes

Para la estimación de la depositación de MP10 por masas vegetacionales se requiere el uso de datos de concentración de MP10 en la RMS, para ser asociados a cada parcela de muestreo. Para determinar el valor de concentración a utilizar en el cálculo de depositación, es necesario conocer las tendencias tanto diarias como anuales de este contaminante. Con esto, el análisis de la concentración de MP10 para la RMS se enfoca en vislumbrar el comportamiento de las concentraciones de MP10 a escala horaria, diaria, estacional y anual, para el periodo comprendido entre los años 2016 - 2019.

Se emplearon datos entregados por el mandante correspondientes a las concentraciones horarias de MP10 registradas en las 11 estaciones de la Red MACAM del Departamento de Redes de Monitoreo de la División de Calidad del Aire del Ministerio de Medio Ambiente (MMA). Cabe destacar, que los datos del 2016 al 2018 presentan dos validaciones de datos, mientras los datos del 2019 tienen solamente una validación. Esto último, no significó mayores problemas para el cálculo de depositación de MP10, no registrándose anomalías en las concentraciones.

Para comprender las tendencias en esta serie de tiempo, se calcularon las estadísticas descriptivas, realizando gráficos anuales y diarios para observar variaciones de contaminación de MP10 estacionales y horarias, y de esta forma identificar períodos durante el año y durante el día en que se presentan concentraciones de MP10 extremas.

Habiendo estudiado las tendencias de las concentraciones del MP10 en la RMS, se asignó el dato de concentración de MP10 de las estaciones de la Red MACAM a las parcelas de muestreo para el cálculo de depositación de MP10. Para lo anterior, se asignó a cada parcela de muestreo el valor de concentración de MP10 de la estación de la Red MACAM más cercana, el detalle de la asignación de la estación de la Red MACAM a cada parcela se detalla en el Anexo 1 de material complementario.

6.3.5 Mapas de distribución de concentración de MP10 en la RMS

En base a los análisis de tendencias de las concentraciones de MP10 descritos en la sección anterior y para visualizar gráficamente la distribución del contaminante MP10 en la RMS, se construyeron mapas de concentraciones de MP10 a partir de los promedios de concentraciones de MP10 estivales e invernales de cada estación de la Red MACAM, los cuales se encuentran en Coordenadas UTM, Datum WGS84, Huso 19 Sur.

Se elaboran mapas de concentración de MP10 a escala de la RMS del área metropolitana de Santiago para las temporadas estival (incluye valores de concentración de MP10 de los meses de diciembre, enero y febrero) e invernal (incluye valores de concentración de MP10 de los meses de junio, julio y agosto). Los meses definidos para cada temporada derivan de los resultados del análisis de concentración de MP10 descritos en la sección anterior.

Para la elaboración de dichos mapas, se empleó el método de Kriging ordinario, que corresponde a un método de interpolación geoestadística a partir de un conjunto de puntos ubicados en un plano, considerando únicamente una correlación espacial, creando una gradiente de valores desde cada punto del conjunto en relación a sus vecinos más próximos (Janssen et al., 2008). La fórmula general del interpolador Kriging se forma como una suma ponderada de los datos de la siguiente manera:

$$Z(s_0) = \sum_{i=1}^N \lambda_i Z(s_i)$$

Donde,

$z(s_i)$: es el valor medido en la ubicación i ,

λ_i : es una ponderación desconocida para el valor medido en la ubicación i ,

s_0 : es la ubicación de la predicción,

N : es la cantidad de valores medidos.

El valor de λ_i no sólo depende de las distancias entre los puntos medidos y la ubicación de la predicción, sino también de la disposición espacial general de los puntos medidos. Para esto, la

correlación espacial debe ser cuantificada y se construye a través de los variogramas y funciones de covarianza dando una indicación de los valores de dependencia estadística.

El variograma se construye a partir de la modelación de la estructura espacial de los datos desde el gráfico del semivariograma empírico calculado desde la siguiente ecuación para los pares de ubicaciones separados por una distancia h :

$$\text{Semivariograma}(\text{distancia}_h) = 0.5 * \text{promedio}((\text{valor}_i - \text{valor}_j)^2)$$

Una vez realizado este paso, se ajusta una función o curva continua al semivariograma empírico de manera de asegurar varianzas positivas.

El uso de la herramienta Kriging ordinario ha sido ampliamente empleado en estudios de concentración de contaminantes atmosféricos para proyectar sus concentraciones en el espacio (Liao et al., 2006; Park, 2016; Kim et al., 2014).

La aplicación de la herramienta Kriging ordinario respecto a las concentraciones de MP10 de las estaciones de la Red MACAM, corresponde a un promedio ponderado de los valores de concentraciones de MP10 entre las estaciones cercanas, para predecir los valores de concentración de MP10 en ubicaciones en las que no existen estaciones de monitoreo. En el caso de este estudio y considerando las características de movilidad de las partículas de MP10, se consideró un buffer de 5 [km] dentro del cual se asume que el MP10 se mueve.

Es importante destacar que una de las limitaciones de la aplicación de la herramienta Kriging es que al utilizar una muestra que presenta un bajo número de datos (sólo 11 datos correspondientes a las 11 estaciones de monitoreo de la red MACAM) la significancia estadística de la correlación de los datos se ve afectada. Janssen et al. (2008) mostró que 50 datos de estaciones de calidad del aire son insuficientes para asegurar un variograma robusto y por ende se afecta la evaluación de la estructura espacial de los datos.

6.3.6 Viento en la Región Metropolitana: análisis de datos de velocidad del viento

La depositación de MP10 por masas vegetacionales, se ve afectada por variables relacionadas a condiciones meteorológicas, afectando la resuspensión de partículas (Beckett et al., 2000). La depositación de MP10 en masas vegetacionales se encuentra influenciada por el factor viento, por lo cual se solicitó al mandante datos de viento para la RMS, de manera de entender sus tendencias espaciales y relacionarlas con los sitios de muestreo de la vegetación urbana y peri-urbana.

Los datos de viento provienen de la Red de Monitoreo MACAM del Departamento de Redes de Monitoreo de la División de Calidad del Aire del Ministerio del Medio Ambiente y corresponden al año 2019.

Se calcularon las estadísticas descriptivas y se analizó la distribución espacial, la velocidad y la dirección del viento para las temporadas estival e invernal. Se asignó a cada parcela de muestreo la dirección y velocidad del viento, datos provenientes de la estación más cercana de la Red MACAM (la asignación de estación de la red MACAM a cada parcela de muestreo se detalla en el Anexo 1 de material complementario).

6.3.7 Análisis fenológico del largo de la temporada productiva para la Región Metropolitana de Santiago

La presente licitación contempla una campaña de verano de las parcelas de muestreo definidas en el objetivo a); además, el equipo consultor propuso una campaña de terreno en invierno (no exigida en el contrato de la presente Licitación) para cuantificar el cambio en el área foliar de los árboles que pierden la hoja en los meses de invierno (caducifolios) en las parcelas de muestreo. Dada la contingencia actual, es decir, pandemia por COVID-19, no fue posible realizar dicha campaña de invierno.

Se propuso realizar un análisis de fenología, para identificar la cantidad de días del año en que los árboles de hoja caduca muestreadas en las parcelas de terreno, presentan hojas y por ende están aportando en la depositación de MP10 en su follaje; como se mencionó en la sección Modelos utilizados por la herramienta I-Tree para el cálculo de depositación de MP10, el modelo I-Tree asume que cuando los árboles caducos pierden las hojas durante el invierno, no existe depositación de MP10 (Lovett, 1994). El análisis de fenología permite identificar dónde se encuentra la vegetación de tipo caduca, especialmente para evaluar el funcionamiento en depositación de MP10 de las especies presentes en las áreas urbanas.

Se debe mencionar que el análisis de fenología, si bien da cuenta del número de días al año en que la vegetación caduca presenta hojas, también permite entender las dinámicas que están ocurriendo actualmente sobre el bosque esclerófilo de la RMS. Si bien la mayoría de las especies del bosque nativo de la RMS son de carácter perenne, se debe considerar el contexto actual de megasequía y las cada vez más frecuentes olas de calor en la RMS, resultando interesante evaluar los cambios en la biomasa foliar de los árboles del bosque nativo a través de estimaciones de la productividad de la vegetación y cómo esto afecta eventualmente a la capacidad de depositación de MP10 realizada por este tipo de especies. Se ha evidenciado la pérdida de biomasa foliar en algunas especies del bosque esclerófilo como una respuesta ante efectos de sequía en la zona central de Chile (Miranda et al., 2020).

Si bien la mayor cantidad de individuos que se muestrearon en la campaña de terreno de verano corresponden a especies de tipo perennes, es importante evaluar la duración de las hojas en las especies de tipo caducas, debido a que frecuentemente en parques urbanos se utilizan especies que pierden la hoja durante la temporada de invierno (Hernández y Villaseñor, 2018).

Como se indicó anteriormente, el área foliar de los árboles es uno de los datos de entrada para el cálculo de depositación de MP10 en masas vegetacionales, se propuso como alternativa a la campaña de muestreo de invierno, la cuantificación de la cantidad de días del año en que la vegetación de la RMS se encuentra realizando fotosíntesis (período productivo) y por ende, con hojas en sus copas sobre las que se deposita el MP10. Para lo anterior, se realizará un análisis fenológico de la vegetación, que se describe en la presente sección; en el que se identifica la cantidad de días en que las especies caducas medidas en las parcelas de muestreo presentan hojas, y se asume el valor de IAF medido en la campaña de terreno de verano para esos días.

Lo anterior permitirá obtener el valor de depositación diaria por cada árbol para convertirlo en valores de depositación anual. En la investigación de Dallimer et al. (2016) se reconoce que

existen efectos de la fenología de la vegetación en la capacidad de depositación de contaminantes atmosféricos, incluido el material particulado.

El análisis de la fenología de la vegetación entrega información sobre el tiempo de ocurrencia de procesos claves durante el año, tales como el desarrollo de las hojas en primavera o la senescencia de éstas en otoño, lo que permite inferir cambios en la fisiología de la vegetación. Esto, dado que la fenología relaciona el largo de la temporada de crecimiento con la productividad de la vegetación (Yang et al., 2017).

Conocer la fenología de la vegetación y su variación estacional, permite estimar de manera robusta los impactos de los cambios ambientales, por ejemplo, disminución de la temperatura ambiente en la productividad de la vegetación, especialmente para evaluar cambios en la vegetación caduca (Keenan et al., 2014; Yang et al., 2017). La evaluación del periodo de productividad permite entender cómo han cambiado, en duración, las temporadas de crecimiento de la vegetación al considerar los efectos del cambio climático (Melaas et al., 2016).

La absorción y reflexión de luz por parte de las hojas medido desde imágenes satelitales, permite estimar procesos fisiológicos de la vegetación. Cuando la fotosíntesis ocurre, las hojas verdes absorben la mayor parte de la radiación incidente del espectro visible, particularmente en la banda del rojo, y reflejan y transmiten la mayor parte de la luz infrarroja incidente.

Es así como, el índice de vegetación normalizada (NDVI) basado en información de las bandas rojas e infrarrojas es una métrica robusta para estimar la cobertura de la vegetación fotosintéticamente activa (Nagal et al., 2010). Las imágenes satelitales son ampliamente utilizadas para monitorear la vegetación, y en especial los índices de vegetación como el NDVI mostrando robustas correlaciones con las dinámicas estacionales de la actividad fotosintética del área foliar (Huete et al., 2002, Liang et al., 2011, Kariyeva et al., 2012).

La fenología derivada de datos de NDVI se ha utilizado en investigaciones de cambio climático, mostrando tendencias y respuestas en la dinámica de la vegetación. Al observar las variaciones del NDVI en distintas series de tiempo, se puede monitorear y analizar las tendencias temporales de la vegetación (Anyamba y Tucker, 2005) y las respuestas de estas a variables ambientales, tales como el clima (Fensholt y Rasmussen, 2011), el uso y cobertura del suelo (Baldi et al., 2008; Van Leeuwen et al., 2013).

La evaluación de la fenología se configura como una herramienta fundamental para monitorear la productividad de la vegetación, lo cual permite evaluar los efectos del cambio climático sobre la vegetación, a través de la identificación del inicio y término del periodo productivo, y los cambios en el largo de esta temporada través de los años; también permite asignar biótopos o tipos funcionales mediante un proceso ecológico como es la productividad primaria (Glade et al., 2016).

El propósito del análisis fenológico relacionado al Largo de la temporada productiva, es conocer la cantidad de días del año en que la vegetación dentro y alrededor de la ciudad se mantiene con hojas. El número de días con hojas permite hacer un cálculo de la depositación anual sin sobreestimar los beneficios de ésta. Los números de días con hojas derivados del análisis de fenología se aplican de la siguiente forma para el cálculo de depositación anual de las especies caducifolias:

$$\text{Deposición anual por árbol} \left(\frac{T}{\text{año}} \right) \\ = \text{Deposición árbol} \left(\frac{T}{\text{días}} \right) * \text{número de días productivos}$$

Los análisis de fenología entregan información sobre los patrones de funcionamiento de la vegetación, específicamente sobre su productividad a lo largo de las estaciones del año. Para esto es necesario el entendimiento sobre la cuantificación de tres métricas descritas por Lund University (2018).

La primera métrica se refiere al ‘Inicio de la temporada productiva’ (también llamada temporada de crecimiento) que se define como el primer día del año en que el NDVI aumenta en un 20% respecto de la media de NDVI anual de la temporada de primavera (Kariyeva y Van Leeuwen, 2011; Dallimer et al., 2016).

La segunda métrica se refiere al ‘Fin de la temporada productiva’ se toma como el día del año en que el NDVI se encuentra un 20% por debajo de la media de NDVI anual de la temporada de otoño (Kariyeva y Van Leeuwen 2011, Dallimer et al., 2016).

La tercera métrica definida por Lund University (2018), se denomina ‘Largo de la temporada productiva’ (ampliamente mencionada desde el idioma Inglés *Length Of Season* cuyas siglas son LOS). Esta métrica se obtiene a partir de las dos métricas descritas anteriormente, siendo la diferencia -en días- entre el inicio de la temporada productiva y el fin de la temporada productiva. Las tres métricas fenológicas mencionadas anteriormente son ilustradas en la Figura 36.

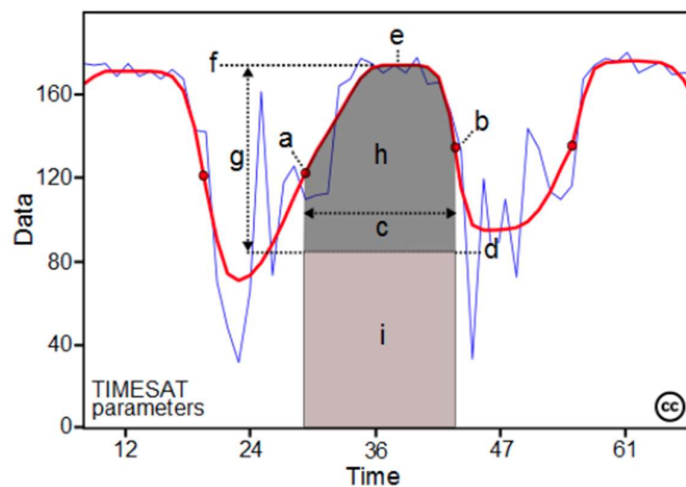


Figura 36. Ejemplo de representación de serie temporal de datos de NDVI, donde: (a) Inicio de la temporada productiva, (b) Fin de la temporada productiva, (c) Largo de la temporada productiva, y (f) NDVI. Fuente: Lund University (2018).

Para el presente análisis fenológico se usaron imágenes MODIS en sus plataformas TERRA y AQUA. El producto utilizado corresponde a MOD-13¹³, y presenta una resolución espacial de 250 [m] equivalentes a 6,25 [ha] y una resolución temporal de 16 días, lo que permite trabajar con un total de 23 imágenes por año. Este producto contiene información sobre el NDVI, que fue utilizado para este análisis fenológico.

De acuerdo con la disponibilidad de imágenes para el área de estudio, el período de análisis seleccionado fue entre los años 2002 y 2017, dando un total de 368 escenas. Además del NDVI, para este análisis, se utiliza información de fisiografía del terreno obtenido desde el modelo numérico de terreno ASTER, que cuenta con una resolución espacial de 90 x 90 m¹⁴.

El cálculo de estas métricas se realizó mediante el programa TIMESAT¹⁵ usando la serie de tiempo de imágenes MODIS y el lenguaje de programación estadística R, junto a la interface gráfica RStudio. Este programa entrega los valores de las métricas fenológicas de Inicio de la temporada productiva, Fin de la temporada productiva y Largo de la temporada productiva en un archivo de tipo raster¹⁶. Para obtener los valores de estas métricas para cada parcela de muestreo realizada en terreno, se sobrepone esta capa ráster con la capa vectorial que contiene la localización de las parcelas y de esta forma se obtienen los valores asociados a cada parcela.

Con los datos del Largo de la temporada productiva obtenidos por parcela, se obtiene el número de días en que las especies caducifolias presentan hojas para cada una de las parcelas de muestreo urbanas y peri-urbanas, con lo que se les asigna el valor de IAF tomado en terreno para los días productivos, el resto de los días se asume un IAF de cero.

Según lo indicado anteriormente, se calcula la depositación de MP10 anual respecto a los días efectivos en que las especies caducifolias presentan follaje durante el año. Para el caso de las especies perennes, se utiliza el valor de IAF para todos los días del año.

6.3.8 Descripción y ajuste de la metodología de cálculo para obtención de depositación de árboles

El modelo a utilizar para la estimación del flujo de depositación de MP10 por árbol (F ; en [g/hr]) se calculó como el producto de la velocidad de depositación (Vd ; en [m/s]) por la concentración de contaminantes (C ; en [g/hr]) de acuerdo a Nowak (1994):

$$F = Vd * C$$

¹³ https://modis.gsfc.nasa.gov/data/dataproduct/pdf/MOD_13.pdf

¹⁴ <https://asterweb.jpl.nasa.gov/gdem.asp>

¹⁵ <http://web.nateko.lu.se/timesat/timesat.asp>

¹⁶ Matriz de celdas o píxeles organizadas en filas y columnas en la que cada celda representa un valor (en este caso NDVI) y que tienen asociada una localización espacial. Por lo general tienen el carácter de representar información continua.

De acuerdo a Freer-Smith et al. (2004, 2005) las especies latifoliadas tienen menor capacidad que las coníferas para la depositación de material particulado, definiendo a estas últimas como especies con alta eficiencia en la depositación de partículas. Esto confirma que las velocidades de depositación son específicas para cada especie (Tiwarly et al., 2009), y están afectadas por las características morfológicas de la copa del árbol tales como la densidad de la copa y hojas, y la micromorfología de las hojas (Freer-Smith et al., 2005; Beckett et al., 2000; Sæbø et al., 2012; Rai et al., 2010).

Dados estos antecedentes, se calculó la velocidad de depositación para especies de tipo latifoliadas (Eq. 1) y especies coníferas (Eq. 2) por separado, utilizando la ecuación de Freer-Smith et al. (2004):

$$Vd = 0,00119 * (1.164^{viento}) \text{ (Eq. 1, latifoliadas)}$$

$$Vd = 0,00297 * (1.404^{viento}) \text{ (Eq. 2, coníferas)}$$

Otra de las consideraciones para los cálculos de depositación fue utilizar el dato obtenido desde el terreno referido a la condición de la copa, en cuanto a si el árbol medido estaba en condiciones óptimas, es decir el 100% de su copa con hojas, o presentaba menor porcentaje de copa completa, asociado a daños, pérdidas de ramas y follaje como se muestra en la Figura 32.

Se hablará de copa actual cuando el porcentaje de copa corresponde al que fue observado durante campaña de terreno, y de copa completa en el caso hipotético en que el árbol tuviera un 100% de su copa completa.

Lo anterior se traduce en que el porcentaje de copa se pondera con el valor de depositación calculado. La depositación se entrega en [g/hr] por temporada (invierno/verano) utilizando los valores de concentración de MP10 máximos y promedios. En tanto, el flujo de depositación se calcula como sigue:

$$F = C * Vd * IAF * 2 * (AC * CC) \text{ (Eq.3)}$$

Donde:

C [g/hora]: concentración de contaminantes MP10, la depositación se calculó considerando el valor promedio y el máximo de concentración de MP10 tanto para la estación estival e invernal.

Vd [m/s]: derivadas de la Eq.1 si es latifoliada y de la Eq. 2 si es conífera.

IAF: índice de área foliar medido en terreno para cada árbol. El IAF se multiplica por 2 para contabilizar depositación en ambos lados de las hojas. También se puede hacer con los valores promediados medidos en los cuatro puntos cardinales y centro de cada parcela de muestreo.

AC: Área copa [m²]: área cubierta por la copa correspondiente a la proyección de la copa en el suelo, se calculó utilizando el promedio entre los diámetros Este-Oeste y Norte-Sur medidos en terreno.

CC: Porcentaje copa completa [%]: porcentaje de la copa que presenta hojas verdes.

Para convertir el valor calculado para cada temporada(estival e invernal) en depositación anual se suman las depositaciones de ambas temporadas, depositaciones que se calcularon por separado utilizando las concentraciones de MP10 correspondientes para cada temporada.

En el caso de las especies perennes, la depositación de cada temporada se obtendrá multiplicando la depositación diaria por 183 días para la temporada estival y la depositación por 182 días para la invernal, ya que presentan hojas durante todo el año.

En el caso de las especies caducas, se utilizó el valor del Largo de la temporada productiva (descrito en la sección Análisis fenológico del largo de la temporada productiva para la Región Metropolitana de Santiago) para determinar la cantidad de días que el árbol se encuentra con hojas durante el año y por tanto contribuyendo a la depositación de MP10. Se considera que la depositación en invierno para los árboles caducifolios será de 0, siempre y cuando el análisis fenológico no indique que el árbol permanece productivo por más de 183 días (asignados a temporada de verano). En caso de que sea más de 183 días, la depositación de invierno se calcula en cuanto a los días restantes, con lo que no será considerada como 0 para esa temporada.

6.3.9 Mapas de distribución de depositación de MP10

Para guiar el entendimiento del lector en el proceso de elaboración de mapas de depositación de MP10 en las áreas densas de bosque nativo y las del área urbana, se muestra la Figura 37 en que se señalan los pasos para elaborar dichos mapas utilizando como criterio de interpolación de información los diagramas de Voronoi descritos a continuación.

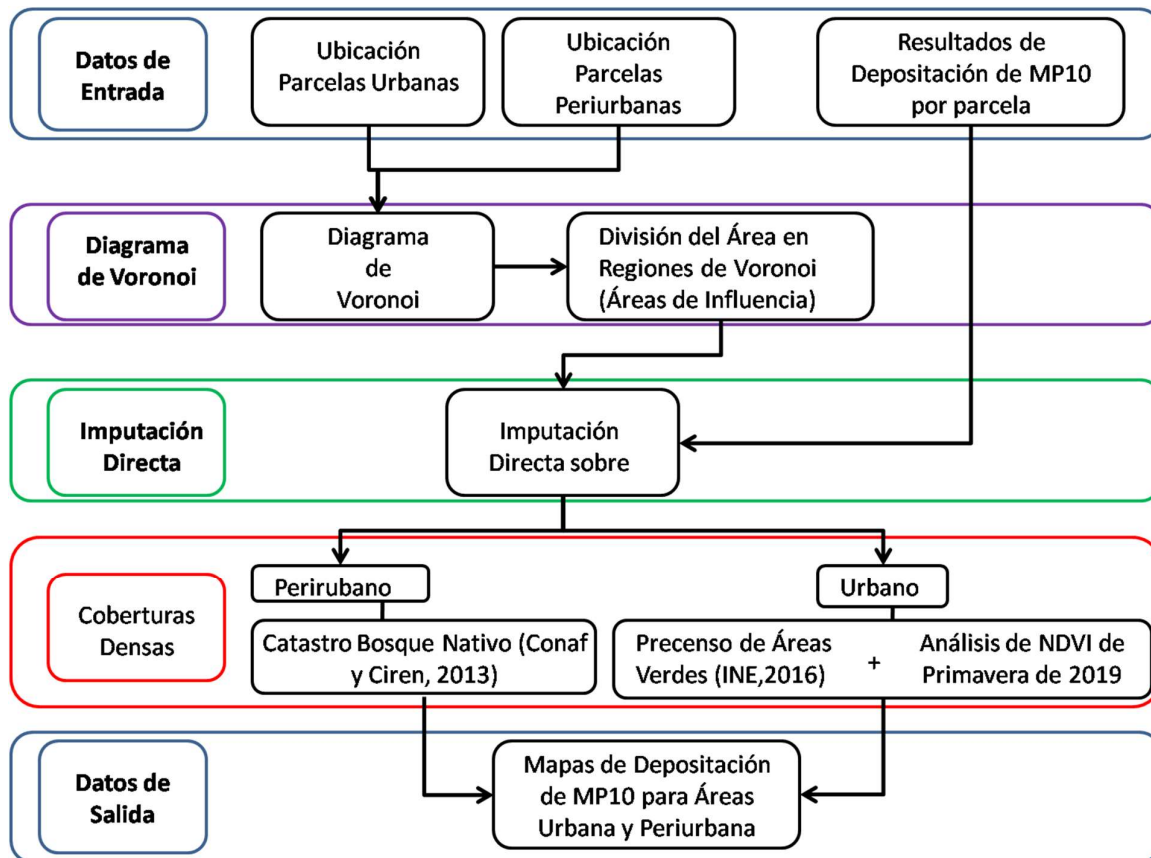


Figura 37. Proceso de elaboración de mapas de depositación de MP10.

El Diagrama de Voronoi se seleccionó como criterio de interpolación para la imputación directa de los datos de depositación de MP10 calculados para las parcelas de muestreo; este método fue seleccionado porque es adecuado para cuando se cuenta con pocos datos (43 parcelas en peri-urbano y 34 en urbano- descritas en sección de resultados), dándole a la capa espacial el carácter de discreto más que de continuo (Deligiorgi y Philippopoulos, 2011). El Diagrama de Voronoi se define como la partición de un plano euclideo en regiones que se construyen a partir de un set dado de objetos, que se encuentran más cercanos a esa región que a cualquier otra.

Este tipo de diagrama asocia cada punto dentro del plano respecto a sus vecinos más cercanos, de esta forma se construyen nodos que delimitan cada región o célula del Diagrama de Voronoi, lográndose dividir un área de gran extensión en regiones más pequeñas y manejables (Deligiorgi y Philippopoulos, 2011, Mostafavi et al., 2010). Es importante destacar que los Diagramas de Voronoi son considerados efectivos en la representación de dinámica de fenómenos espaciales (Mostafavi et al., 2010), siendo ampliamente utilizados en múltiples disciplinas como sociología, economía, biología o astronomía, entre otros, destacando su uso para análisis geoestadísticos en Sistemas de Información Geográfica (Pokojski y Pokojska, 2018).

Un Diagrama de Voronoi se construye por medio de la asociación de puntos dentro de un plano. Para este estudio los puntos corresponden a las parcelas de muestreo y el plano corresponde al área Metropolitana de Santiago o al área peri-urbana de la RMS, dependiendo

del caso. Cada región de Voronoi contiene uno de los puntos del conjunto, es decir, una parcela de muestreo (formulándolo por separado para el área urbana y para área peri-urbana), y **a cada región del diagrama se le asocian los valores del cálculo de depositación de MP10 por masas vegetacionales**, correspondientes a la parcela a partir de la cual se creó dicha región (Zang y Li, 2008; Deligiorgi y Philippopoulos, 2011). De esta forma, se crea el área de influencia del valor de depositación [ton/ha/año] de cada parcela de muestreo respecto a la región de Voronoi que se creó en base a la misma. Se crea un diagrama de Voronoi para el área urbana y otro para peri-urbana.

Una vez obtenidas las regiones de Voronoi, se realizó una imputación directa de los datos derivados del cálculo de depositación de MP10 por parcela para el área urbana y peri-urbana. Para esto, se consideró en primer lugar, la mínima distancia euclidiana entre el centroide de cada polígono de vegetación y las parcelas de muestreo, construyéndose un Diagrama de Voronoi.

Los valores del cálculo de depositación para cada parcela fueron imputados, es decir, se asignó el valor de depositación de la parcela, a cada polígono definido como cobertura densa que se encuentra dentro de una región de Voronoi específica, tanto para el área urbana como peri-urbana. Metodologías similares han sido utilizadas en otros estudios de depositación por masas vegetacionales tales como para la ciudad de Florencia, Italia (Bottalico et al., 2016), Changchun, China (Ren et al., 2017) y en el estudio “Determinación del Servicio Ecosistémico de Purificación del Aire en el Área del Proyecto GEF Montaña”, realizado por el MMA (2018).

A partir de las regiones creadas, se aplicó un método de imputación directo (MMA, 2018) para lograr asociar los valores de depositación de cada región sobre las áreas densas de bosque nativo. Las superficies de bosque denso se extraen del archivo vectorial del Catastro de Bosque Nativo (CONAF y CIREN, 2013). Para el caso de las áreas urbanas, la imputación directa se realizó sobre el archivo vectorial del Pre-censo de Áreas Verdes desarrollado por el INE (2016), que delimita todas las áreas verdes existentes en el Gran Santiago y que contaban con vegetación densa en su interior. Los mapas se encuentran en Coordenadas UTM, Datum WGS84, Huso 19 Sur.

Para determinar el área de cobertura arborea densa dentro de cada área verde, se utilizaron los valores de NDVI, donde valores mayores a 0,4 indican sectores con vegetación arborea densa. El NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) es un índice que funciona como proxy de productividad de la vegetación. Para este análisis, se empleó un archivo raster NDVI de primavera (23 de septiembre al 20 de diciembre) del año 2019, siendo este el periodo más productivo del año de la vegetación. Para ello se empleó el uso de una imagen satelital Sentinel 2, que posee una resolución espacial de 10 [m], y posee las correcciones radiométricas y geométricas correspondientes.

El NDVI se obtiene por medio de la banda NIR, que es la banda espectral del infrarrojo cercano y RED es la banda espectral del rojo (espectro visible). Por tanto, este índice utiliza la combinación de la reflectancia del espectro rojo e infrarrojo para obtener datos de productividad en una escala de -1 a 1, donde valores de NDVI sobre 0,2 son expresión de presencia de vegetación y a medida que este valor se acerca a 1 se asocia con vegetación altamente productiva.

Para este análisis en particular, se empleó como criterio de identificación de áreas urbanas arbóreas densas, valores de NDVI mayores a 0,4 (Akbar et al., 2019). El NDVI se calculó como:

$$NDVI = \frac{NIR - RED}{NIR + RED}$$

Por tanto, para el área urbana, todos aquellos polígonos identificados en el Precenso de Áreas Verdes del INE (2016) que presenten un NDVI mayor o igual a 0,4, fueron considerados como superficies de vegetación arbórea densa (Akbar et al., 2019).

6.4 Objetivo d) Proponer un factor de compensación que establezca una superficie y líneas de acción para emisiones de Material Particulado -MP10 por Resuspensión-, con el fin de contribuir a la gestión en la mantención y creación de áreas verdes y masas vegetación en la RMS.

Propuesta de factor de compensación

La propuesta del factor de compensación se construyó en base a la cantidad de superficie (en hectáreas) necesaria para compensar la emisión 1 [T] de MP10. Considerando que las dos áreas en análisis son distintas en cuanto a distribución y tipo de vegetación arbórea, este factor de compensación se calcula separadamente para el área peri-urbana y el área urbana.

La propuesta del factor de compensación se basa en los resultados del monitoreo de depositación de MP10 calculados derivado de los árboles medidos en terreno considerando la condición de copa completa, es decir cuando presentan su máximo potencial foliar. Para el cálculo del factor de compensación se consideraron los resultados del cálculo de depositación de MP10 utilizando concentraciones medias y máximas de MP10.

Para el caso de la zona peri-urbana, dado que las depositaciones de MP10 varían de acuerdo a las cuatro zonas de análisis (Andes, Noreste, Costa y Sur), se obtuvo el factor de compensación por cada zona definida para la Región Metropolitana. Además, se obtuvo el promedio de las cuatro zonas, definiendo así el factor de compensación del área peri-urbana. Se entregan los valores promedios para las cuatro zonas peri-urbanas y los promedios totales en el caso de depositaciones medias y máximas para el área peri-urbana, y se entrega un solo factor de Compensación para el área urbana.

Se observó que existían valores del factor de compensación muy extremos, presentando superficies superiores a 100 [Ha] a compensar en las distintas zonas de análisis. Estos valores serían complejos de implementar y además sesgan la media, por lo que se realizó un análisis de sesgo que permitió identificar estadísticamente estos valores. Para realizar el análisis de eliminación de datos atípicos (sesgo, datos outliers) se utilizó el software R, con la interfaz R Studio.

Propuesta de líneas de acción

La propuesta de las líneas de acción primarias y secundarias para programas de compensación de emisiones, se orienta a identificar y describir diferentes acciones que permitan incrementar

la biomasa foliar de la vegetación presente en la RMS, con el objetivo de incrementar la depositación de MP10 en estas masas vegetacionales y áreas verdes. Además, la revisión bibliográfica permitirá sistematizar evidencia sobre acciones que cumplen este propósito.

Para el desarrollo de la propuesta, se trabajó a partir de revisión bibliográfica de documentos nacionales e internacionales, considerando publicaciones científicas, manuales técnicos, guías y reportes -entre otros tipos de documentos- que se dirigen a describir buenas prácticas y acciones que generen mejoras en la calidad de los árboles, incrementando la biomasa foliar y promoviendo la depositación de MP10 en la vegetación, objetivo de los PCE. Se revisó documentación desarrollada sobre proyectos de plantación, reforestación y restauración de ecosistemas de tipo bosque y proyectos sobre manejo de arbolado urbano, de forma de abordar las dos áreas de estudio contempladas en esta licitación (áreas peri-urbana y urbana).

Se reconoce que el material ya desarrollado por la SEREMI del MA-RMS en función de los Proyectos de Compensación de Emisiones realizados en los últimos 5 años, en su documento Borrador denominado “Guía para desarrollar Programas de Compensación de Emisiones por MP10 en áreas verdes y masas de vegetación en la Región Metropolitana de Santiago”, incluye información clave y con fundamentos prácticos (PCE realizados durante los últimos años) en cuanto a la identificación de zonas prioritarias para proyectos de PCE, criterios para ejecutar programas de compensación de emisiones (PCE), ejes de acción y acciones involucradas.

En consideración a lo anterior, la revisión bibliográfica que se realiza para desarrollar la propuesta de líneas de acción primarias y secundarias para Programas de Compensación de Emisiones, valida el trabajo que ya ha realizado la SEREMI del MA-RMS, y contribuye a completar la información contenida en su Guía Borrador (Anexo 13) aportando con nuevas líneas de acción y buenas prácticas que no habían sido incluidas en dicho documento. La propuesta desarrollada en este estudio, entrega respaldo bibliográfico al plan de trabajo para PCE desarrollado por la SEREMI del MA-RMS. La propuesta de gestión de líneas de acción, se realiza en función de clasificar en 3 grados de prioridad de implementación (Alto, Medio y Bajo) las acciones descritas en el párrafo anterior para facilitar la labor del SEREMI-MA RMS.

6.4.1 Propuesta de publicación en formato digital que pueda ser utilizada como medio de difusión del estudio.

Los contenidos de la propuesta de publicación en formato digital para ser utilizada como medio de difusión del estudio fueron acordados con el mandante.

6.5 Objetivo e) Exposición de los resultados de la consultoría ante la comunidad local interesada y/o técnicos.

La exposición de los resultados de la consultoría ante la comunidad local interesada y/o técnicos se definió en común acuerdo con el mandante, acordando que el tipo de plataforma es Microsoft Teams, y la charla fue realizada el día viernes 20 de noviembre a las 10 de la mañana, las invitaciones fueron gestionadas y difundidas por la SEREMI-MA RMS.

7 Resultados

7.1 Objetivo específico a) Definir áreas de muestreo para arbolado en función de la distribución espacial de la calidad del aire –MP10 por Resuspensión - de la Región Metropolitana de Santiago.

La campaña de terreno de verano se llevó a cabo durante los meses de Diciembre 2019 y Enero 2020, en que se realizaron 77 parcelas muestrales, se debe mencionar que en la propuesta inicial se comprometieron 70 parcelas (35 en área urbana -sección Áreas de muestreo urbanas- y 35 en área peri-urbana- sección Áreas de muestreo peri-urbanas), y dadas las facilidades de muestreo que se visualizaron en el terreno, se agregaron 7 parcelas para aumentar la representatividad de la muestra, 6 en el área peri-urbana (Parque Natural San Carlos de Apoquindo, Parque Natural Cantalao, Humedal de Batuco, Cerro El Panul, Cerro Manquehue y Cuesta Chacabuco) y una en el área urbana en el Parque Metropolitano. En el Anexo 2: Archivo Excel con datos levantados desde terreno, se entregan los datos levantados por cada parcela e individuo muestreado. En la sección Resultados de campaña de terreno se detallan los resultados del levantamiento de datos realizado en terreno.

7.1.1 Áreas de muestreo peri-urbanas

En la Tabla 12 se listan las 43 parcelas que se realizaron en el área peri-urbana. Cabe destacar que en común acuerdo con el mandante, en los lugares del área peri-urbana del contrafuerte cordillerano de Santiago, se planificó más de una parcela; estos lugares son El Roble, Bosque Santiago, El Panul, Parque Natural San Carlos de Apoquindo, Parque Natural Cantalao, Parque Natural Farellones de Santa Elena, Reserva Nacional Río Clarillo, Santuario de la Naturaleza Yerba Loca y Reserva Nacional Quebrada de la Plata.

Tabla 12. Lugares donde se realizaron las parcelas de muestreo en el área peri-urbana de la RMS.

Nombre lugar	Parcelas	Nombre lugar	Parcelas
Parque Metropolitano Bosque Santiago	2	Fundo San José	1
Cerro Manquehue	2	Las Palmas	2
El Canelo	2	Altos de Chicauma	1
El Panul	3	Cuesta Chacabuco	2
Lagunillas	1	Humedal Batuco	2
P.N. Cantalao	3	Farellones de Santa Elena	2
San Carlos de Apoquindo	3	S.N. El Roble	2
Parque Mahuida	1	S.N. Quebrada de la Plata	2
R.N. Río Clarillo	2	Águila Sur	1
S.N. El Ajiol	1	Cerro Lonquén	1
S.N. Yerba Loca	2	Altos de Cantillana	1

Nombre lugar	Parcelas
Cuesta Ibacache	1
Curacaví	1

Nombre lugar	Parcelas
S.N. San Juan de Piche	1
Viña Tarapacá	1
Total Parcelas	43

Fuente: Elaboración propia

7.1.2 Áreas de muestreo urbanas

En la Tabla 13 Tabla 12 se listan las 34 parcelas que se realizaron en el área urbana según comuna en la que están insertas.

Tabla 13. Áreas verdes en las que se realizaron las parcelas de muestreo del área urbana de la RMS.

Comuna	Nombre Parque	Parcelas
Cerrillos	Parque Bicentenario de Cerrillos	1
Estación Central	Parque Bernardo Leighton	1
La Granja	Parque Brasil	1
La Pintana	Parque Mapuhue	1
La Reina	Parque Padre Hurtado	1
La Reina	Plaza Carlos Ossandón	1
Las Condes	Parque Araucano	1
Las Condes	Parque Juan Pablo II	1
Lo Barnechea	Parque de la Chilenidad	1
Macul	Plaza Halley	1
Maipú	Cerro Primo de Rivera	1
Ñuñoa	Parque Juan XXIII	1
Pedro Aguirre Cerda	Parque André Jarlán	1
Peñalolén	Parque Peñalolén	1
Providencia	Parque Balmaceda	1
Providencia	Parque Bustamante	1

Comuna	Nombre Parque	Parcelas
Providencia	Parque Inés de Suárez	2
Providencia	Parque Metropolitano	2
Pudahuel	Centro Cívico / Muni. de Pudahuel	1
Puente Alto	Parque Juan Pablo II	1
Quinta Normal	Parque de la Familia	1
Quinta Normal	Parque Quinta Normal	1
Recoleta	Cerro Blanco	1
Recoleta	Parque Santa Mónica	1
Renca	Parque Las Palmeras	1
Santiago	Cerro Santa Lucia	1
Santiago	Parque Almagro	1
Santiago	Parque de los Reyes	1
Santiago	Parque Forestal	1
Santiago	Parque O'Higgins	2
Vitacura	Parque Bicentenario	1
Total parcelas	34	

Fuente: Elaboración propia.

7.2 Objetivo específico b) Caracterización del arbolado en las áreas de muestreo definidas de la Región Metropolitana de Santiago.

En esta sección se describe la caracterización del arbolado en las áreas de muestreo definidas en la RMS a escala local (revisión bibliográfica) y a escala de las parcelas realizadas en terreno (información levantada desde terreno y desde análisis de imágenes satelitales -NDVI-).

7.2.1 Caracterización del arbolado a escala local

Según el Catastro de Bosque Nativo (CONAF y CIREN, 2013) (Figura 38), la RMS se conforma por un 15,5% con cobertura densa, 39,3% de bosques con coberturas semi-densa, 26,9% con cobertura abierta y 18,1% con cobertura muy abierta, sus distribuciones se muestran en la Figura 38.

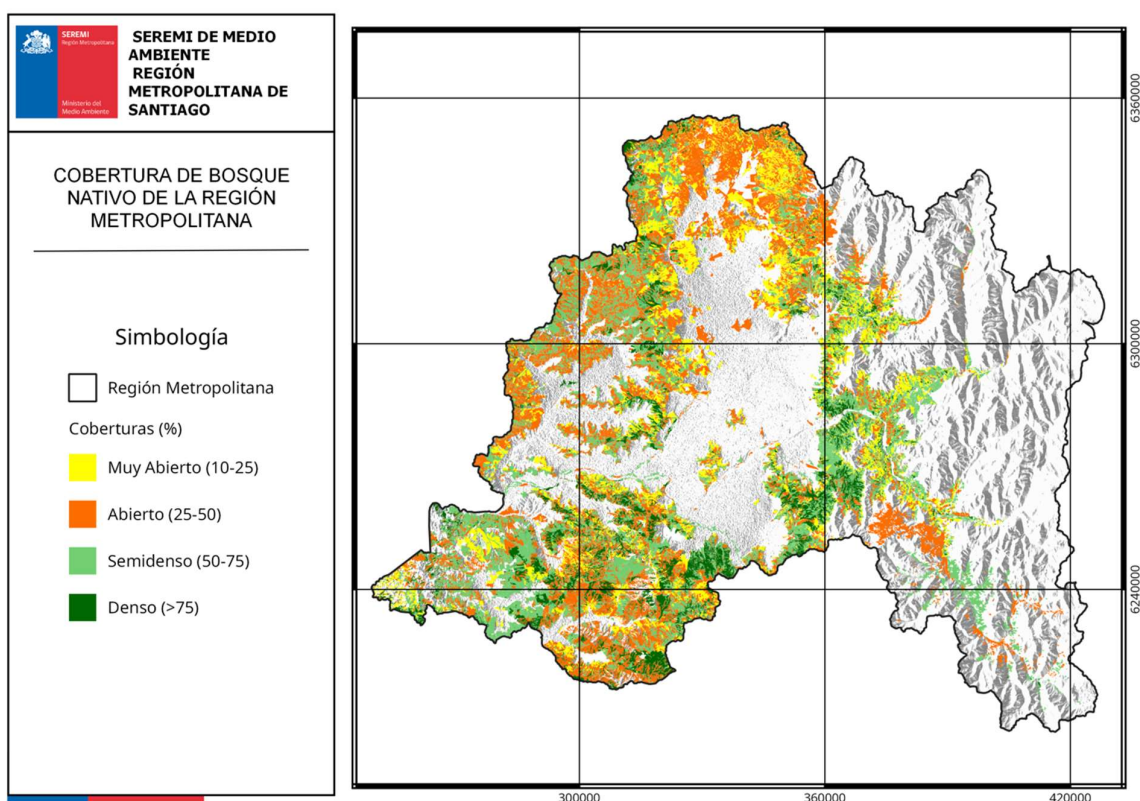


Figura 38. Distribución de áreas de bosque nativo. Fuente: elaboración propia a partir de datos de CONAF y CIREN (2013).

Según la clasificación de pisos vegetacionales elaborada por Luebert y Pliscoff (2006), el área de estudio presenta las formaciones que se listan en la Figura 39, en que se muestran con su respectiva distribución.

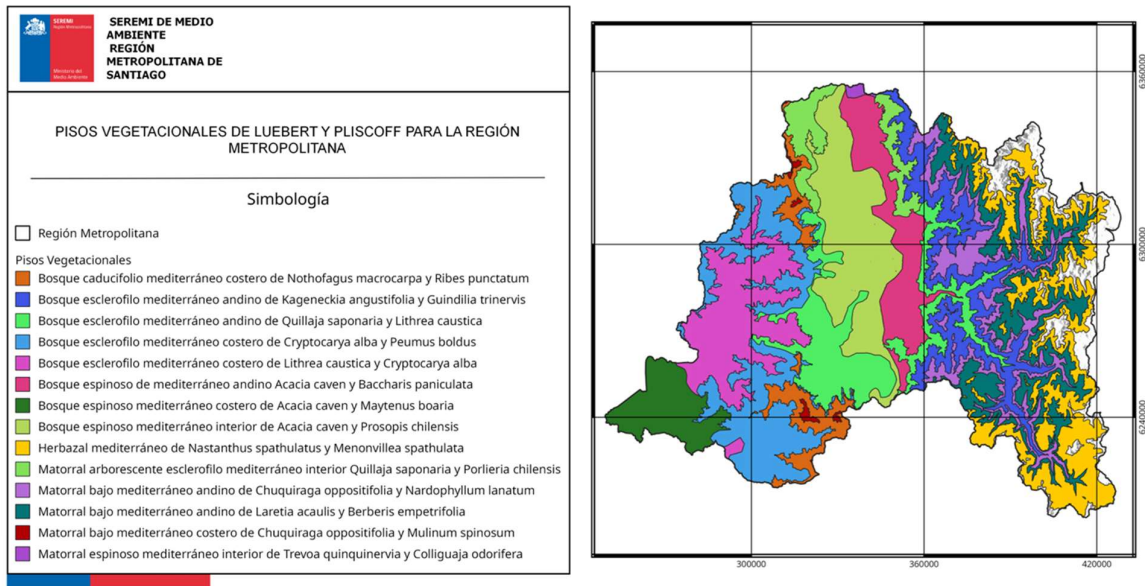


Figura 39. Pisos vegetacionales en la RMS según Luebert y Pliscoff (2006). Fuente: Elaboración propia

Del estudio de CONAF y CIREN (2013) se desprende que las especies con más cobertura en el área son *Acacia caven*, *Quillaja saponaria*, *Lithraea caustica*, *Cryptocarya alba* y *Peumus boldus*, sus distribuciones se muestran en la Figura 40.

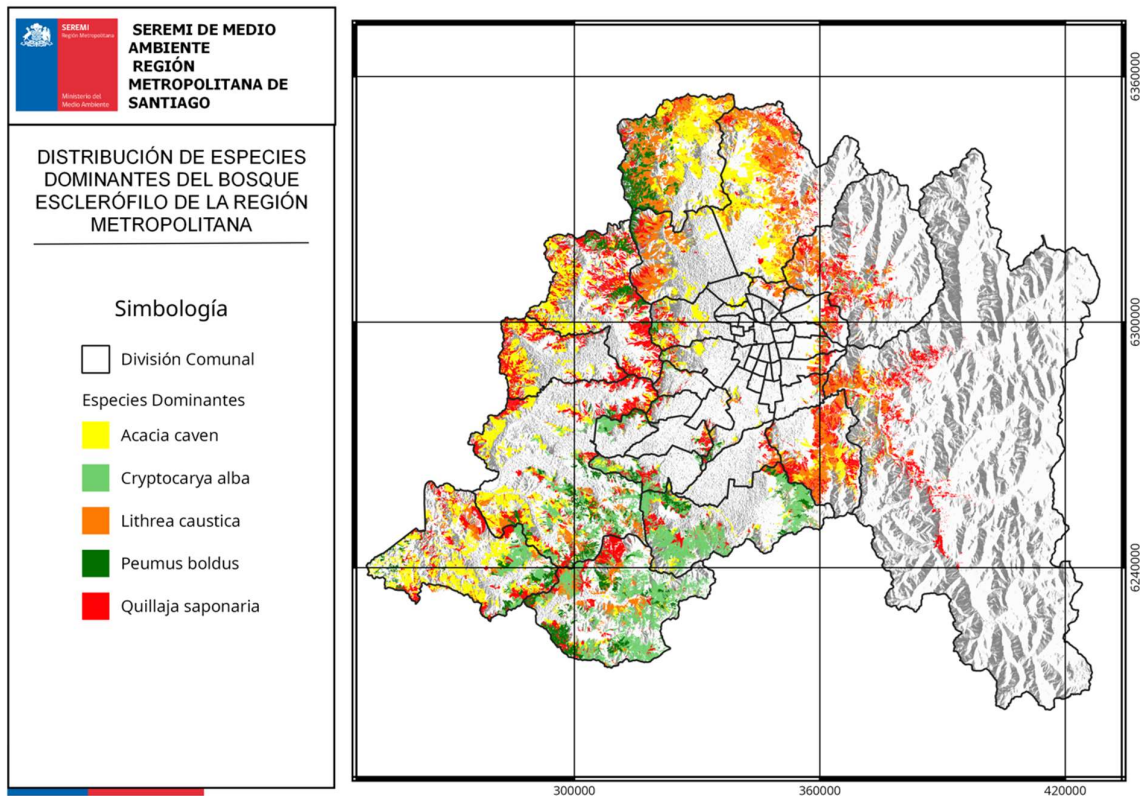


Figura 40. Distribución de especies dominantes del bosque esclerófilo en la RMS. Fuente: Elaboración propia a partir de datos de CONAF y CIREN (2013).

Las especies que componen el tipo forestal bosque esclerófilo, se caracterizan por poseer hojas de tipo perennes, duras (esclerófilas), coriáceas y resistentes, características que se presentan como adaptaciones al clima mediterráneo de la zona central de Chile, permitiéndoles sobrevivir al período de verano caracterizado por el bajo aporte de precipitaciones y altas temperaturas (Donoso, 1982). Algunas de las especies más representativas del bosque esclerófilo se muestran en la Figura 41.

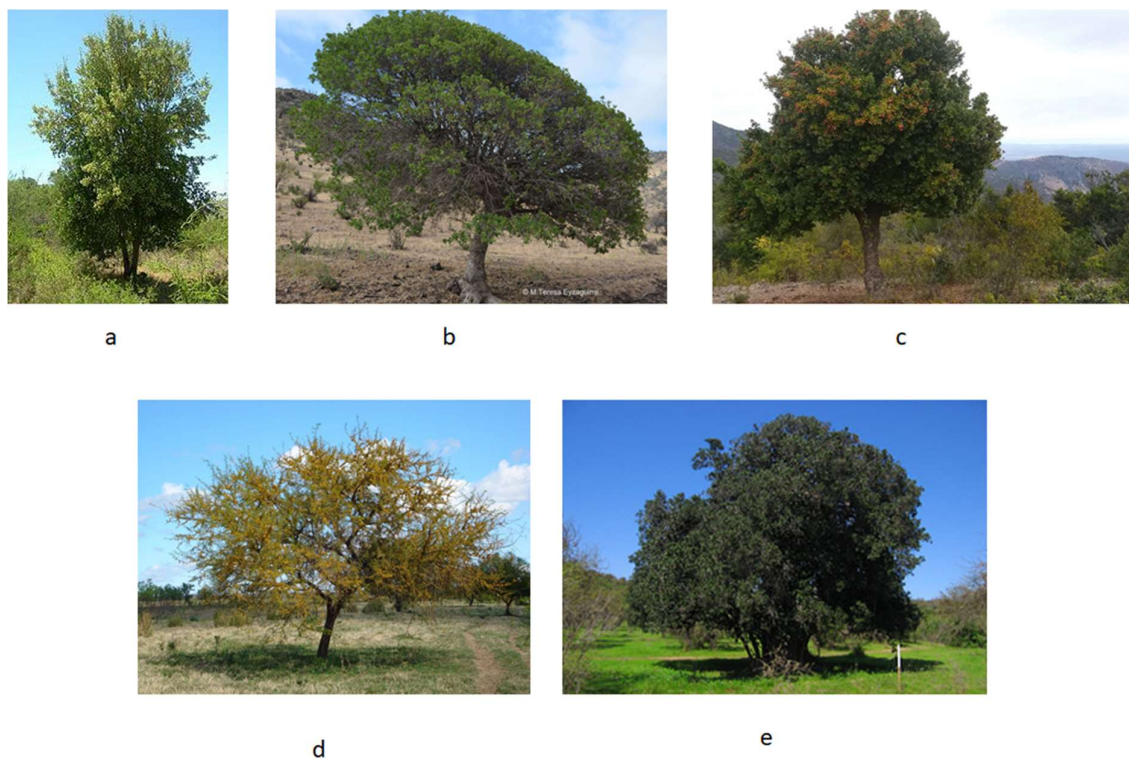


Figura 41. Especies nativas más frecuentes del tipo forestal bosque esclerófilo de la RMS según MMA (2018): a) *Quillaja saponaria*, b) *Lithraea caustica*, c) *Cryptocarya alba*, d) *Acacia caven*, e) *Peumus boldus*.

En lo que respecta al área urbanizada de la RMS, en el estudio de Fernández y Wu (2018) se observa que la cobertura de vegetación -incluyendo árboles, arbustos y herbáceas (césped)- se concentra en las comunas del cuadrante noreste, el sector central de el Gran Santiago presenta las menores coberturas de vegetación. En complemento a lo anterior, el estudio de Soto (2012) sobre la distribución de la vegetación en el Área Metropolitana de Santiago presentó los resultados mostrados en la Tabla 14.

Tabla 14. Distribución de vegetación en el Gran Santiago

Cuadrante Gran Santiago	Total [ha]
Nororiente	7.341
Norponiente	4.542
Suroriente	3.490
Surponiente	4.481

Fuente: Soto, 2012.

La vegetación del área urbanizada de la RMS se encuentra establecida en diversos escenarios, la gran mayoría en parques, plazas y cerros isla. Otros escenarios incluyen bandejones centrales de calles, veredas, rotondas. También hay alta presencia de vegetación en áreas privadas como cementerios, canchas de golf, centros deportivos y condominios residenciales (Soto, 2012).

En la Tabla 15 se muestran los parques de uso público sobre 50 [ha] en la ciudad de Santiago, con sus respectivas superficies. Las áreas verdes de mayor tamaño suelen encontrarse en sectores más alejados del centro de la ciudad en comparación a parques más pequeños o plazas, las cuales son más accesibles para la población (Reyes-Päecke y Figueroa, 2010). Para el caso de la RMS, las áreas verdes de mayor tamaño son más accesible a las personas en la medida en que la comuna en la que se emplazan presenta un mayor nivel socioeconómico existiendo una gradiente en el nivel de ingreso que va en descenso desde el sector noreste hasta el poniente (Reyes-Päecke y Figueroa, 2010; De la Barrera et al., 2016).

Tabla 15. Parques de uso público sobre 50 [ha] en la ciudad de Santiago.

Comuna	Nombre Parque	Superficie [ha]
Recoleta	Metropolitano de Santiago	232,09
Providencia		156,78
Vitacura		83,76
Huechuraba		67,89
Santiago	O'Higgins	60,92
La Reina	Padre Hurtado	55,54
La Granja	Brasil	51,48

Fuente: obtenido desde shapefile de IDE (2016).

En el trabajo de Hernández y Villaseñor (2018) se encontró que la vegetación de Santiago está compuesta por un 86% de especies de origen exótico, con alta representación de ciruelo en flor, Robinia, Acer y Liquidambar. Un 14% se compone de especies del bosque nativo de Chile conformada principalmente por Espino, Quillay, Maitén y Peumo (Figura 42).

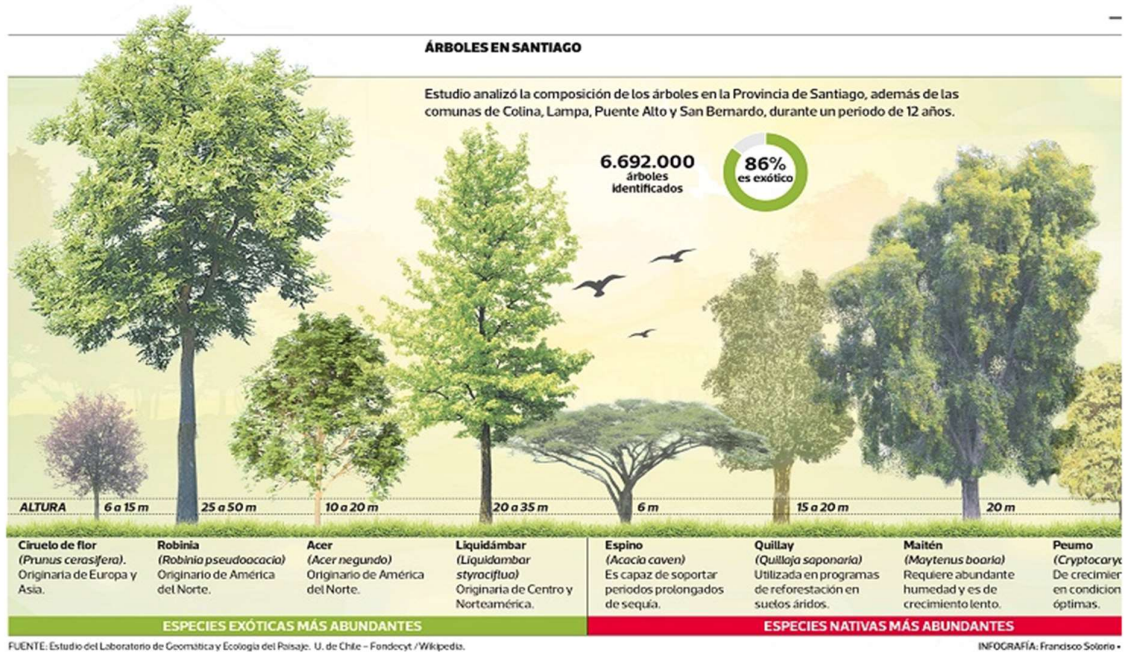


Figura 42. Especies de árboles más frecuentes en las áreas verdes de Santiago. Fuente: Hernández y Villaseñor (2018).

El trabajo de Alvarado et al. (2013) estudiaron la presencia de la vegetación urbana en las áreas verdes de Santiago describiendo a las especies nativas y exóticas. Dentro de las especies siempreverde destacan Quillay (*Quillaja saponaria*), Peumo (*Cryptocarya alba*), Espino (*Acacia caven*), Maitén (*Maytenus boaria*) y de origen exótico existen especies de coníferas tales como la Sequoia (*Sequoia sempervirens*), Cedro del Líbano (*Cedrus libani*) y el Ciprés de monterrey (*Cupressus macrocarpa*).

En cuanto a las especies de tipo caducas y origen exóticas, destacaron la presencia de Catalpa (*Catalpa bignonioides*), Paulonia (*Paulownia tomentosa*) o el Magnolio (*Magnolia grandiflora*); sin embargo las más abundantes en Santiago son Ciruelo en flor (*Prunus cerasifera*), Robinia (*Robinia pseudoacacia*), Arce (*Acer negundo*) y Liquidambar (*Liquidambar styraciflua*) (Hernández y Villaseñor, 2018) (Figura 43). En la RMS no se utilizan especies nativas caducas.

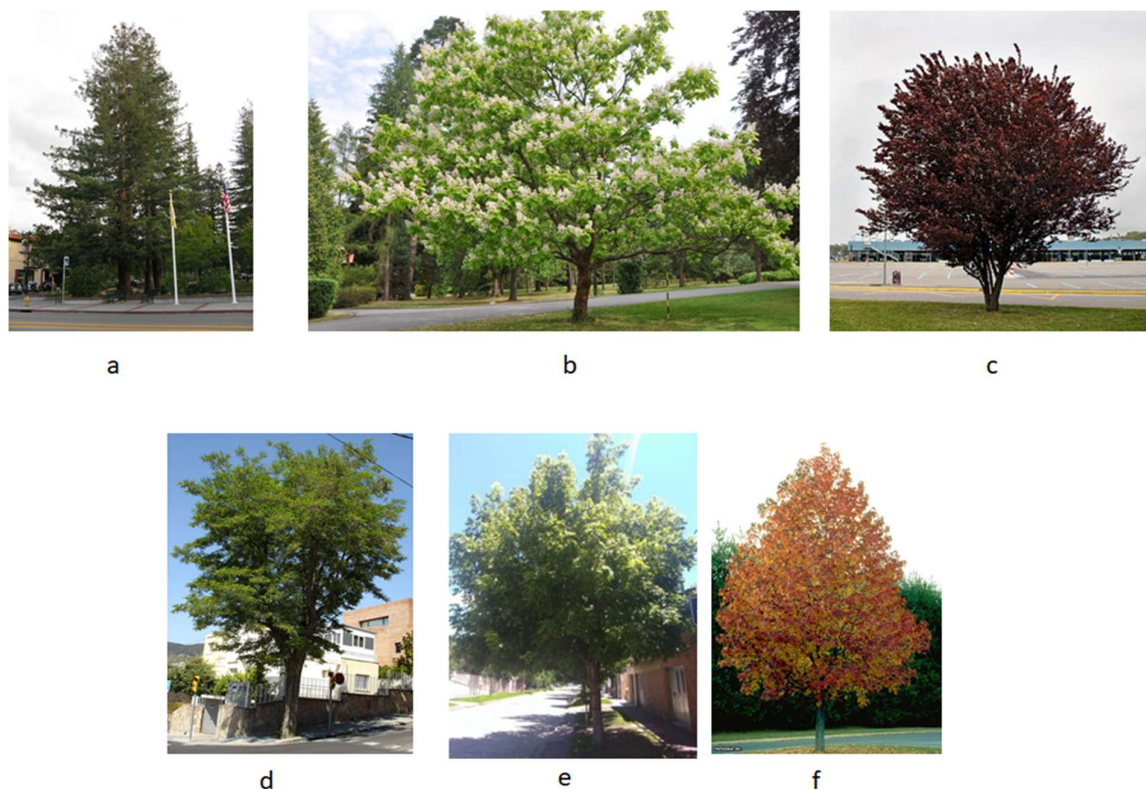


Figura 43. Ejemplo de especies exóticas de arbolado urbano la RMS que pueden ser encontradas en los puntos de muestreo del área urbana: a) *Sequoia sempervirens*, b) *Catalpa bignonioides*, c) *Prunus cerasifera*, d) *Robinia pseudoacacia*, e) *Acer negundo*, f) *Liquidambar styraciflua*.

7.2.2 Caracterización del arbolado a escala de parcela

En esta sección se entregan los resultados de la caracterización del arbolado medido en las parcelas de muestreo tanto del área urbana como peri-urbana. En el Anexo 5 se entrega el detalle de la caracterización del arbolado por cada una de las parcelas medidas (total 77 fichas), incluyendo los resultados del análisis de imágenes satelitales, para la obtención de valores de NDVI para primavera y verano en cada parcela de muestreo.

7.2.2.1 Resultados de campaña de terreno

Como se mencionó anteriormente al principio de este capítulo, se realizaron 77 parcelas muestrales durante la campaña de terreno de verano de las cuales 34 fueron localizadas el área urbana y 43 en el área peri-urbana. Se debe mencionar que en la propuesta inicial de licitación, se comprometieron 70 parcelas (35 en área urbana -sección Áreas de muestreo urbanas- y 35 en área peri-urbana- sección Áreas de muestreo peri-urbanas), y dadas las facilidades de muestreo que se visualizaron en el terreno, se agregaron 7 parcelas para aumentar la representatividad de la muestra.

La campaña de invierno propuesta inicialmente, para realizar un muestreo invernal con la finalidad de medir variaciones en el IAF en especies de hoja caduca, no pudo realizarse dada la

contingencia sanitaria de pandemia. Sin embargo, se realizó el análisis de fenología del período productivo, descrito en la sección Obtención de periodo con hojas de árboles caducifolios a través de análisis fenológico de la vegetación de la Región Metropolitana para ser utilizado en modelo I-Tree, para cuantificar el número de días al año en que la vegetación caduca presenta hojas, con lo que se homologó la información que habría sido levantada en la campaña de terreno de invierno.

Se debe mencionar, que de acuerdo a lo observado en terreno, en cuanto a la estructura del bosque, entorno y fisonomía del terreno, se reclasificaron dos puntos de muestreo desde el área urbana a peri-urbana. Estos corresponden al Parque Mahuida y al Cerro Manquehue, que fueron planificados inicialmente para área urbana.

En cuanto a las parcelas de muestreo peri-urbana, se realizaron dos correcciones de acuerdo a lo encontrado en terreno. Los puntos predefinidos en conjunto con la SEREMI MI-RMS a muestrear en Santa Luisa y Santa Emilia (comuna de Melipilla) fueron relocalizadas al Sector Las Palmas (comuna de Melipilla) con dos parcelas de muestreo, dado que eran más representativas de bosques de tipo densos. El punto de muestreo del Santuario de la Naturaleza Cascada de las Ánimas (San José de Maipo) fue relocalizado al sector El Canelo (San José de Maipo) dado que se tuvo acceso en este sector y el bosque es homologable con el del SN Cascada de las Ánimas.

Para el análisis de los datos levantados en terreno y los análisis posteriores para obtención de valores de depositación de MP10, se dividió el área peri-urbana en 4 zonas de análisis que son: Andes, Costa, Noroeste y Sur (Figura 44).

La zonificación se realizó en base a la distribución de las especies de árboles nativos dominantes del bosque esclerófilo, definidos para el área por el Catastro de Bosque Nativo (CONAF y CIREN, 2013) ilustrado en la Figura 38. Se observa que en sector noroeste de la ciudad de Santiago, existe dominancia de las especies *Acacia caven* y *Lithraea caustica*, hacia el sector costa predomina *Quillaja saponaria*, hacia el sector sur *Cryptocarya alba* y hacia la Cordillera de los Andes se encuentran en similar proporción *Quillaja saponaria* y *Lithraea caustica* y en menor proporción, aunque dominante *Kageneckia angustifolia*. Las parcelas muestreadas en terreno muestran la misma composición dominante de especies arbóreas, composiciones que son detalladas en la sección Estructura y composición de bosques peri-urbanos medidos en campaña de terreno.

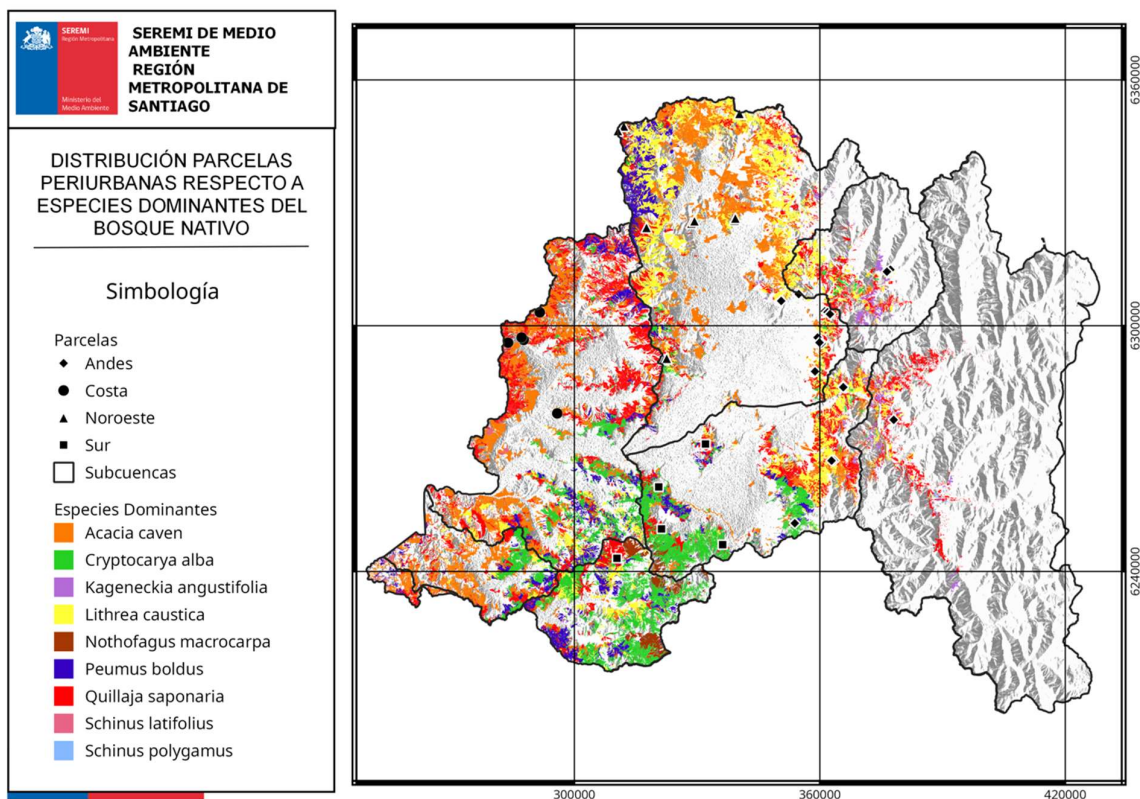


Figura 44. Distribución de parcelas peri-urbanas según especies dominantes y zonas de análisis.

Las parcelas urbanas se clasificaron según comuna, mientras que las peri-urbanas de acuerdo a su zona de análisis. En el Anexo 1 de material complementario se entrega un mapa con la ubicación de las parcelas urbanas y peri-urbanas realizadas. El número de parcelas realizadas según comuna se detalla en la Tabla 16, y el listado de los puntos del área peri-urbana según zona de análisis, en la Tabla 17.

Tabla 16. Parcelas Urbanas realizadas según comuna.

Comuna	Parcelas realizadas	Comuna	Parcelas realizadas
Cerrillos	1	Pedro Aguirre Cerda	1
Estación Central	1	Peñalolén	1
La Granja	1	Providencia	6
La Pintana	1	Pudahuel	1
La Reina	2	Puente Alto	1
Las Condes	2	Quinta Normal	2
Lo Barnechea	1	Recoleta	2
Macul	1	Renca	1
Maipú	1	Santiago	6
Ñuñoa	1	Vitacura	1
		Total parcelas	34

Fuente: elaboración propia.

Tabla 17. Listado de parcelas peri-urbanas según zona de análisis y número de parcelas.

Zona	Nombre lugar	Parcelas	Zona	Nombre lugar	Parcelas
Andes	Parque Metropolitano		Costa	Fundo San José	1
Andes	Bosque Santiago	2	Costa	Las Palmas	2
Andes	Cerro Manquehue	2	Noroeste	Altos de Chicauma	1
Andes	El Canelo	2	Noroeste	Cuesta Chacabuco	2
Andes	El Panul	3	Noroeste	Humedal Batuco	2
Andes	Lagunillas	1		Farellones de Santa Elena	2
Andes	P.N. Cantalao	3	Noroeste	S.N. El Roble	2
Andes	San Carlos de Apoquindo	3		S.N. Quebrada de la Plata	2
Andes	Parque Mahuida	1	Noroeste	Águila Sur	1
Andes	R.N. Río Clarillo	2	Sur	Cerro Lonquén	1
Andes	S.N. El Ajial	1	Sur	Altos de Cantillana	1
Andes	S.N. Yerba Loca	2		S.N. San Juan de Piche	1
Costa	Cuesta Ibacache	1	Sur	Viña Tarapacá	1
Costa	Curacaví	1		Total parcelas	43

Fuente: elaboración propia.

La Figura 45. Ubicación de puntos de muestreo en área urbana dentro de buffer de 5 km desde estaciones de la red MACAM. y Figura 46. Puntos de muestreo en área urbana. Fuente: Elaboración propia. muestran los puntos de muestreo realizados durante la campaña de terreno de verano para el área urbana.

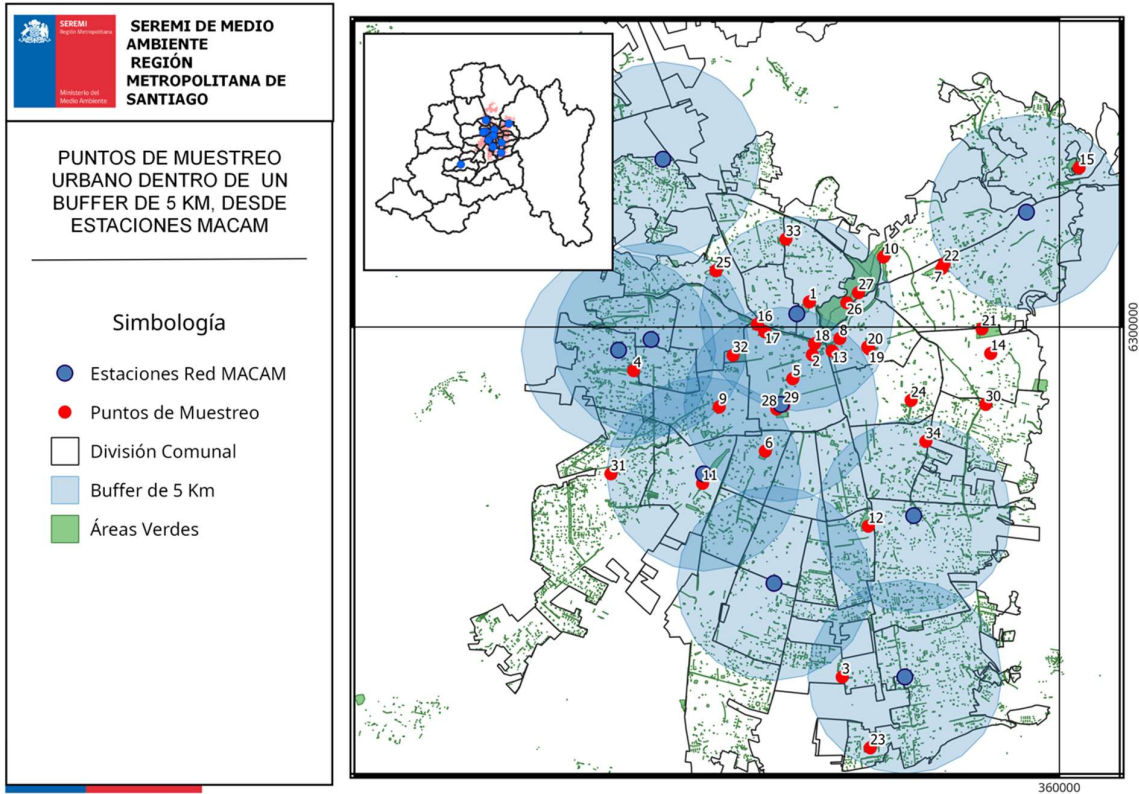


Figura 45. Ubicación de puntos de muestreo en área urbana dentro de buffer de 5 km desde estaciones de la red MACAM.

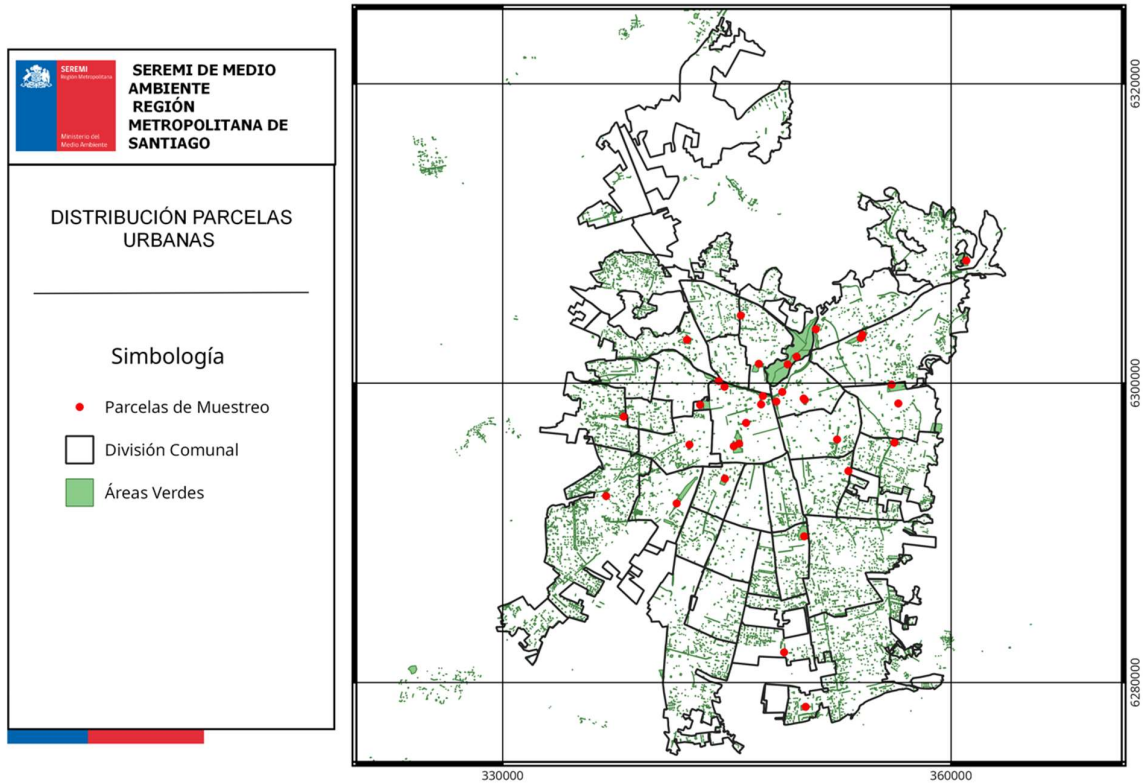


Figura 46. Puntos de muestreo en área urbana. Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 47 se muestra la localización de las parcelas de muestreo localizadas en el área peri-urbana, que fueron realizadas durante la campaña de terreno de verano.

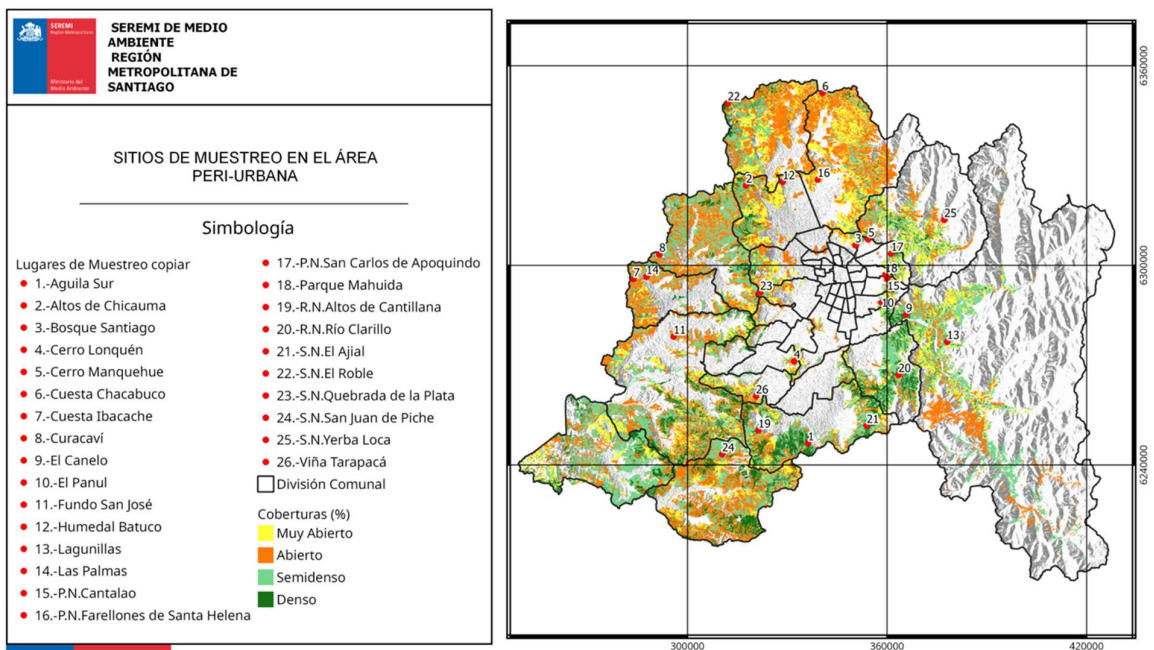


Figura 47. Distribución de las parcelas de muestreo para el área peri-urbana de la RMS. Fuente: Elaboración propia a partir de datos de CONAF y CIREN (2013).

La información levantada en terreno fue sistematizada en un archivo tipo base de datos, elaborado en el software Microsoft Excel. En el archivo se ordenaron las variables medidas según cada individuo arbóreo registrado en cada una de las parcelas urbanas y peri-urbanas visitadas (Figura 48). La información anterior se encuentra en el Anexo 2 archivo Excel con datos levantados desde terreno.

Lugar	Urban/Peri	Peri -Zona	SP	Follaje	Conifera/Latifo	Altura	Dap	Diametro_NS	Diametro_EO	Altura_inicio	Cob_copa (%)	Lai_prom	
Cantalao_1	Peri	Andes	Lithraea caustica	Perenne	Latifoliada		7	11	7,7	3,9	0,77	40	0,55
Cantalao_1	Peri	Andes	Lithraea caustica	Perenne	Latifoliada		5	11,4	10,4	5,4	0,55	65	0,68
Cantalao_1	Peri	Andes	Lithraea caustica	Perenne	Latifoliada		6	11	8,06	5,4	0,5	35	0,33
Cantalao_1	Peri	Andes	Lithraea caustica	Perenne	Latifoliada		7	10,5	7,5	6,2	0,95	45	0,35
Cantalao_1	Peri	Andes	Lithraea caustica	Perenne	Latifoliada		4,5	12,8	9	8,46	0,4	70	0,59
Cantalao_1	Peri	Andes	Lithraea caustica	Perenne	Latifoliada		8	10,5	8,5	6,4	0,28	55	0,41
Cantalao_1	Peri	Andes	Lithraea caustica	Perenne	Latifoliada		3	9,5	7,5	4,94	0,2	30	0,42
Cantalao 2	Peri	Andes	Lithraea caustica	Perenne	Latifoliada		6,1	10,1	5	7	1,1	45	0,98
Cantalao 2	Peri	Andes	Lithraea caustica	Perenne	Latifoliada		6	18,7	4,5	3,7	1,8	40	1,33
Cantalao 2	Peri	Andes	Cryptocarya alba	Perenne	Latifoliada		8,5	13,4	4,9	5,5	1,3	90	1,26
Cantalao 2	Peri	Andes	Cryptocarya alba	Perenne	Latifoliada		10,5	19,5	5,3	6,4	2,4	80	0,9
Cantalao 2	Peri	Andes	Lithraea caustica	Perenne	Latifoliada		9,5	10,4	9	7	1,2	60	0,33
Cantalao 2	Peri	Andes	Cryptocarya alba	Perenne	Latifoliada		7	12	3,4	4,3	0,7	70	1,99
Cantalao 2	Peri	Andes	Cryptocarya alba	Perenne	Latifoliada		5,5	17,3	4,15	4,4	0,8	75	2,25
Cantalao 2	Peri	Andes	Cryptocarya alba	Perenne	Latifoliada		7,3	13,3	5,3	6,2	0,75	60	4,55
Cantalao 2	Peri	Andes	Cryptocarya alba	Perenne	Latifoliada		5,5	10	3,6	3,7	0,5	90	1,3
Cantalao 3	Peri	Andes	Cryptocarya alba	Perenne	Latifoliada		4,5	12,5	5,5	5,3	0,6	70	1,04
Cantalao 3	Peri	Andes	Cryptocarya alba	Perenne	Latifoliada		7	18,5	4,8	3,5	1	90	1,31
Cantalao 3	Peri	Andes	Cryptocarya alba	Perenne	Latifoliada		6	15,5	7,3	6	1	80	1,7
Cantalao 3	Peri	Andes	Cryptocarya alba	Perenne	Latifoliada		5	10,2	2,8	3,4	0,6	60	1,73
Cantalao 3	Peri	Andes	Cryptocarya alba	Perenne	Latifoliada		9	14	3,2	4,5	1	70	1,12
Cantalao 3	Peri	Andes	Cryptocarya alba	Perenne	Latifoliada		7	14	4,78	4,32	1,85	50	0,78
Cantalao 3	Peri	Andes	Cryptocarya alba	Perenne	Latifoliada		7	12	5,45	5,66	1,27	80	0,74
ones de Santa El	Peri	Noroeste	Acacia caven	Perenne	Latifoliada		5	13	4,5	3	1,2	70	1,39
ones de Santa El	Peri	Noroeste	Acacia caven	Perenne	Latifoliada		4,7	25,3	4,7	5,2	1,09	70	1,68
ones de Santa El	Peri	Noroeste	Lithraea caustica	Perenne	Latifoliada		6	10,1	4,1	5,6	0,86	30	0,82
ones de Santa El	Peri	Noroeste	Porlieria chilensis	Perenne	Latifoliada		3	15,2	3,85	5,5	0,55	90	0,79
ones de Santa El	Peri	Noroeste	Lithraea caustica	Perenne	Latifoliada		6,5	11,9	7,3	8,6	0,77	70	0,98

Figura 48. Sección de Planilla Excel en que se organizaron los datos levantados en terreno. Fuente: elaboración propia.

7.2.2.2 Estructura y composición de bosques peri-urbanos medidos en campaña de terreno

A continuación, se describe la estructura y composición forestal a partir de las parcelas de muestreo localizadas en sectores peri-urbanos de la RMS. El análisis comprende cálculos relacionados al tipo inventario forestal a nivel de parcela, resumido por zona de análisis; también se entrega un resumen por especie en cuanto a variables de estructura. El detalle de esta información se encuentra en el Anexo 2 archivo Excel con datos levantados desde terreno.

En la Tabla 18 se observa que la mayoría de las parcelas muestreadas se ubican en la zona Andes, seguido por las de la zona Noroeste de la Región. En términos de cobertura arbórea el sector que presenta mayores coberturas de copa es la zona Sur de la Región, mientras que el sector de menor cobertura es la zona Noroeste. Esto se podría deber a dos factores principales, el primero referido a la diferencia en precipitación entre ambas zonas (más lluvias en zona sur) y el otro de acuerdo al nivel de perturbación antrópica que es distinto en ambos sectores (más perturbaciones en zona Noreste).

La mayor variabilidad en cobertura ocurre en las parcelas ubicadas en la zona Costa, indicando la gran variación en impacto antrópico y de esfuerzos de conservación. Asimismo, la densidad de los bosques también es variable, donde mayores densidades ocurren en la zona Sur, con mayor número de individuos por hectárea, y la menor ocurre en la Noroeste.

Los datos de área basal nos permiten inferir que aún existen individuos arbóreos de importante tamaño en la zona Noroeste dado que las áreas basales se encuentran dentro de las más altas, aunque la densidad [ind/ha] es la más baja.

En cuanto a la complejidad estructural podemos observar que el sector Costa tiene un solo estrato, mostrando un ecosistema está simplificado, y por lo tanto, presenta menos biodiversidad.

Finalmente, el índice de área foliar es mayor en los bosques de la zona Sur, lo que permite inferir que existe mejor funcionalidad del ecosistema, por el contrario, las zonas Andes y Noroeste son las que presentan los menores valores de este índice.

Tabla 18. Descripción de estructura y función de las parcelas de muestreo peri-urbanas de la RMS. Datos en parentesis representan la desviación estandar de la muestra.

Zona	Parcelas	\bar{x} estratas	\bar{x} ind/ha	\bar{x} cobertura estrato arbóreo [%]	\bar{x} IAF	\bar{x} Área basal [m ² /ha]
Andes	22	2	352,2 (192,5)	70 (17,7)	2,4 (1,6)	10,4 (15)
Costa	5	1	460 (282)	68 (25,6)	2,7 (1,3)	10,7 (7,1)
Noroeste	11	2	254,5 (143,5)	66,3 (22,2)	2,2 (1,5)	16 (43,5)
Sur	5	2	515 (264,9)	80 (12,7)	3,2 (0,9)	17,6 (20,8)
Total	43					

Fuente: elaboración propia.

Al analizar la estructura y funcionalidad según zona de análisis, se observa que las dimensiones promedio, relacionadas con altura y diámetro, son similares en las cuatro zonas Tabla 18. Los individuos de mayor altura se encuentran en la zona Sur, mientras que la zona Noroeste presenta los individuos con mayores DAP, destaca esta última zona por poseer mayor variabilidad en términos de los diámetros de los árboles, se ven individuos muy antiguos, y otros más jóvenes.

En cuanto a características de la copa de los árboles, cabe destacar que los ubicados en la zona Costa y Andes son los que presentan las copas más completas, mientras que los árboles del sector Noroeste son los que presentan mayor porcentaje de copa faltante; los árboles de la zona Andes son los que presentan mayor variabilidad en su condición de daño en la copa. A su vez, estas últimas zonas junto con la Noreste son las que presentan los mayores daños en las copas de los árboles, mientras que los de la zona Sur son los que están con menores daños y más homogéneos.

En cuanto a la funcionalidad, visualizada por medio del índice de área foliar, el IAF es mayor en la zona Costa y menor en la Noroeste. La mayor variabilidad en el índice ocurre en el sector Andes coincidente con el estado sanitario de los árboles (copas más completas) (Tabla 19).

Tabla 19. Descripción de estructura y función de los individuos de las parcelas de muestreo peri-urbanas de la Región Metropolitana. Datos en parentesis representan la desviacion estandar de la muestra.

Zona	Árboles medidos	\bar{x} Altura [m]	\bar{x} DAP [cm]	\bar{x} Cobertura copa [%]	\bar{x} Daño [%]	\bar{x} IAF
Andes	310	10,8 (3,6)	16,3 (9,1)	74,2 (19,6)	19,8 (23,8)	3,4 (1,5)
Costa	96	11,9 (3,4)	14,6 (5,1)	74,3 (15,2)	15,7 (20)	3,5 (1)
Noroeste	112	9,3 (3,2)	19,1 (17)	59,9 (17,9)	22,8 (22,3)	2,9 (1,2)
Sur	103	12,4 (3,6)	17,8 (8,1)	70,6 (20,9)	9,6 (12,9)	3,3 (1)
Total	621					

Fuente: elaboración propia.

En la Figura 49 se observa la composición de especies para la zona Noreste. Se identificó variaciones de acuerdo a la abundancia de especies y la presencia de especies exóticas. La riqueza de especies arbóreas es de 9, siendo todas de origen nativo.

La especie más frecuente en la zona noroeste es el Peumo (*Cryptocarya alba*), seguida por el Espino (*Acacia caven*). Además, se presenta como tercera especie más abundante el Roble de Santiago (*Nothofagus macrocarpa*), lo cual se explica por las dos parcelas realizadas en el Santuario El Roble. Dada la composición se puede inferir una gradiente desde matorral espinoso hacia bosque esclerófilo.

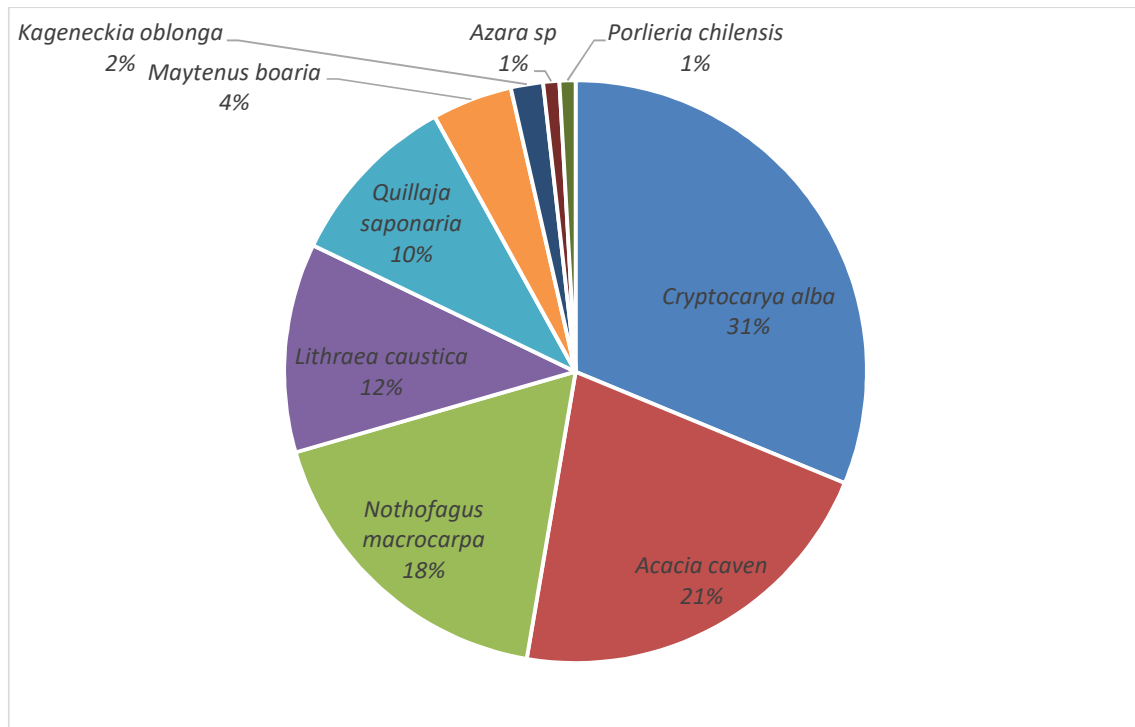


Figura 49. Composición de especies arbóreas de parcelas ubicadas en zona Noroeste. Fuente: elaboración propia.

Las parcelas ubicadas en la zona costa presentan las mismas especies dominantes que las de la zona noroeste, encontrándose una riqueza de 8 especies, todas de origen nativo (Figura 50). La especie más abundante es el Peumo seguido por el Espino (*Acacia caven*).

Cabe destacar que el Boldo (*Peumus boldus*) se encuentra tercero en abundancia, el cual se encuentra en menor frecuencia para el resto de las zonas muestreadas. El número de individuos de las especies más frecuentes es mucho mayor que en la zona noroeste.

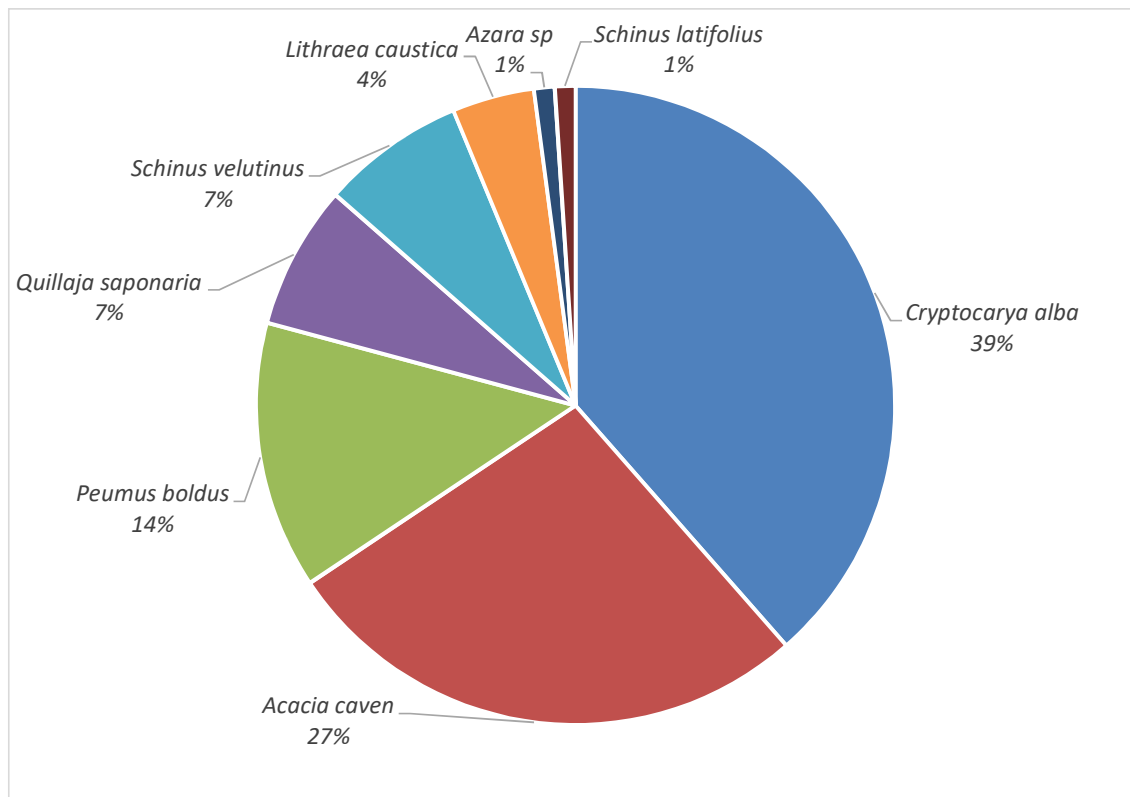


Figura 50. Composición de especies arbóreas de parcelas ubicadas en zona Costa. Fuente: Elaboración propia.

La composición de las parcelas de la zona Andes cambia en relación a las zonas anteriores (Figura 51). La riqueza aumenta a 12 especies, en que aparecen dos de origen exótico, siendo el Aromo (*Acacia melanoxylon*) y el Olivo (*Olea europaea*), destacando el carácter invasivo del Aromo. Se observa una menor presencia de especies del matorral espinoso, siendo en su mayoría especies correspondiente al bosque esclerófilo.

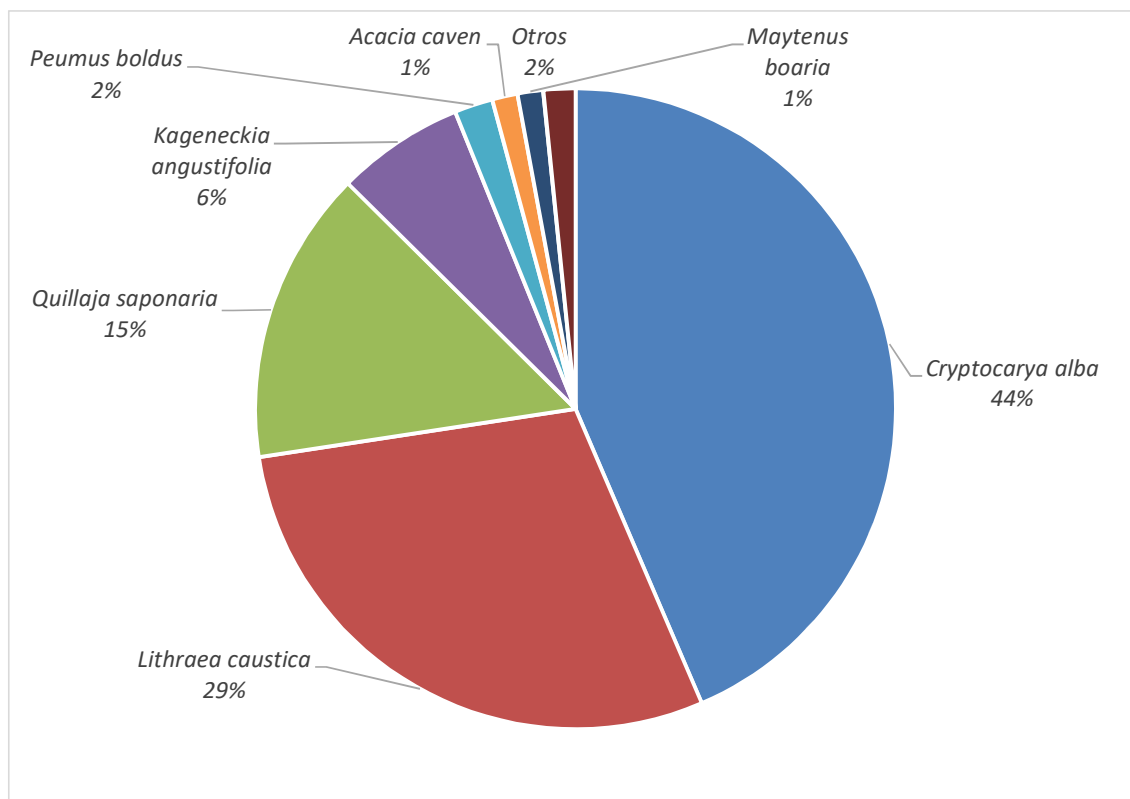


Figura 51. Composición de especies arbóreas en parcelas muestreadas en zona Andes.
Fuente: elaboración propia.

En la zona sur existe una clara dominancia del Peumo y en mucho menor número le sigue el Espino, Boldo y Litre (*Lithrea caustica*) Figura 52). La zona presenta una riqueza de 10 especies, de las cuales sólo una tiene origen exótico. Se observa mayor presencia de especies higrófilas como es la Patagua (*Crinodendron patagua*), el Lingue (*Persea lingue*) y el Maitén (*Maytenus boaria*).

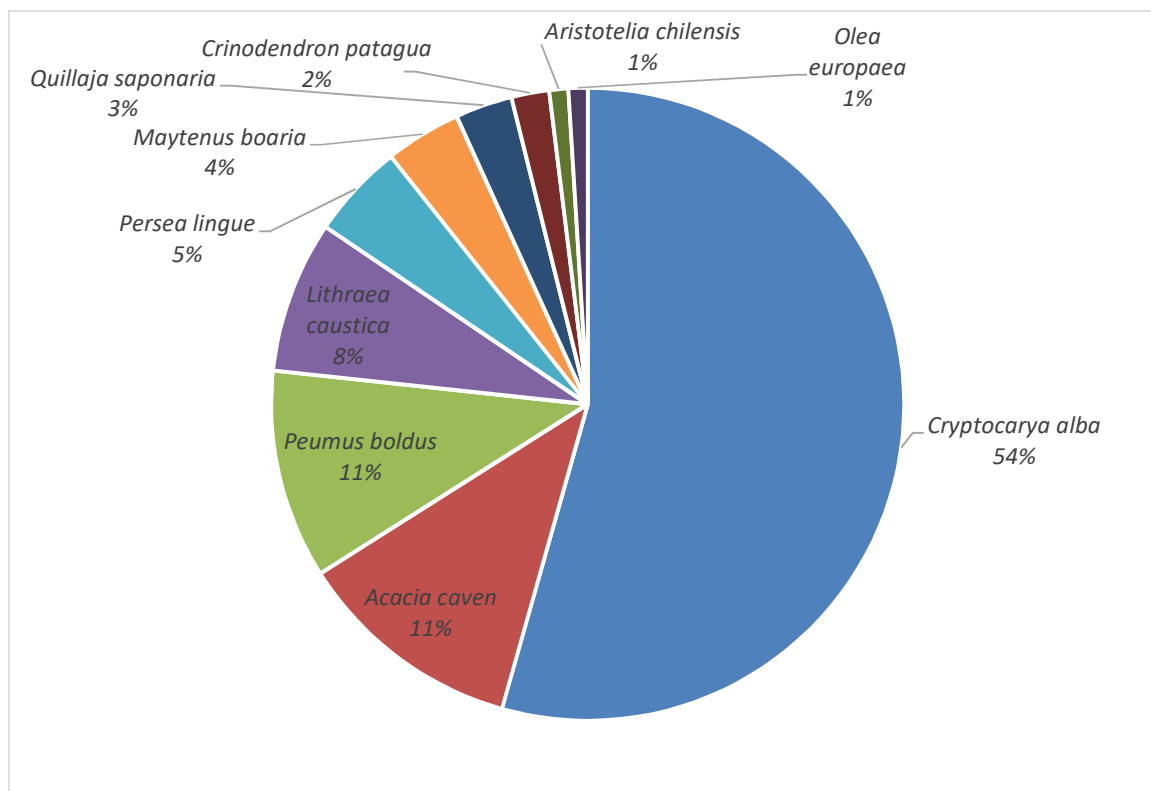


Figura 52. Composición de especies arbóreas en parcelas muestreadas en zona Sur. Fuente: elaboración propia.

En el Anexo 5 se entregan fichas de la caracterización de los bosques medidos en las parcelas de muestreo realizadas en el área peri-urbana, en la Figura 53 se muestra un ejemplo.

Humedal Batuco (parcela 1)	
Administración:	Distintos privados
Comuna:	Lampa
Formación vegetacional:	Bosque Espinoso

Zona de análisis:	Noroeste
Valor NDVI (primavera):	0,16
Valor NDVI (invierno):	0,10
Composición y estructura de la parcela:	
Cobertura arbórea:	95 %
Individuos en la parcela:	14 ind.
Individuos por hectárea:	350 ind/ha.
Área basal:	4,5 m ²
Índice de Área Foliar:	2,7
Caracterización de individuos muestreados:	
Riqueza de especies:	2 especies (<i>Acacia caven</i> y <i>Maytenus boaria</i>)
Altura \bar{x} :	9,3 m.
DAP \bar{x} :	12,8 cm.
Copa viva \bar{x} :	45 %
Daño copa viva \bar{x} :	48,6%
Índice de Área Foliar:	3,2

Figura 53. Ejemplo ficha área peri-urbana.

7.2.2.3 Estructura y composición del arbolado urbano medido en campaña de terreno

Para la descripción de las parcelas de la zona urbana, se debe recordar que estas se ubicaron en el área de mayor densidad de copas del área verde muestreada. La cobertura del estrato arbóreo, es menor que la del bosque del área peri-urbana, mientras que el área basal promedio es mayor, indicando que los tamaños de los árboles son mayores en el área urbana que en la peri-urbana. De la misma manera esto queda corroborado por la menor densidad [ind/ha] que existe para el área urbana (Tabla 20).

Tabla 20. Estadísticas descriptivas de parcelas en área urbana. Datos en parentesis representan la desviación estandar de la muestra.

Parcelas	\bar{x} estratas	\bar{x} ind/ha	\bar{x} cobertura estrato arbóreo [%]	\bar{x} IAF	\bar{x} Área basal [m ² /ha]
34	2	235,2 (110,2)	66 (15,6)	2,6 (1,2)	22,4 (25,2)

Fuente: elaboración propia.

Al contrastar las dimensiones estructurales entre las parcelas urbanas y peri-urbanas se observa que el tamaño de los árboles en áreas verdes es mayor que los del área peri-urbana, en términos de altura y DAP. En cuanto a las características de copa, se observó que los árboles en el área urbana están en condiciones mejores al observar los porcentajes de copa viva y se observa que el nivel de daño de copa es menor que en las áreas peri-urbanas (Tabla 21).

Tabla 21. Estadísticas descriptivas de individuos en parcelas de área urbana. Datos en parentesis representan la desviacion estandar de la muestra.

Árboles medidos	\bar{x} Altura [m]	\bar{x} DAP [cm]	\bar{x} Cobertura copa [%]	Promedio Daño [%]	Promedio IAF
320	13,5 (5,2)	30 (16,7)	77,7 (18,8)	8 (12,1)	3,4 (1,4)

Fuente: elaboración propia.

En la Figura 54 se muestra la composición en áreas urbanas que es muy distinta al área periurbana, es así como la riqueza del área urbana alcanza al menos 17 especies. No se observa dominancia particular en la composición de especies en áreas verdes, sin embargo destaca la presencia de Quillay (*Quillaja saponaria*) con mayor dominancia, seguido por el Cedro del Líbano (*Cedrus libani*) y el Pimiento (*Schinus areira*). Sólo se reconoce la presencia de tres especies nativas (Pimiento naturalizado), el resto son especies de origen exótico e incluso existen dos especies invasivas, el Ailanto (*Ailanthus altissima*) y el Aromo (*Acacia melanoxylon*).

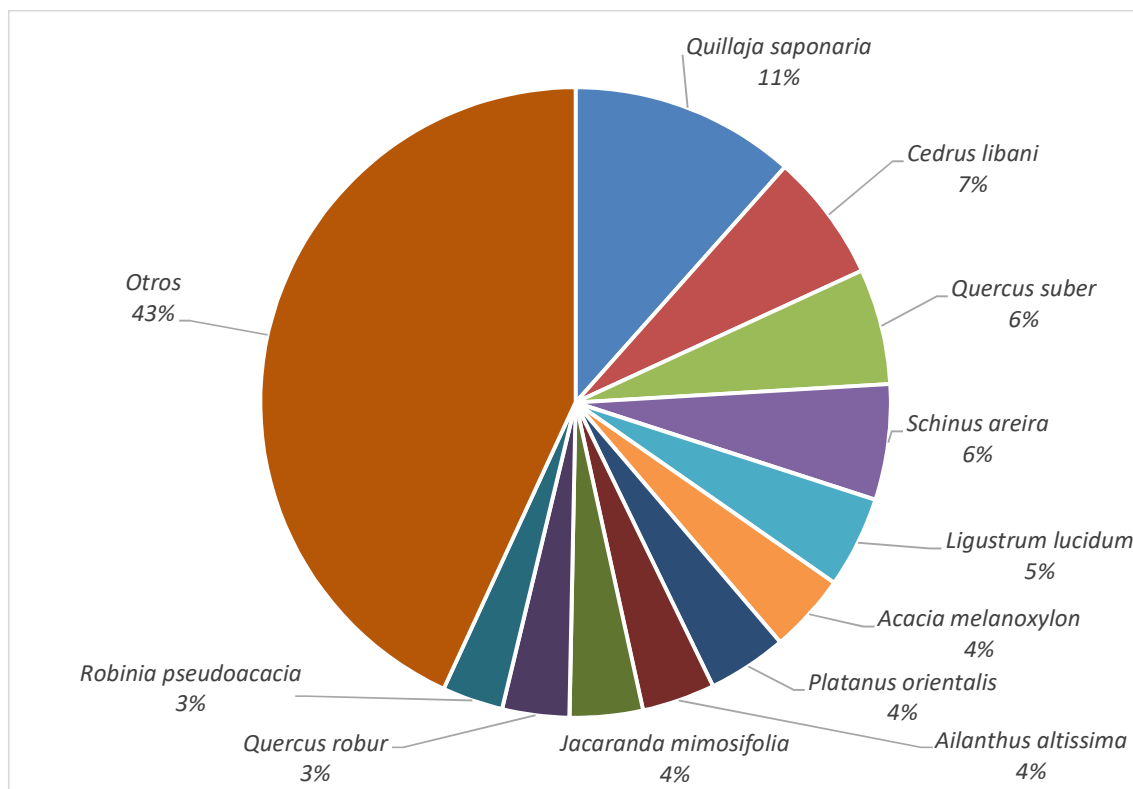


Figura 54. Composición de especies en área urbana. Fuente: elaboración propia.

Dentro de la categoría 'Otros' de la Figura 54 se encuentran: *Acer negundo*, *Araucaria angustifolia*, *Brachychiton populneus*, *Elaeagnus angustifolia*, *Fraxinus ornus*, *Grevillea robusta*, *Koelreuteria paniculata*, *Morus alba*, *Persea americana*, *Phytolacca dioica*, *Prunus cerasifera*, *Punica granatum*, *Tilia americana*, *Beilschmiedia miersii*, *Casuarina equisetifolia*, *Ceratonia siliqua*, *Erythrina umbrosa*, *Olea europaea*, *Paulownia tomentosa*, *Cupressus macrocarpa*, *Maytenus boaria*, *Taxodium distichum*, *Crinodendron patagua*, *Gleditsia triacanthos*, *Lithraea caustica*, *Pinus radiata*, *Quercus ilex*, *Eucaliptus sp.*, *Populus sp*, *Bauhinia forficata*, *Cryptocarya alba*, *Magnolio grandiflora*, *Fraxinus excelsior*.

En el Anexo 5 se entregan las fichas de la caracterización del arbolado medido en las parcelas de muestreo realizadas en el área urbana, en la Figura 55 se muestra un ejemplo.
 Figura 55. Ejemplo ficha área urbana.

Parque Bicentenario de Cerrillos	
	
Administración:	PARQUEMET
Comuna:	Cerrillos
Superficie	250 hectáreas
Valor NDVI (primavera): Valor NDVI (invierno):	0,178 0,265
Cobertura de vegetación Cobertura arbórea: Individuos en la parcela: Individuos por hectárea: Área basal: Índice de Área Foliar:	70% 9 ind. 225 ind/ha 10,95 m ² 1,33
Caracterización de individuos muestreados Riqueza de especies: Altura \bar{x} : DAP \bar{x} : Copa viva \bar{x} : Daño copa viva \bar{x} : Índice de Área Foliar \bar{x} :	1 especie (<i>Pinus strobus</i>) 11,33 m 24,89 cm 90% 11,67% 3,82

7.3 Objetivo específico c) Propuesta de modelo que permita monitorear y cuantificar el aporte del arbolado para remover material particulado - MP10 por Resuspensión - por las coberturas arbóreas

7.3.1 Obtención y análisis de concentración de MP10 en la Región Metropolitana de para ser utilizado en modelo I-Tree

A continuación, se describen las tendencias en concentración de MP10 en la RMS de acuerdo a los datos entregados por el mandante. El análisis de la concentración de MP10 para la RMS se enfoca en vislumbrar el comportamiento de este contaminante, vale decir variaciones estacionales, diarias y variaciones horarias, para el periodo del 2016 - 2019.

Para lo anterior, se emplearon datos correspondientes a las concentraciones hora de las 11 estaciones de la Red de monitoreo MACAM del Departamento de Redes de Monitoreo de la División de Calidad del Aire del Ministerio de Medio Ambiente de la Región Metropolitana. Cabe destacar, que los datos del 2016 al 2018 presentan dos validaciones, mientras los datos del 2019 constan de una sola validación. Esto último, no es dificultad para el cálculo posterior de depositación, dado que no se registraron anomalías en los datos de ese año.

Se obtuvieron los registros horarios de concentraciones de MP10 [$\mu\text{g}/\text{m}^3$] para cada una de las 11 estaciones de la Red de Monitoreo (MACAM) de la RMS. En primer lugar, se graficó la tendencia anual en la Figura 56 en que se observa el aumento en la concentración de contaminantes se produce desde el mes de abril, para comenzar a disminuir a partir del mes de Julio, llegando a los valores más bajos en el mes de Septiembre. La estación de Las Condes no presenta mayores variaciones a lo largo del año y junto a la estación de Talagante y Puente Alto son las que presentan menores valores a lo largo de todo el año (Figura 56).

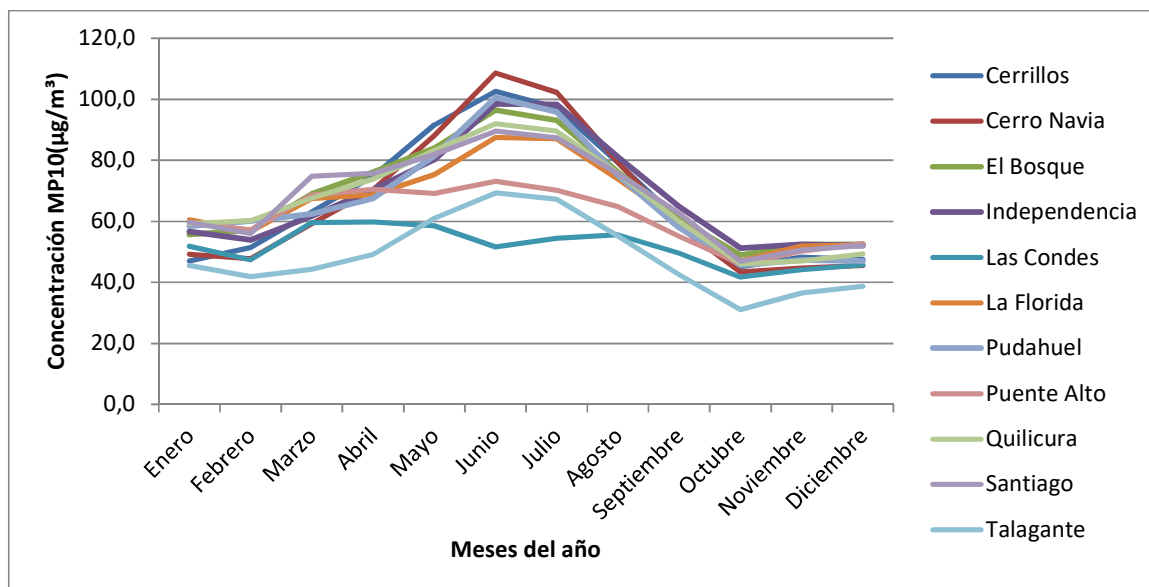


Figura 56. Tendencia del promedio mensual de la concentración de MP10 promedio para el periodo 2016 a 2019 para cada estación de la Red MACAM de la RMS. Fuente: elaboración propia.

De acuerdo al gráfico anterior, se decide observar el comportamiento de la concentración de MP10 en relación a su estacionalidad. Además de justificarse este análisis por la estacionalidad que presenta el contaminante, la capacidad de depositación también varía en ambas temporadas dado el carácter caducifolio de algunas especies de árboles. De esta forma, se analiza la tendencia en concentraciones para las 11 estaciones de la Red MACAM durante el periodo estival, correspondiente a los meses de Diciembre, Enero y Febrero, y durante el periodo invernal, correspondiente a los meses de Junio, Julio y Agosto.

A continuación se muestra la tendencia horaria para todas las estaciones utilizando el promedio de todos los meses. Se puede observar que para la mayoría de las estaciones la mayor concentración se produce entre las 6 y 11 horas, mientras que durante la tarde existe también un aumento entre las 18 y 21 horas pero en menor medida que en la mañana y no para todas las estaciones, siendo más marcado el aumento para la Estación La Florida (Figura 57).

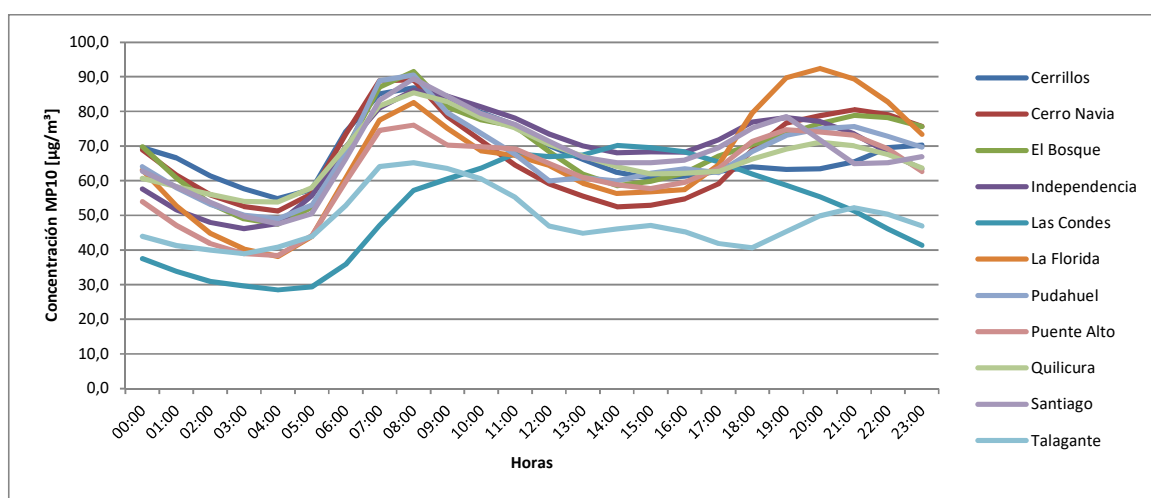


Figura 57. Promedio de concentraciones horarias de MP10 de la Red MACAM (2016-2019). Fuente: elaboración propia.

En la Figura 58 se observa el comportamiento de la concentración del MP10 durante el periodo estival. Se observa que existe un aumento en la concentración a partir de las 6 de la mañana, manteniéndose en un máximo hasta las 11 horas, cuando comienza a disminuir la concentración. Este comportamiento se repite para todas las estaciones menos la de Las Condes, la cual presenta su peak desde las 10 horas hasta pasadas las 12 del mediodía. Los mayores peak ocurren en la estación de Puente Alto y Pudahuel, mientras que los menores en la estación de Talagante y Cerro Navia.

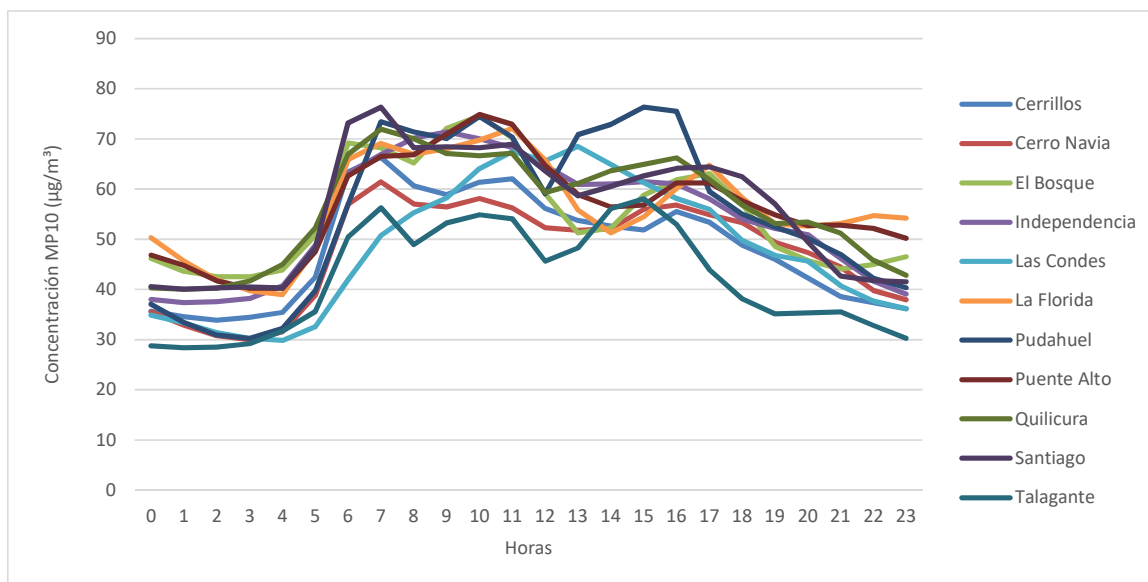


Figura 58. Concentración MP10 promedio durante la temporada estival (Diciembre, Enero y Febrero) para el periodo 2016 a 2019 por cada estación de la Red MACAM. Fuente: elaboración propia.

En cuanto a la distribución diaria de la concentración de MP10 en temporada invernal se observan dos peak, uno entre 6 y 11 horas y el otro después de las 18 horas (Figura 59). Estas tendencias no son las mismas para la estación de Las Condes, en que el aumento en la concentración de MP10 se produce desde las 7 horas y sigue subiendo hasta las 17 horas, pero de manera más lenta y siempre por debajo de los peaks de las otras estaciones. La mayor concentración durante los peak ocurre en Cerro Navia, Pudahuel y El Bosque durante la mañana, mientras que después de las 18 horas el peak se produce en La Florida, Cerro Navia, El Bosque y Pudahuel.

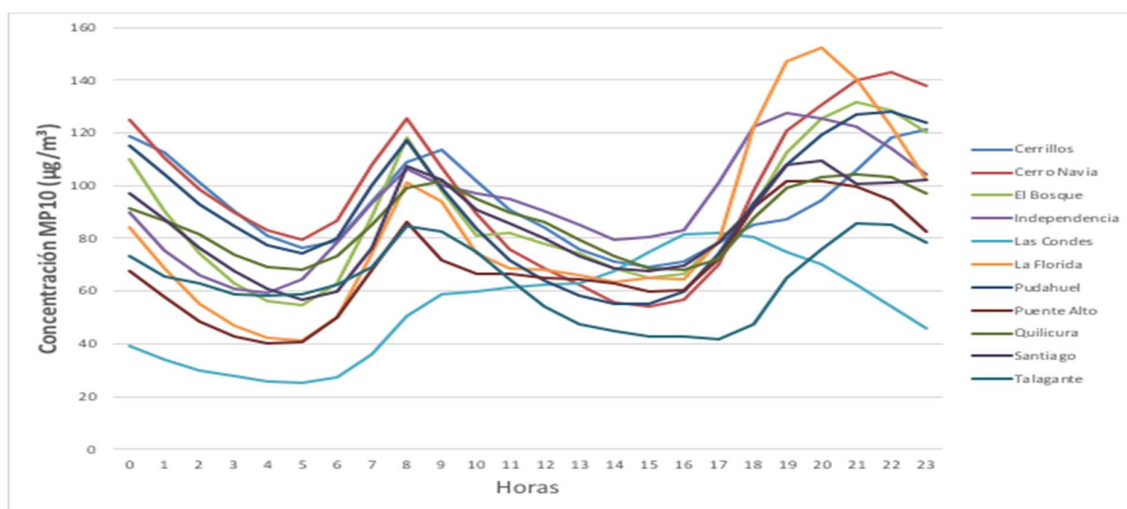


Figura 59. Concentración MP10 promedio durante la temporada invernal (Junio, Julio y Agosto) para el periodo 2016 a 2019 por cada estación de la Red MACAM. Fuente: elaboración propia.

En cuanto a las concentraciones máximas de MP10 durante el periodo estival, se produce un peak entre 7 y 11 horas y otro entre 12 y 16 horas (Figura 60). Estas máximas ocurren en las estaciones de Quilicura y Pudahuel en ambos horarios. Cabe destacar, que la estación de Las Condes tiene un peak a las 17 horas, mucho menor a las comunas anteriormente mencionadas, al igual que en El Bosque y Cerrillos donde el peak ocurre entre 13 y 14 horas.

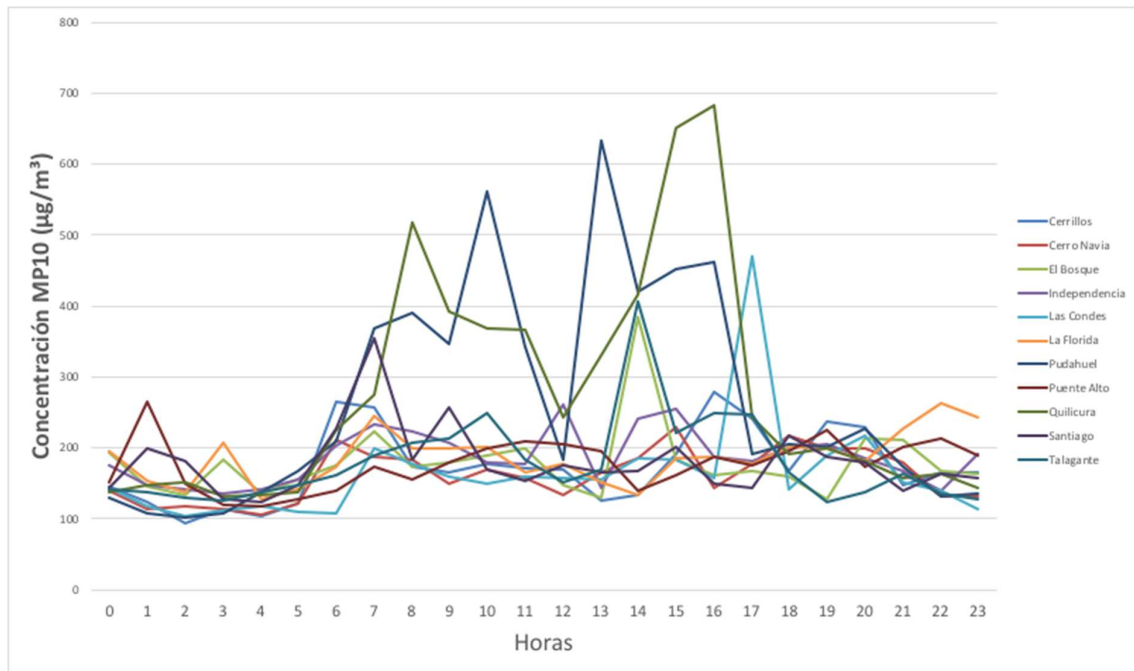


Figura 60. Concentración máxima de MP10 durante la temporada estival (Diciembre, Enero y Febrero) para el periodo 2016 a 2019 por cada estación de la Red MACAM. Fuente: elaboración propia.

Los peak de las máximas en concentración de MP10 en temporada invernal ocurren desde las 16 horas en adelante (Figura 61). Los mayores peak ocurren en las estaciones de Pudahuel, El Bosque, Cerro Navia e Independencia.

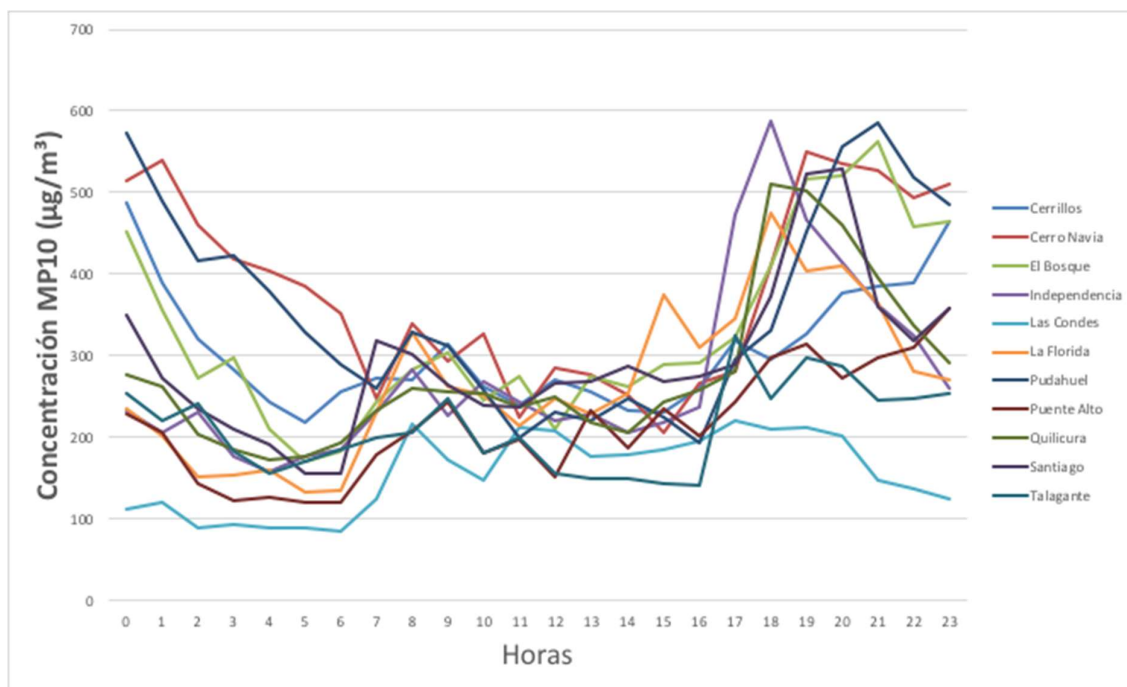


Figura 61. Concentración máxima de MP10 durante la temporada invernal (Junio, Julio y Agosto) para el periodo 2016 a 2019 por cada estación de la Red MACAM. Fuente: elaboración propia.

Los análisis de tendencias de concentración de MP10 en la RMS se encuentran en Anexo 3 Archivo Excel con velocidades de viento.

7.3.1.1 Mapas de distribución de concentración de MP10

A continuación se muestran los mapas que ilustran la distribución de la concentración de MP10 tanto en el área urbana, como peri-urbana, según temporada estival e invernal.

En la Figura 62 se observa que para el período estival, las mayores concentraciones de MP10 se encuentran en el área metropolitana de Santiago, siendo Talagante, la estación de la red MACAM que presenta menor nivel de contaminantes MP10.

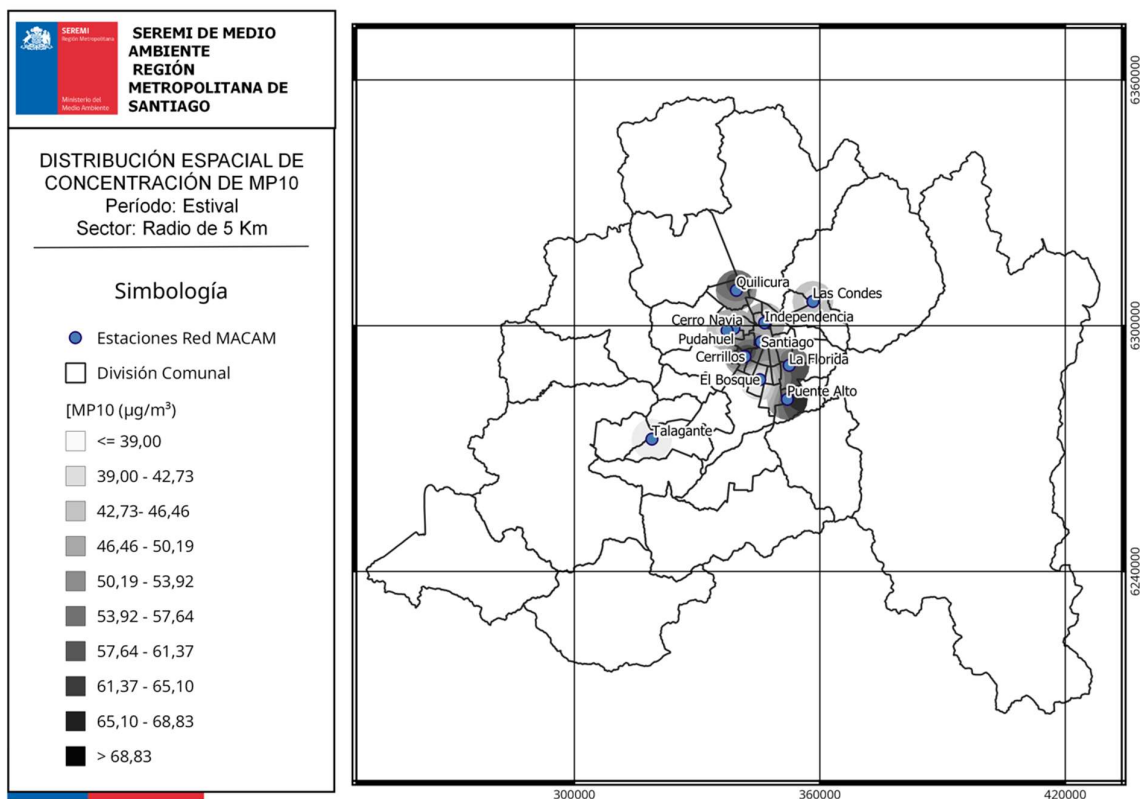


Figura 62. Distribución espacial de concentraciones de MP10 para el período estival en la RMS, dentro de un radio de 5 kilómetros. Fuente: elaboración propia.

En lo que respecta al área metropolitana, en la Figura 63, se observa que para el periodo estival, mayores concentraciones de contaminantes se visualizan en las estaciones de La Florida, Puente Alto, Cerrillos y Quilicura; mientras que la estación que registró menor presencia de MP10 es El Bosque.

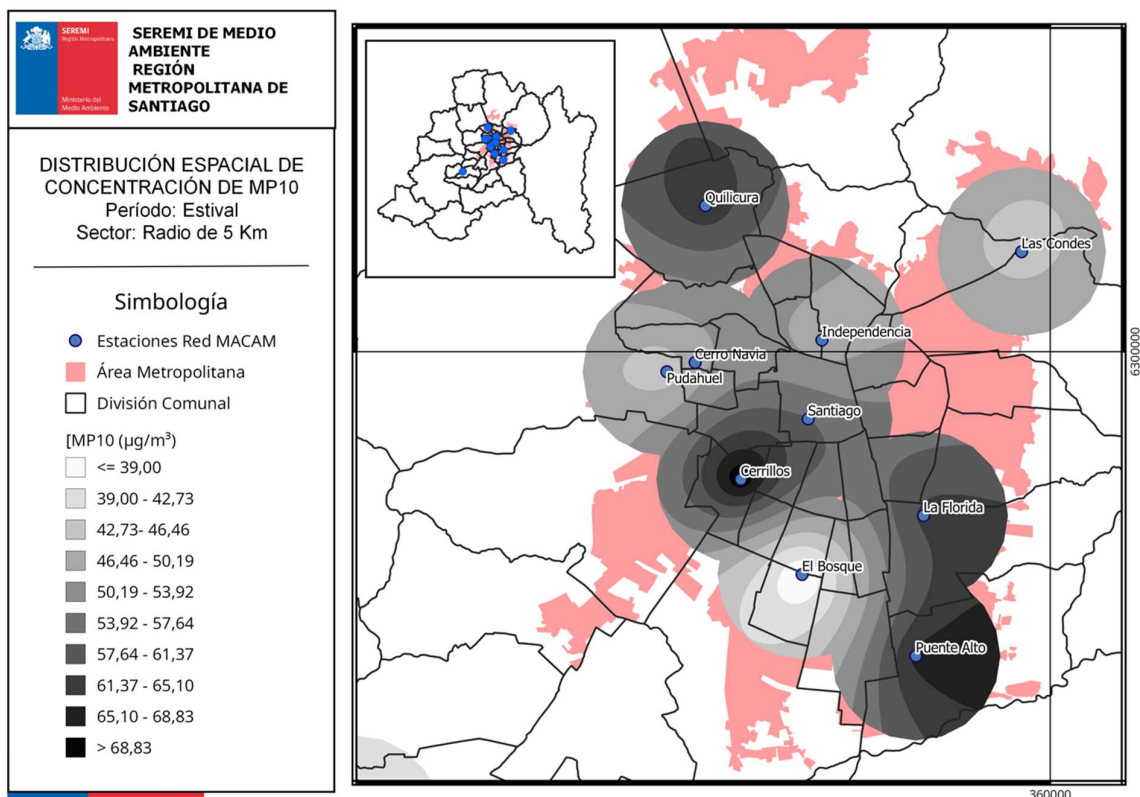


Figura 63. Distribución espacial de concentraciones de MP10 para el período estival en el área metropolitana de la RMS, dentro de un radio de 5 kilómetros. Fuente: elaboración propia.

En cuanto a la concentración de MP10 en la temporada invernal, se observa en la Figura 64, que al igual que en temporada estival, la estación de la red MACAM de Talagante presenta las bajas concentraciones. Cabe agregar, que la estación de Las Condes también presenta bajas concentraciones de MP10 para esta temporada del año.

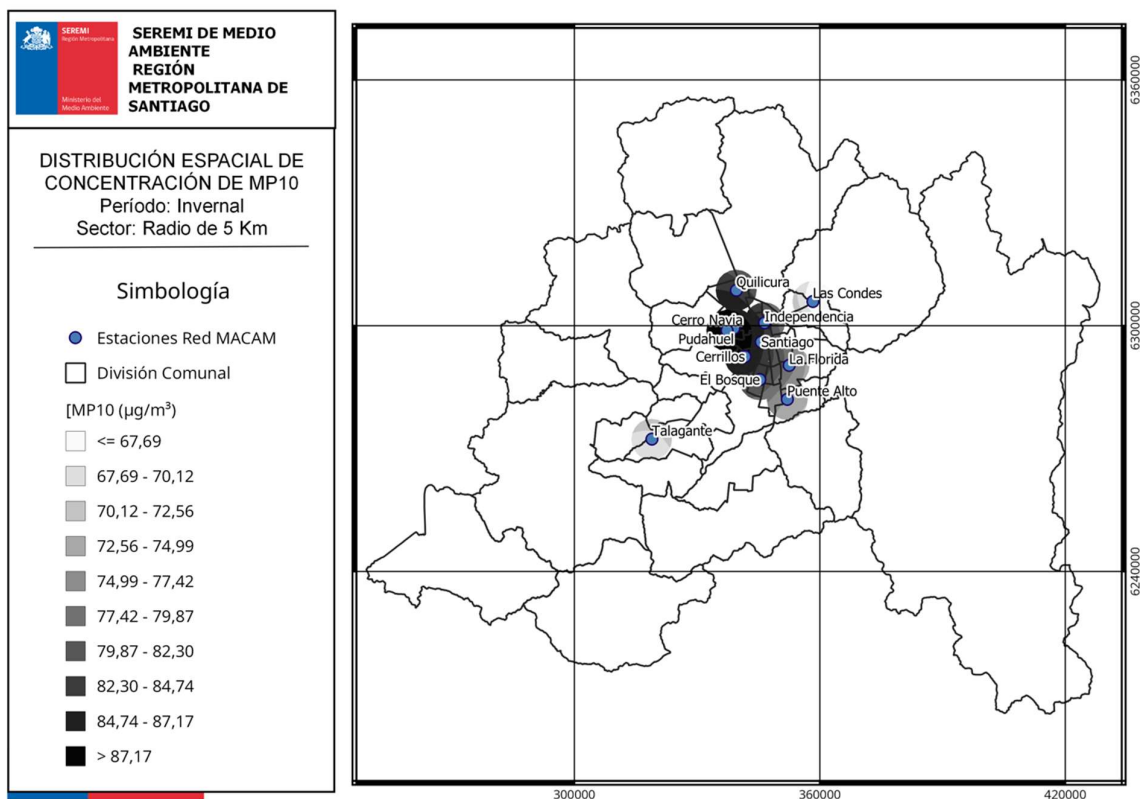


Figura 64. Distribución espacial de concentraciones de MP10 para el período invernal en la RMS, dentro de un radio de 5 kilómetros. Fuente: elaboración propia.

En relación al área metropolitana de Santiago, en la Figura 65, se observa que las mayores concentraciones de MP10 se encuentran en el área Oeste del área Metropolitana de Santiago, siendo Pudahuel, Cerro Navia y Cerrillos, las estaciones que presentan mayores concentraciones. Las estaciones de La Florida, Puente Alto y Las Condes, son las que registran las menores concentraciones de MP10 para la temporada invernal.

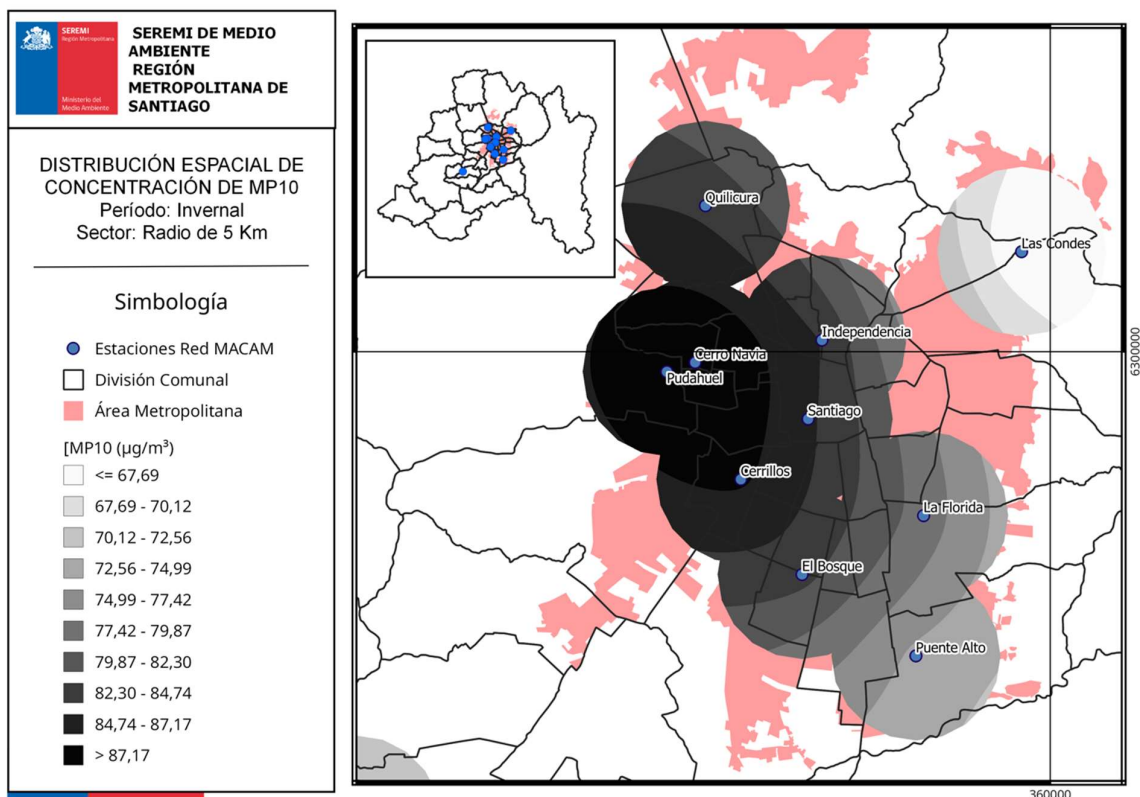


Figura 65. Distribución espacial de concentraciones de MP10 para el período invernal en el área metropolitana de la RMS, dentro de un radio de 5 kilómetros. Fuente: elaboración propia.

7.3.2 Obtención y análisis para velocidades de vientos para ser utilizado en el modelo I-Tree

Para el cálculo de la velocidad de depositación en árboles, de acuerdo a las ecuaciones 1 y 2 expuestas en la sección Viento en la Región Metropolitana: análisis de datos de velocidad del viento, se requiere de un valor de velocidad del viento. Esta velocidad del viento se obtuvo desde las estaciones de la red MACAM. Los valores promedio de viento se obtuvieron para el periodo comprendido entre el 1 de enero de 2019 y el 31 de diciembre de 2019.

Se realizó un análisis horario de los datos tanto para el periodo estival (Diciembre, Enero, Febrero) como invernal (Junio, Julio, Agosto), con tal de evidenciar la existencia de diferencias de velocidades de viento entre las 00 y 11 horas (horario AM), y 12 a 23 horas (horario PM).

La Figura 66 muestra la velocidad promedio del viento en las estaciones de la red MACAM para el horario AM y PM en temporada invernal y estival. Cabe notar que la mayor diferencia en la velocidad del viento se produce durante el horario de 12 a 23 horas de verano, con un peak máximo de 4 [m/s] en la estación de Cerrillos. Para el resto de las estaciones en este mismo horario el valor no sube por sobre 2,5 [m/s]. La velocidad del viento en horario entre 00 y 11 horas tanto en temporada estival o invernal no presenta mayores variaciones.

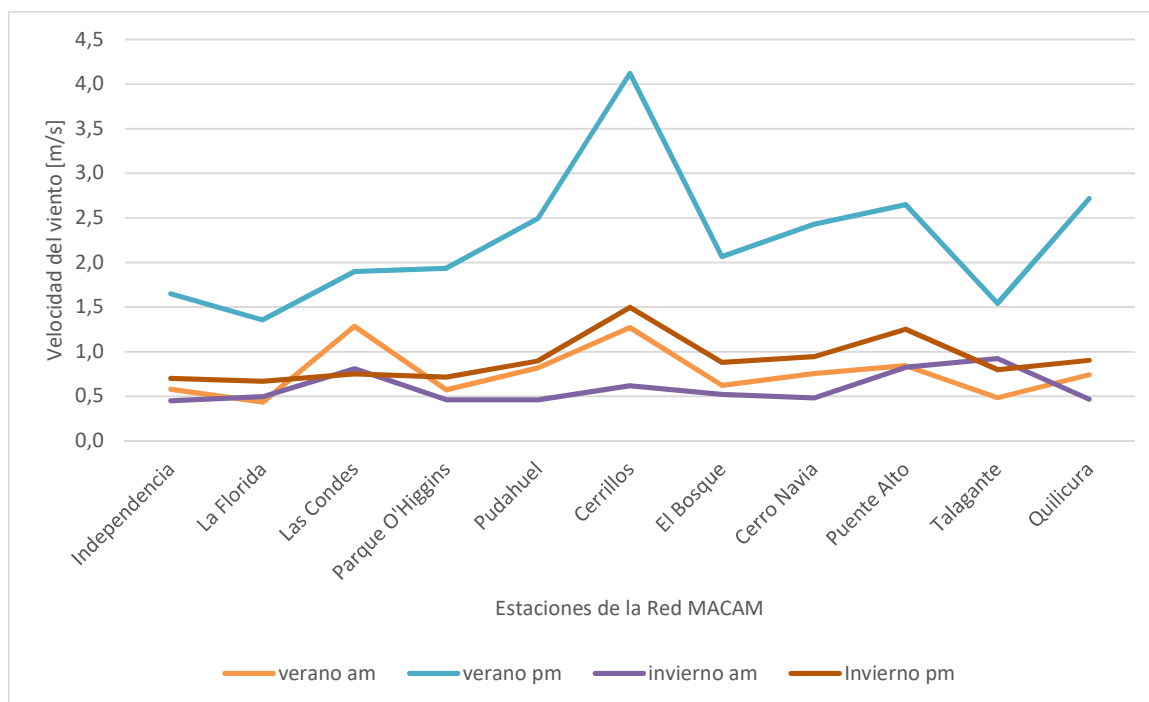


Figura 66. Velocidad promedio del viento [m/s] según estación de la red MACAM entre las 00 y 11 horas, y 12 a 23 horas para el periodo invernal y estival. Fuente: elaboración propia.

En cuanto a la velocidad máxima del viento no existe mayor diferencia entre los distintos horarios del día y los periodos de análisis anuales. Para ambos horarios y estaciones del año el peak se produce en la estación de Cerrillos, mientras que entre las 12 a 23 horas (Figura 67).

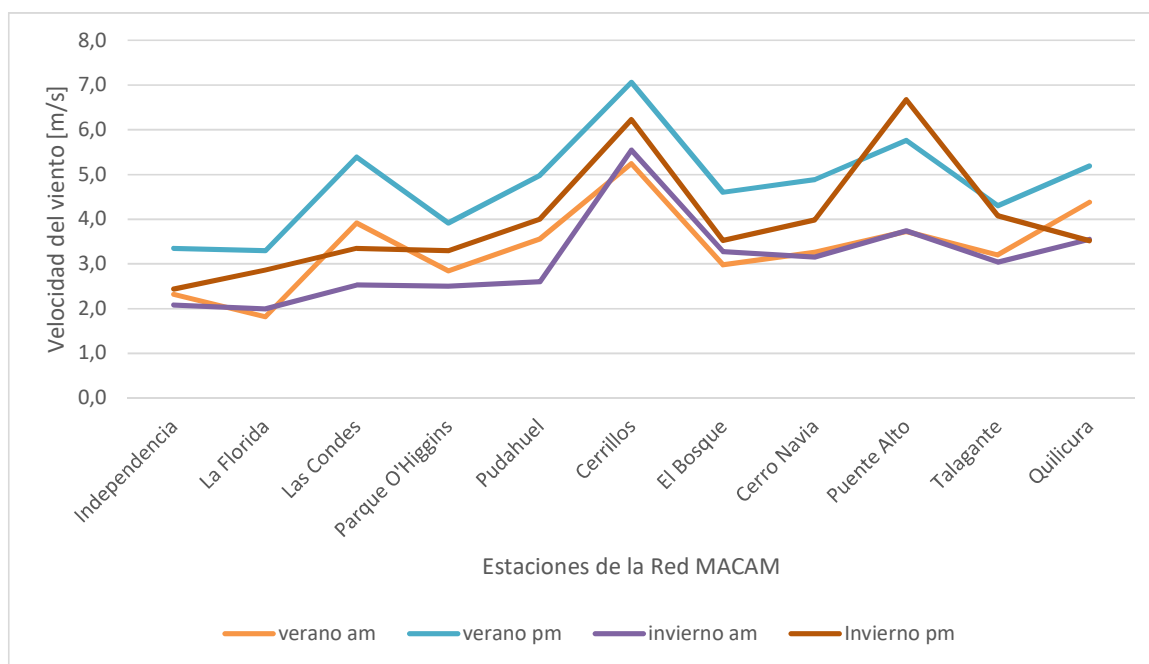


Figura 67. Velocidad máxima del viento [m/s] según estación de la red MACAM entre las 00 y 11 horas, y 12 a 23 horas para el periodo invernal y estival. Fuente: elaboración propia.

En cuanto a la dirección del viento durante el verano entre las 00 y 11 horas para la mayoría de las estaciones esta sigue una dirección sureste. Durante el invierno entre las 00 y 11 horas la dirección en las estaciones de El Bosque, Quilicura, Independencia, Pudahuel y Cerro Navia tienen un cambio de dirección casi completamente al sur. La estación de Las Condes presenta dirección de viento distinta al resto de las estaciones, dominando la dirección este, tanto en verano como invierno en horario de 12 a 23 horas (Figura 68).

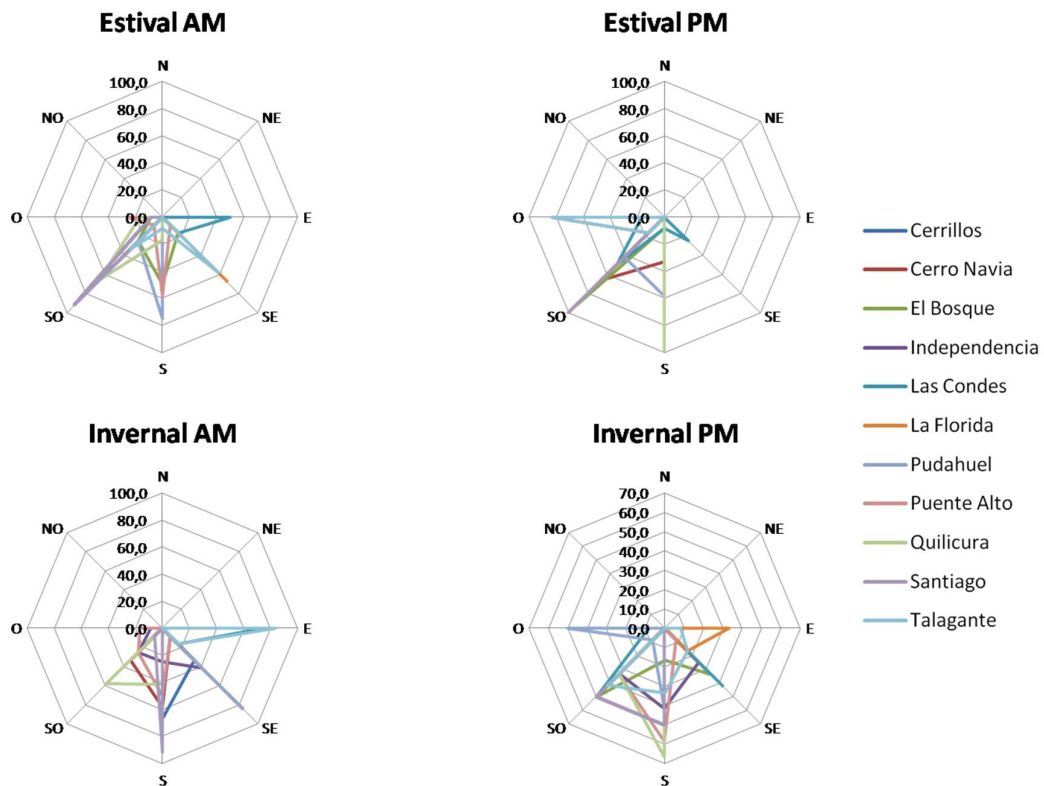


Figura 68. Dirección del viento dominante según estación de la red MACAM entre las 00 y 11 horas, y 12 a 23 horas para el periodo invernal y estival. Fuente: elaboración propia.

Derivado de este análisis, se identificó un peak de velocidad entre las 6 y 11 horas, valores que fueron usados posteriormente para los cálculos de depositación.

Los resultados del análisis de velocidad y dirección de viento se encuentra en el Anexo 4 Archivo Excel con concentración de material Particulado.

7.3.3 Obtención de periodo con hojas de árboles caducifolios a través de análisis fenológico de la vegetación de la Región Metropolitana para ser utilizado en modelo I-Tree

Se utilizó la fenología de la vegetación para cuantificar los días del año en que la vegetación del área urbana y peri-urbana es capaz de realizar depositación de MP10 referido a la métrica

fenológica Largo de la temporada productiva. A continuación, se entregan las estadísticas descriptivas por zona de análisis en cuanto al número de días en que la vegetación caducifolia está productiva durante el año (Tabla 22). El detalle de la métrica del Largo de la estación productiva por cada parcela puede ser revisado en el Anexo 1 de Material Complementario.

Tabla 22. Estadísticas descriptivas relativas al Largo de la temporada productiva para cada zona de análisis.

Zona	n	Promedio de Largo de la temporada productiva (días)	Valor Máximo de Largo de la temporada productiva (días)	Valor Mínimo de Largo de la temporada productiva (días)
Andes	22	168,6	263	110
Costa	5	142	165	125
Noroeste	11	137,2	205	82
Sur	5	157,2	186	124
Urbana	34	192,2	249	102
Total general	77			

Fuente: elaboración propia.

Se observa que el área urbana presenta los mayores Largos de temporada productiva, posiblemente debido a que los árboles se desarrollan en condiciones adecuadas de riego, con lo que logran mantener las hojas verdes por más tiempo que los árboles caducos del área peri-urbana.

Así mismo, los menores valores de la métrica del Largo de la temporada productiva se presentan en la zona Noroeste, área que muestra las peores condiciones de sitio, visualizadas en bosques menos densos y con más daños de copa. Se agrega a lo anterior que la zona Noroeste de la ciudad de Santiago, es la que registra las menores precipitaciones en relación a la región completa.

Se observa que los mayores valores del Largo de la temporada productiva se encuentran en la zona Andes, debido a que contiene las zonas más altas de la Región, que conservan condiciones de humedad y temperaturas más controladas, lo que promueve que los árboles caducos entren en receso de invierno más tardíamente.

Por último, se debe mencionar que del total de árboles medidos en la campaña de terreno de verano, un 16,3% corresponde a especies de hoja caduca. En el área peri-urbana la única especie corresponde a *Nothofagus macrocarpa* muestreada en las parcelas de El Roble y corresponde al 3,2% de los individuos medidos en predios peri-urbanos, mientras que en el área urbana un 41,6% de los individuos muestreados corresponden a especies de hoja caduca (26 especies).

7.3.4 Resultados de cálculos de depositación de MP10 por la vegetación muestreada utilizando el modelo I-Tree

A continuación se presentan los resultados del cálculo de depositación de MP10. En complemento a las tablas y mapas entregados en esta sección, en el Anexo 1 se presentan tablas y mapas con resultados complementarios. En dicho anexo se presentan los resultados de forma detallada, por cada parcela de muestreo realizada (77 parcelas en total), mientras que las tablas siguientes entregan resultados resumidos por cada zona de análisis.

En el Anexo 6 Archivo Excel con cálculos de depositación de MP10, se entregan las planillas Excel con los cálculos de depositación referidos a cada uno de los 941 individuos arbóreos muestreados en la campaña de terreno, desde el cual se extrajeron las tablas resumen presentadas a continuación. En este Anexo se entrega de forma autoexplicativa, el mecanismo paso a paso desde el cual se realizó el cálculo de depositación de MP10 según el modelo I-Tree, detallando las transformaciones de unidades para llegar a los resultados que se presentan.

Los resultados de los cálculos de depositación de MP10 se muestran a continuación, primero se detalla el resumen para la depositación por árbol de acuerdo a las distintas zonas de análisis. En segundo lugar se muestran los resultados expresados en depositación de MP10 por cada especie muestreada, y por último se muestran los resultados de depositación de MP10 llevados a hectárea.

7.3.4.1 Depositación por árbol

Esta sección muestra los resultados del cálculo de depositación de MP10 en la vegetación arbórea peri-urbana y urbana de la RMS. Se observa que todos los árboles dentro y alrededor de la ciudad de Santiago depositan MP10 en su follaje, independiente del área foliar que presenten (Tabla 23).

La Tabla 23 muestra las depositación por árbol en las distintas zonas de análisis. La mayor depositación por árbol ocurre en la zona urbana, lo cual está dado principalmente porque existen estaciones con registros de mayores concentraciones de MP10 que hacen, de acuerdo al modelo utilizado, que la depositación sea mayor.

Se suma a lo anterior, que los registros de más coberturas de copa y menor daño están en el área urbana (Tabla 23) lo que incrementa su capacidad de depositación; por último, existen varias especies urbanas que presentan áreas foliares mayores que las encontradas en las especies del área peri-urbana, como es el caso de las coníferas (Tabla 23).

En las zonas del área peri-urbana, se observa que la mayor depositación considerando concentración máxima de MP10 ocurre en la zona Noroeste, dado que en esta área se registran las mayores concentraciones de MP10. Cabe resaltar que la variabilidad en la depositación es alta para todas las zonas de muestreo, especialmente en la zona urbana (Tabla 23).

Tabla 23. Promedio y desviación estándar (en paréntesis) para la depositación por zona utilizando concentración de MP10 media y máxima para árboles en condiciones de copa actual. Datos en parentesis representan la desviacion estandar de la muestra.

Zona	n	Deposición anual por árbol utilizando la media de concentración de MP10 [T/año]	Deposición anual por árbol utilizando la máxima concentración de MP10 [T/año]
Urbano	328	0,0012 (0,016)	0,0047 (0,0060)
Andes	316	0,0006 (0,0007)	0,0023 (0,0027)
Sur	104	0,0006 (0,0008)	0,0026 (0,0036)
Costa	98	0,0006 (0,0005)	0,0025 (0,0020)
Noroeste	114	0,0005 (0,0008)	0,0032 (0,0049)
Total general	941		

Fuente: elaboración propia.

La Tabla 24 muestra el resumen de la deposición por zona cuando se utiliza dentro del modelo la concentración máxima de contaminantes. Esta sigue las mismas tendencias en su distribución que al utilizar el promedio de concentración de MP10. Cabe destacar que el potencial de deposición se incrementa de manera considerable al considerar los valores máximos de concentración.

La Tabla 24. Promedio y desviación estándar (en paréntesis) para la deposición por zona utilizando concentración de MP10 media y máxima para árboles en condiciones de copa completa. muestra un aumento mayor en el valor de deposición de MP10 al considerar el caso de copa completa en los árboles muestreados, dado que el área foliar es mayor, por tanto posee mayor superficie para depositar.

Tabla 24. Promedio y desviación estándar (en paréntesis) para la deposición por zona utilizando concentración de MP10 media y máxima para árboles en condiciones de copa completa. Datos en parentesis representan la desviacion estandar de la muestra.

Zona	n	Deposición anual por árbol utilizando la media de concentración de MP10 [T/año]	Deposición anual por árbol utilizando la máxima concentración de MP10 [T/año]
Urbano	328	0,0015 (0,0018)	0,0056 (0,0065)
Noroeste	114	0,0008 (0,0011)	0,0049 (0,0067)
Sur	104	0,0008 (0,0009)	0,0034 (0,0041)
Andes	316	0,0008 (0,0008)	0,0028 (0,003)
Costa	98	0,0008 (0,0006)	0,0032 (0,0024)

Zona	n	Deposición anual por árbol utilizando la media de concentración de MP10 [T/año]	Deposición anual por árbol utilizando la máxima concentración de MP10 [T/año]
Total general	941		

Fuente: elaboración propia.

7.3.4.2 Deposición por especie

En segundo lugar, se evaluó la deposición de acuerdo a cada especie identificada en el muestreo de terreno, también bajo condiciones de copas existentes y condiciones de copa en pleno potencial. Se realizó el cálculo tanto para la concentración de MP10 media y máxima. En el Anexo 2 de material complementario, se muestran los resultados de deposición de cada especie según la zona de análisis, por medio de tablas complementarias a las que se presentan en este apartado.

A continuación se detalla la capacidad de deposición por especie encontrada tanto en la zona urbana como en la peri-urbana. Al igual que en el cálculo por árbol los valores aumentan de manera considerable cuando se incluye en el modelo la concentración máxima de MP10 en vez de la concentración promedio (Tabla 25).

Dentro de las especies nativas destaca el Belloto del Norte, Boldo, Peumo y Patagua como las de mayor potencial de deposición. Dentro de las características a resaltar de estas especies y que maximizan la deposición, se encuentran las hojas coriáceas, con rugosidades y alto contenido de cera. Pero por otro lado, estas son las especies del bosque esclerófilo que requieren mayor cantidad de agua para su sobrevivencia (especies higrófilas).

Dentro de las especies de origen exótico con mayor potencial de deposición se encuentran el Pino canadiense, Ciprés, el Cedro del Líbano y el Tilo. Especies de distintos rasgos funcionales. El Palto presenta hojas de gran tamaño y coriáceas, el Pino presenta área foliar alta, similar al Aromo; mientras que el Tilo presenta hojas grandes y con vellosidades.

Tabla 25. Promedio y desviación estándar (en paréntesis) para la deposición por especie utilizando concentración de MP10 media y máxima para árboles en condiciones de copa actual. Datos en parentesis representan la desviación estandar de la muestra.

Especie	Deposición anual por especie utilizando media de concentración de MP10 [T/m ² /año]	Deposición anual por especie utilizando máxima de concentración de MP10 [T/m ² /año]
<i>Pinus strobus</i>	0,000091 (0,000026)	0,00034 (0,00009)
<i>Cupressus macrocarpa</i>	0,000056 (0,000021)	0,00025 (0,0001)
<i>Cedrus libani</i>	0,000041 (0,000012)	0,00013 (0,00004)
<i>Taxodium distichum</i>	0,000032 (0,000004)	0,00014 (0,00003)

Espece	Deposición anual por especie utilizando media de concentración de MP10 [T/m ² /año]	Deposición anual por especie utilizando máxima de concentración de MP10 [T/m ² /año]
<i>Beilschmiedia miersii</i>	0,000031 (0,00001)	0,0001 (0,00003)
<i>Persea americana</i>	0,00003	0,0001
<i>Tilia americana</i>	0,000024	0,00009
<i>Pinus radiata</i>	0,000023 (0,000013)	0,00007 (0,00004)
<i>Acacia melanoxylon</i>	0,000021 (0,000012)	0,00008 (0,00005)
<i>Fraxinus ornus</i>	0,000019	0,00006
<i>Crinodendron patagua</i>	0,000019 (0,000004)	0,00007 (0,00001)
<i>Quercus ilex</i>	0,000018 (0,000002)	0,00008 (0,00001)
<i>Olea europaea</i>	0,000018 (0,000004)	0,00006 (0,00001)
<i>Peumus boldus</i>	0,000018 (0,000005)	0,00007 (0,00002)
<i>Cryptocarya alba</i>	0,000018 (0,000007)	0,00007 (0,00002)
<i>Eucaliptus sp.</i>	0,000017 (0,000007)	0,00006 (0,00002)
<i>Magnolio grandiflora</i>	0,000015 (0,000004)	0,00006 (0,00001)
<i>Casuarina equisetifolia</i>	0,000014 (0,000006)	0,00009 (0,00003)
<i>Quillaja saponaria</i>	0,000014 (0,000008)	0,00005 (0,00003)
<i>Celtis australis</i>	0,000014 (0,000006)	0,00006 (0,00002)
<i>Quercus nigra</i>	0,000013 (0,000007)	0,00005 (0,00002)
<i>Bauhinia forficata</i>	0,000013 (0,000006)	0,00005 (0,00002)
<i>Schinus velutinus</i>	0,000013 (0,000002)	0,00005 (0,00001)
<i>Quercus robur</i>	0,000013 (0,000006)	0,00005 (0,00001)
<i>Ailanthus altissima</i>	0,000012 (0,000005)	0,00009 (0,00004)
<i>Persea lingue</i>	0,000012 (0,000002)	0,00005 (0,00001)
<i>Maytenus boaria</i>	0,000012 (0,00001)	0,00005 (0,00005)
<i>Phytolacca dioica</i>	0,000011	0,00004
<i>Platanus orientalis</i>	0,000011 (0,000003)	0,00004 (0,00001)
<i>Quercus suber</i>	0,000011 (0,000006)	0,00004 (0,00002)
<i>Fraxinus excelsior</i>	0,000011 (0,000005)	0,00003 (0,00001)
<i>Ligustrum lucidum</i>	0,00001 (0,000007)	0,00004 (0,00003)

Espece	Deposición anual por especie utilizando media de concentración de MP10 [T/m ² /año]	Deposición anual por especie utilizando máxima de concentración de MP10 [T/m ² /año]
<i>Schinus areira</i>	0,00001 (0,000007)	0,00004 (0,00003)
<i>Populus sp</i>	0,00001 (0,000009)	0,00003 (0,00003)
<i>Acer negundo</i>	0,00001	0,00003
<i>Jacaranda mimosifolia</i>	0,00001 (0,000002)	0,00004 (0,00001)
<i>Robinia pseudoacacia</i>	0,00001 (0,000004)	0,00004 (0,00002)
<i>Lithraea caustica</i>	0,000009 (0,000007)	0,00003 (0,00002)
<i>Ceratonia siliqua</i>	0,000009 (0,000011)	0,00003 (0,00003)
<i>Azara sp</i>	0,000009 (0,000007)	0,00004 (0,00002)
<i>Liquidambar styraciflua</i>	0,000008 (0,000003)	0,00003 (0,00001)
<i>Acacia caven</i>	0,000008 (0,000004)	0,00004 (0,00001)
<i>Erythrina umbrosa</i>	0,000008	0,00002
<i>Grevillea robusta</i>	0,000007	0,00002
<i>Prunus domestica</i>	0,000007	0,00002
<i>Gleditsia triacanthos</i>	0,000007 (0,000003)	0,00002 (0,00001)
<i>Elaeagnus angustifolia</i>	0,000006	0,00002
<i>Kageneckia angustifolia</i>	0,000006 (0,000001)	0,00001 (0,00002)
<i>Ulmus americana</i>	0,000006 (0,000001)	0,00002 (0,00001)
<i>Paulownia tomentosa</i>	0,000005 (0,000001)	0,000005 (0,000001)
<i>Porlieria chilensis</i>	0,000004	0,00002
<i>Punica granatum</i>	0,000004	0,00001
<i>Morus alba</i>	0,000004	0,00004
<i>Nothofagus macrocarpa</i>	0,000004 (0,000001)	0,00003 (0,00001)
<i>Koelreuteria paniculata</i>	0,000004	0,00001
<i>Kageneckia oblonga</i>	0,000003 (0,000004)	0,00001 (0,00002)
<i>Schinus latifolius</i>	0,000002	0,00001
<i>Aristolelia chilensis</i>	0,000002	0,00001
<i>Brachychiton populneus</i>	0,000001	0,000007
Total		

Fuente: elaboración propia.

En la Tabla 26 se muestra el potencial de depositación si es que las especies muestreadas en terreno se encontraran en condiciones de copa completa.

Tabla 26. Promedio y desviación estándar (en paréntesis) para la depositación por especie utilizando concentración de MP10 media y máxima para árboles en condiciones de copa completa.

Espece	Depositación anual por especie utilizando media de concentración de MP10 [T/m ² /año]	Depositación anual por especie utilizando máxima de concentración de MP10 [T/m ² /año]
<i>Pinus strobus</i>	0,0001 (0,000021)	0,00032 (0,00006)
<i>Cupressus macrocarpa</i>	0,000081 (0,000042)	0,00033 (0,00018)
<i>Taxodium distichum</i>	0,000056 (0,000003)	0,00024 (0,00004)
<i>Cedrus libani</i>	0,000052 (0,000011)	0,00016 (0,00003)
<i>Pinus radiata</i>	0,000041 (0,000024)	0,00012 (0,00007)
<i>Persea americana</i>	0,000034	0,00011
<i>Beilschmiedia miersii</i>	0,000032 (0,000008)	0,0001 (0,00002)
<i>Acacia melanoxylon</i>	0,000027 (0,000014)	0,0001 (0,00005)
<i>Tilia americana</i>	0,000024	0,00009
<i>Cryptocarya alba</i>	0,000022 (0,000006)	0,00009 (0,00003)
<i>Peumus boldus</i>	0,000022 (0,000004)	0,00009 (0,00001)
<i>Crinodendron patagua</i>	0,000022 (0,000006)	0,00008 (0,00002)
<i>Quercus ilex</i>	0,000021 (0,000003)	0,0001 (0,00003)
<i>Eucaliptus sp.</i>	0,000021 (0,000011)	0,00008 (0,00004)
<i>Maytenus boaria</i>	0,000021 (0,000011)	0,00009 (0,00005)
<i>Olea europaea</i>	0,000021 (0,000006)	0,00007 (0,00001)
<i>Magnolio grandiflora</i>	0,00002 (0,000006)	0,00008 (0,00002)
<i>Fraxinus ornus</i>	0,000019	0,00006
<i>Casuarina equisetifolia</i>	0,000018 (0,000007)	0,0001 (0,00004)
<i>Quillaja saponaria</i>	0,000018 (0,000009)	0,00007 (0,00004)
<i>Ligustrum lucidum</i>	0,000017 (0,000006)	0,00008 (0,00003)
<i>Azara sp</i>	0,000017 (0,000005)	0,00008 (0,00002)
<i>Phytolacca dioica</i>	0,000017	0,00006

Especie	Depositación anual por especie utilizando media de concentración de MP10 [T/m ² /año]	Depositación anual por especie utilizando máxima de concentración de MP10 [T/m ² /año]
<i>Schinus molle</i>	0,000016 (0,000002)	0,00007 (0,00001)
<i>Quercus suber</i>	0,000016 (0,000007)	0,00006 (0,00002)
<i>Persea lingue</i>	0,000016 (0,000003)	0,00006 (0,000009)
<i>Bauhinia forficata</i>	0,000016 (0,000004)	0,00006 (0,00001)
<i>Punica granatum</i>	0,000015	0,00005
<i>Schinus areira</i>	0,000015 (0,000009)	0,00007 (0,00004)
<i>Acacia caven</i>	0,000015 (0,000006)	0,00007 (0,00003)
<i>Quercus nigra</i>	0,000015 (0,000007)	0,00006 (0,00002)
<i>Celtis australis</i>	0,000015 (0,000006)	0,00006 (0,00002)
<i>Quercus robur</i>	0,000015 (0,000006)	0,00006 (0,00001)
<i>Ailanthus altissima</i>	0,000014 (0,000005)	0,0001 (0,00004)
<i>Platanus orientalis</i>	0,000014 (0,000002)	0,00005 (0,000007)
<i>Lithraea caustica</i>	0,000014 (0,000008)	0,00005 (0,00003)
<i>Aristolelia chilensis</i>	0,000013	0,00005
<i>Populus sp</i>	0,000013 (0,000008)	0,00004 (0,00003)
<i>Fraxinus excelsior</i>	0,000012 (0,000005)	0,00004 (0,00001)
<i>Robinia pseudoacacia</i>	0,000012 (0,000004)	0,00005 (0,00002)
<i>Erythrina umbrosa</i>	0,000011	0,00004
<i>Grevillea robusta</i>	0,000011	0,00003
<i>Liquidambar styraciflua</i>	0,000011 (0,000004)	0,00004 (0,00001)
<i>Jacaranda mimosifolia</i>	0,000011 (0,000001)	0,00003 (0,000006)
<i>Ceratonia siliqua</i>	0,00001 (0,000012)	0,00003 (0,00004)
<i>Acer negundo</i>	0,00001	0,00003
<i>Paulownia tomentosa</i>	0,00001 (0,000001)	0,00004 (0,00001)
<i>Gleditsia triacanthos</i>	0,00001 (0,000004)	0,00003 (0,00001)
<i>Ulmus americana</i>	0,000009 (0,000001)	0,00003 (0,000008)
<i>Prunus domestica</i>	0,000009	0,00003
<i>Kageneckia angustifolia</i>	0,000008 (0,000001)	0,00003 (0,000008)

Especie	Deposición anual por especie utilizando media de concentración de MP10 [T/m ² /año]	Deposición anual por especie utilizando máxima de concentración de MP10 [T/m ² /año]
<i>Nothofagus macrocarpa</i>	0,000008 (0,000002)	0,00006 (0,00001)
<i>Koelreuteria paniculata</i>	0,000008	0,00002
<i>Kageneckia oblonga</i>	0,000007 (0,000008)	0,00003 (0,00004)
<i>Elaeagnus angustifolia</i>	0,000006	0,00002
<i>Morus alba</i>	0,000006	0,00002
<i>Porlieria chilensis</i>	0,000005	0,00002
<i>Schinus latifolius</i>	0,000003	0,00001
<i>Brachychiton populneus</i>	0,000002	0,000009
Total		

Fuente: elaboración propia.

7.3.4.3 Deposición por hectárea

A continuación, se entregan los resultados del cálculo de deposición de MP10 llevados a hectárea, es decir considerando que toda la hectárea estaría cubierta por árboles correspondiente al tamaño medio por zona. El detalle en la distribución de las zonas se encuentra en la Figura 18. En el Anexo 6 se muestra las conversiones realizadas para llegar a estos valores.

Se observa en la Tabla 27 que, la mayor deposición de MP10 por hectárea ocurre en el sector de Costa, zona peri-urbana que posee los mayores valores de IAF, las copas más completas y bajo nivel de daño.

Tabla 27. Promedio y desviación estándar (en paréntesis) para la deposición por zona utilizando concentración de MP10 media y máxima para árboles en condiciones de copa actual.

Zona	n	Deposición anual por árbol utilizando la media de concentración de MP10 [T/año/ha]	Deposición anual por árbol utilizando la máxima de concentración de MP10 [T/año/ha]
Costa	96	0,37 (0,32)	1,57 (1,35)
Sur	103	0,32 (0,31)	1,36 (1,31)
Andes	310	0,28 (0,33)	1,04 (1,19)
Urbano	320	0,33 (0,41)	1,31 (1,56)

Zona	n	Deposición anual por árbol utilizando la media de concentración de MP10 [T/año/ha]	Deposición anual por árbol utilizando la máxima de concentración de MP10 [T/año/ha]
Noroeste	112	0,19 (0,25)	1,09 (1,55)
Total	941		

Fuente: elaboración propia.

Se realizó el mismo cálculo anterior, pero asumiendo que los árboles se encuentran en pleno potencial de copa, observándose que los valores de depositación aumentan considerablemente (Tabla 28).

Tabla 28. Promedio y desviación estándar (en paréntesis) para la depositación por zona utilizando concentración de MP10 media y máxima para árboles en condiciones de copa completa.

Zona	n	Deposición anual por árbol utilizando la media de concentración de MP10 [T/año/ha]	Deposición anual por árbol utilizando la máxima de concentración de MP10 [T/año/ha]
Costa	96	0,48 (0,38)	2,05 (1,64)
Sur	103	0,42 (0,35)	1,84 (1,54)
Andes	310	0,35 (0,36)	1,28 (1,29)
Urbano	320	0,41 (0,48)	1,56 (1,74)
Noroeste	112	0,28 (0,34)	1,62 (2,09)
Total	941		

Fuente: elaboración propia.

7.3.4.4 Mapas de depositación de MP10

Para la construcción de los mapas en primer lugar, se delimitó las áreas de influencia de cada parcela, por medio de un Diagrama de Voronoi para el área peri-urbana y urbana (Figura 69 y Figura 70, respectivamente), observándose que en sectores de mayor densidad de puntos, mayor cercanía de las parcelas, las regiones son más pequeñas. Como se mencionó en el capítulo Mapas de distribución de depositación de MP10, cada región de Voronoi contiene uno de los puntos del conjunto, es decir, una parcela de muestreo (34 puntos para área urbana y 43 para área peri-urbana), y a cada región del diagrama se le asociaron los valores del cálculo de depositación de MP10.

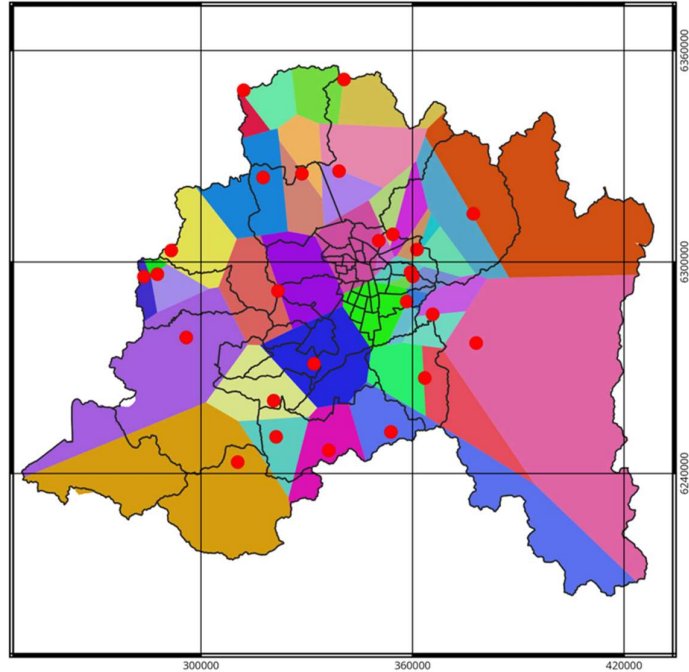
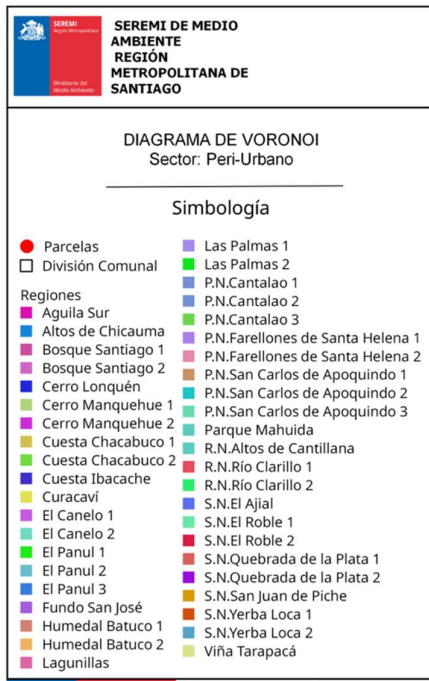


Figura 69. Regiones definidas según Diagrama de Voronoi a partir de las parcelas peri-urbanas de la RMS. Fuente: Elaboración propia.

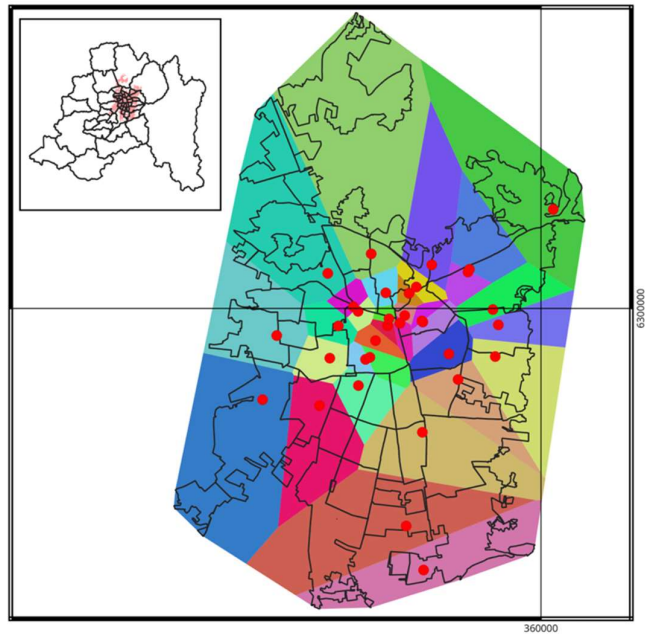


Figura 70. Regiones definidas según Diagrama de Voronoi a partir de las parcelas urbanas de la RMS. Fuente: Elaboración propia.

En base a lo anterior, se ilustró en mapas los valores de depositación anual [T/ha] tanto bajo parámetros de copa completa, como de copa actual para el área peri-urbana considerando valores máximos de concentración de MP10.

Se constata que aquellos sectores de la Región con mayor potencial de depositación de MP10, tanto bajo criterios de copa actual como de copa completa, corresponden a aquellos ubicados en la zona Sur, principalmente en los sectores cercanos a Águila Sur y el Santuario de la Naturaleza San Juan de Piche. También se observan altos valores de depositación de MP10 en sectores localizados en la zona Andes, referidos a los sectores aledaños al Santuario de la Naturaleza El Ajial y El Canelo. Cabe mencionar que el sector cercano al Santuario de la Naturaleza Quebrada de la Plata, también presenta altos valores de depositación (Figura 71 y Figura 72). Se debe recordar que, como fue descrito en la sección de metodología, el mapa de depositación de MP10 en el área peri-urbana se construyó en base a las localizaciones del bosque denso definidos en el Catastro de Bosque Nativo (CONAF y CIREN, 2013).

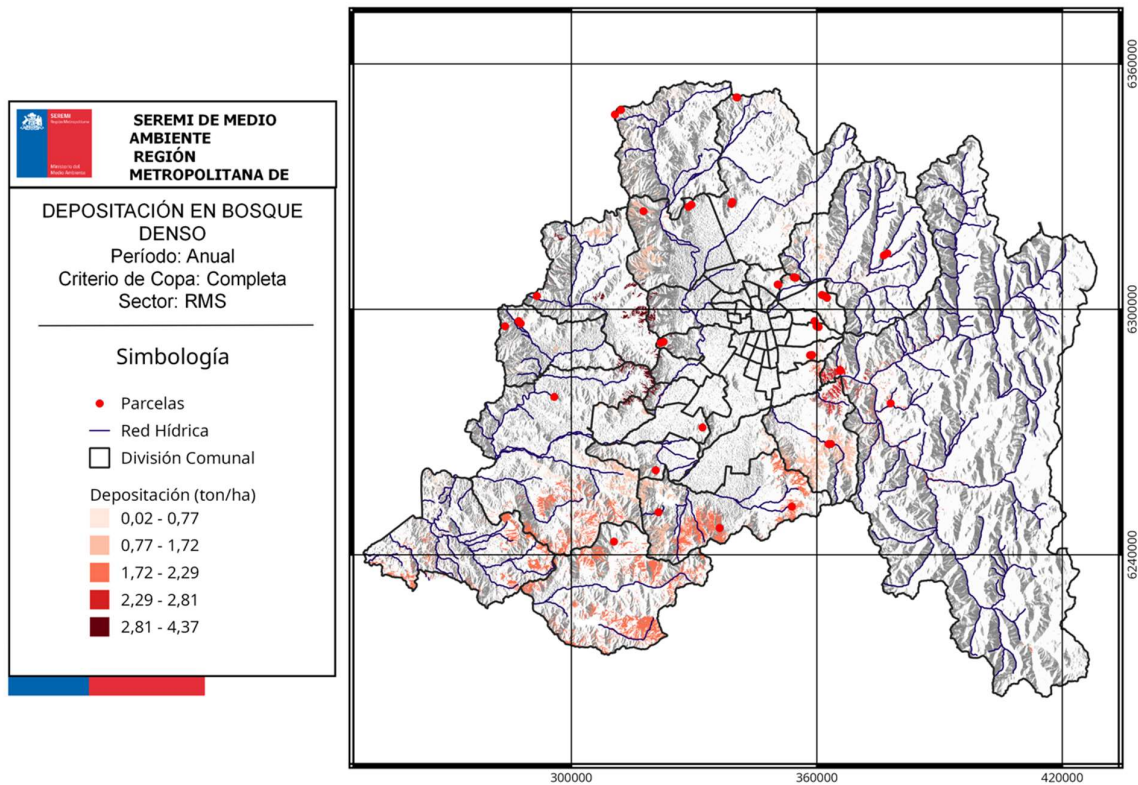


Figura 71. Mapa de depositación anual para la RMS de coberturas de bosque denso, bajo criterios de copa completa y concentraciones máximas de MP10. Fuente: Elaboración propia.

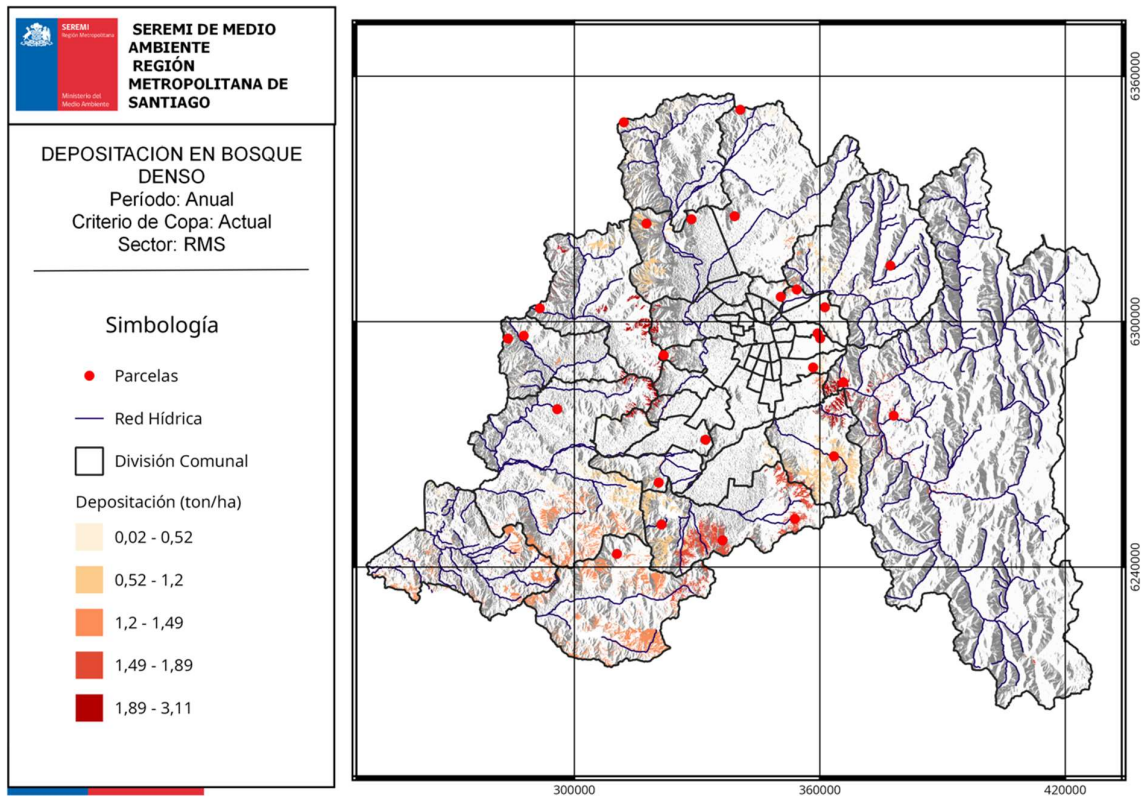


Figura 72. Mapa de depositación anual para la RMS de coberturas de bosque denso, bajo criterios de copa actual y concentraciones máximas de MP10. Fuente: Elaboración propia.

En lo referente al área urbana, los parches de áreas verdes densos de mayor tamaño, se concentran en la zona central del área metropolitana, destacando la vegetación del Parque Quinta Normal como aquella con la mayor depositación bajo criterios de copa completa y actual, también se observa que el Parque O'Higgins presenta altos valores de depositación junto con el Parque Inés de Suárez. El área verde urbana con extensión mayor, aunque menor depositación, corresponde al Parque Metropolitano, ubicado en el Cerro San Cristóbal.

Las cuatro figuras siguientes muestran los valores de depositación para las áreas verdes de cobertura densa tanto para parámetros de copa completa como copa actual. Se muestra el área urbana seccionada para visibilizar mejor las áreas verdes de coberturas densas.

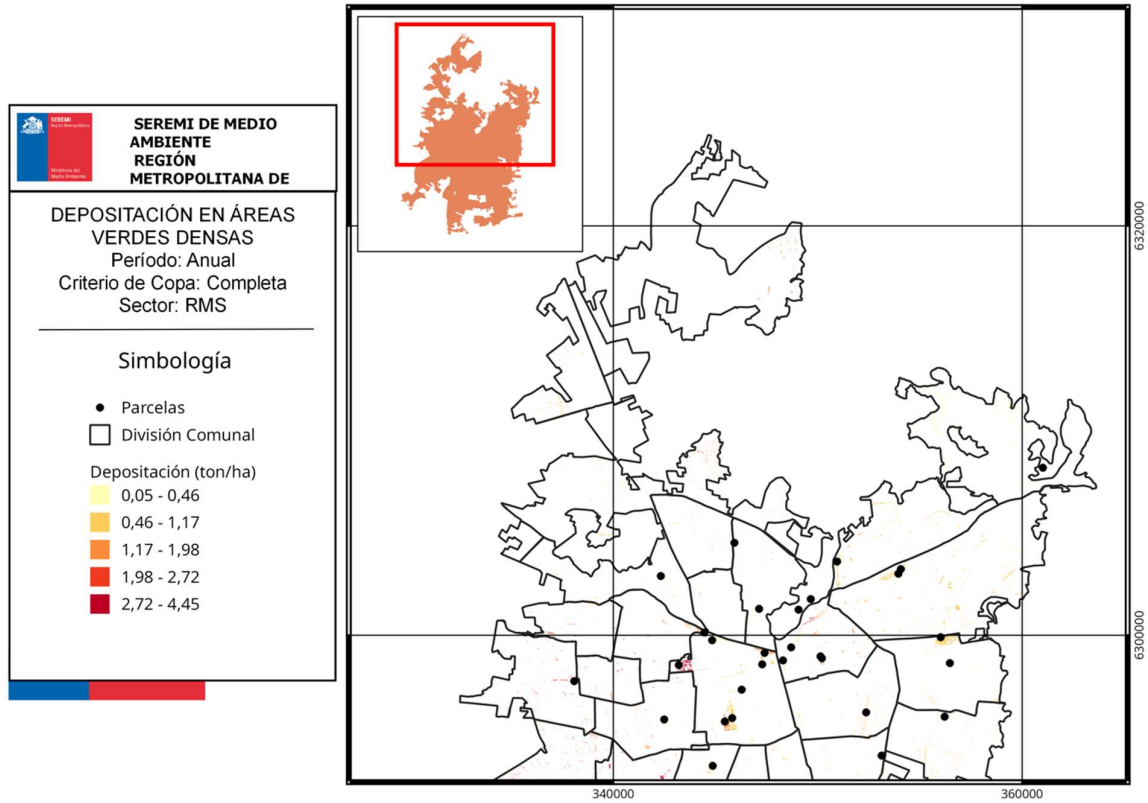


Figura 73. Mapa de deposición anual para el sector norte del área urbana de la Región de las áreas verdes densas, bajo criterios de copa completa y concentraciones máximas de MP10. Fuente: Elaboración propia.

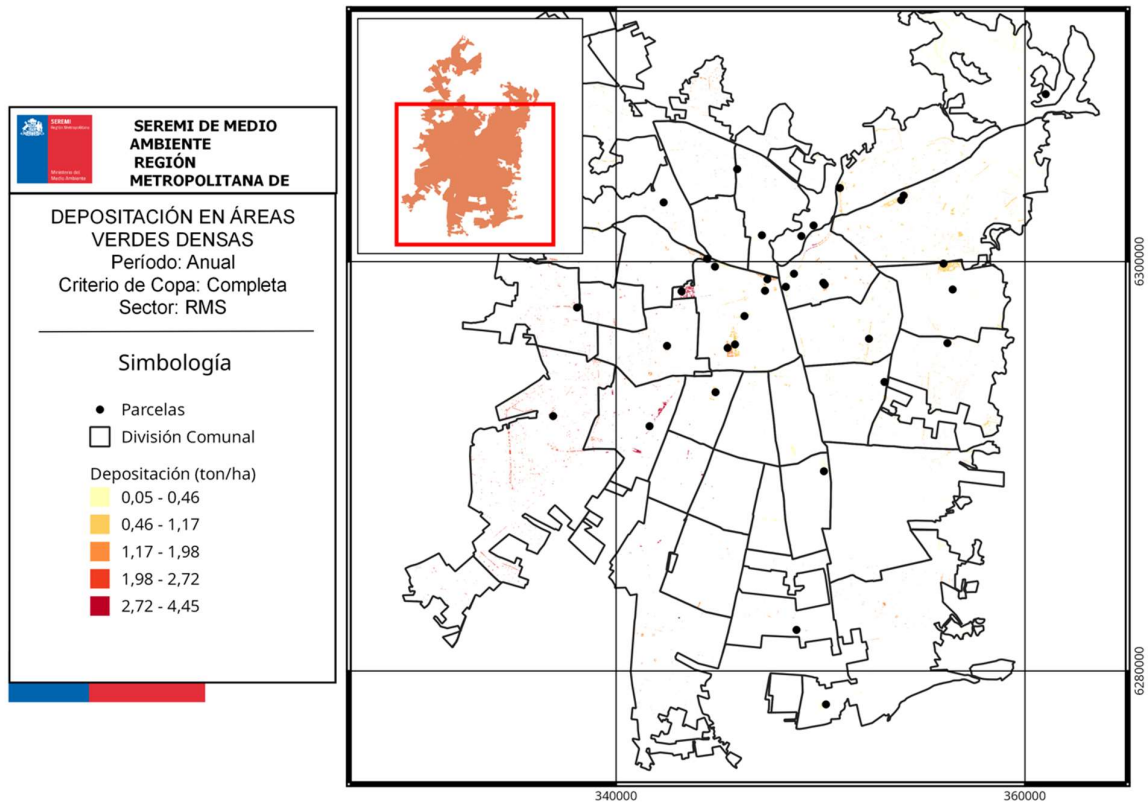


Figura 74. Mapa de deposición anual para el sector sur del área urbana de la Región de las áreas verdes densas, bajo criterios de copa completa y concentraciones máximas de MP10. Fuente: Elaboración propia.

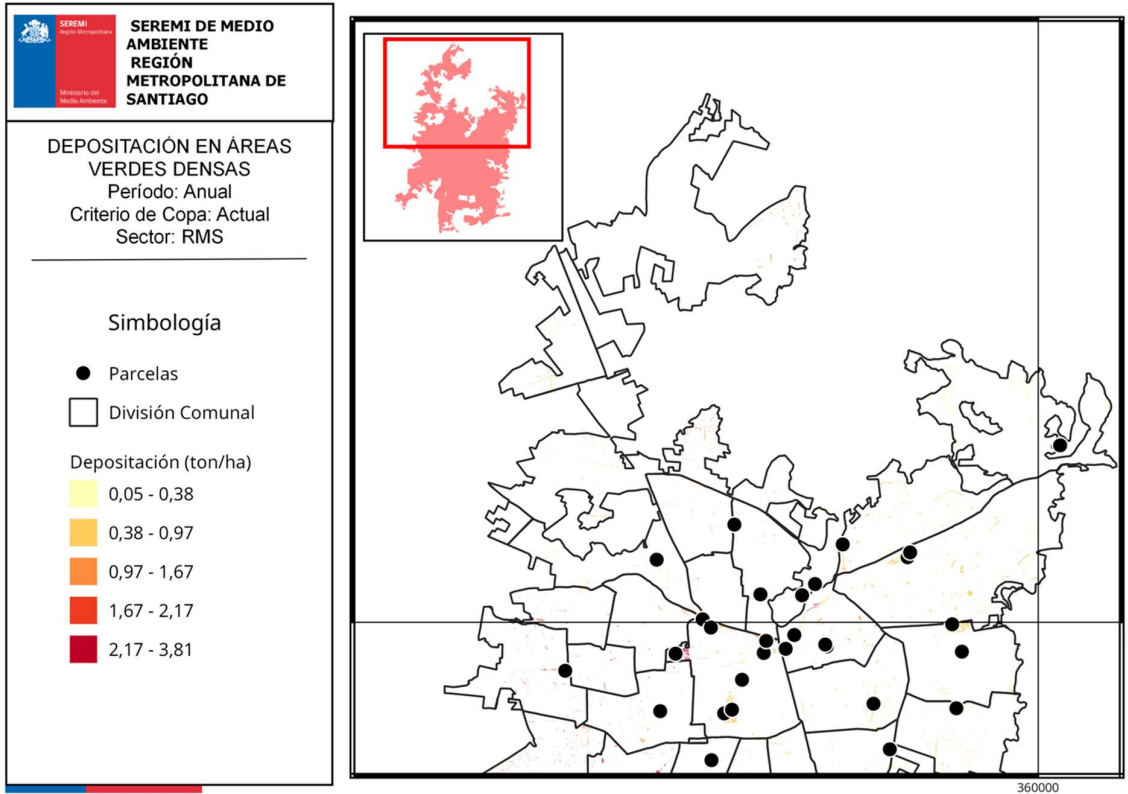


Figura 75. Mapa de deposición anual para el sector norte del área urbana de la Región de las áreas verdes densas, bajo criterios de copa actual y concentraciones máximas de MP10. Fuente: Elaboración propia.

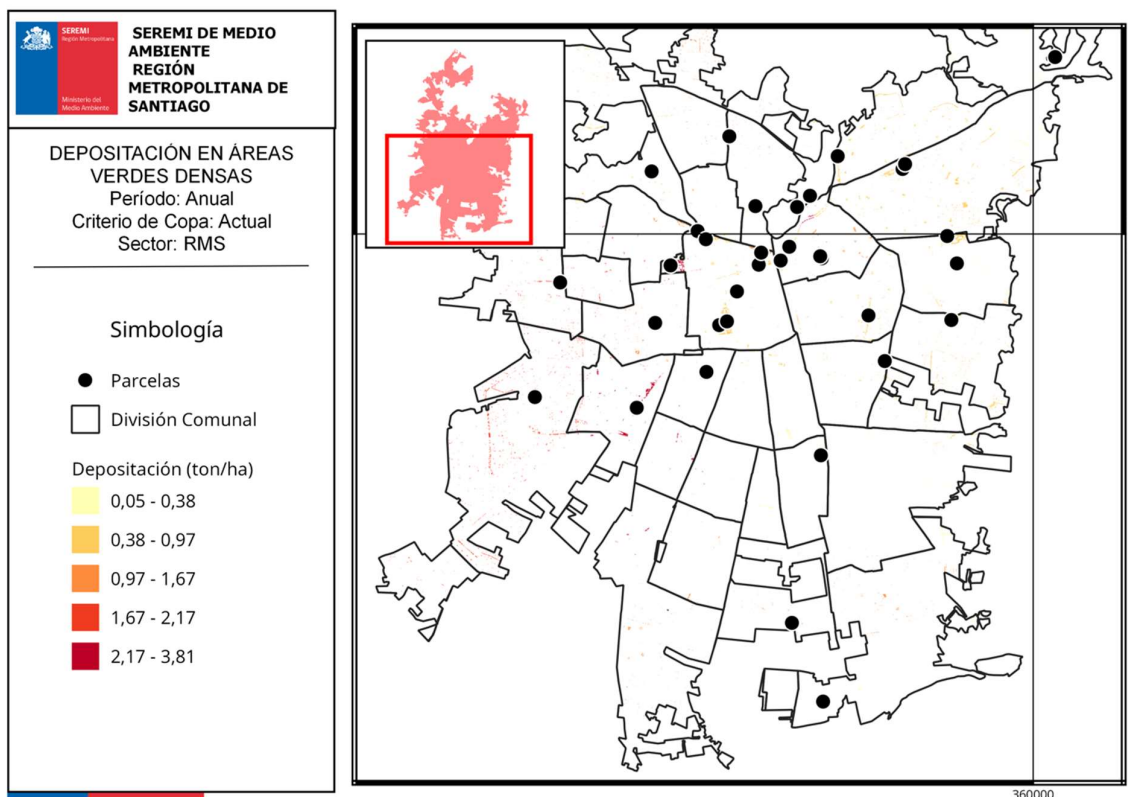


Figura 76. Mapa de depositación anual para el sector sur del área urbana de la Región de las áreas verdes densas, bajo criterios de copa actual y concentraciones máximas de MP10. Fuente: elaboración propia.

7.4 Objetivo d) Proponer un factor de compensación que establezca una superficie y líneas de acción para emisiones de Material Particulado -MP10 por Resuspensión-, con el fin de contribuir a la gestión en la mantención y creación de áreas verdes y masas vegetación en la RMS.

7.4.1 Propuesta de factor de compensación

A continuación, se presenta la propuesta del Factor de Compensación, que queda definido como la cantidad de hectáreas de masas vegetacionales o áreas verdes que se requieren para compensar la emisión de 1 [T] de MP10. Recordar que este valor es calculado en base a datos de terreno correspondientes a bosques densos y áreas verdes con árboles consolidados y alta cobertura arbórea.

Para la construcción de este factor se utilizan las estimaciones de depositación de MP10 en masas vegetacionales o áreas verdes calculadas en el capítulo Resultados de cálculos de depositación de MP10 por la vegetación muestreada utilizando el modelo I-Tree. Se consideran los resultados de depositación de MP10 para la **condición de copa completa** de los árboles, es decir cuando los árboles están creciendo en su máximo potencial y presentan las mejores condiciones. Además, se consideró obtener los valores de factor de compensación en los casos

en que la concentración de MP10 es la máxima y para cuando es la media. Para obtener el valor de superficie a compensar [Ha] al emitir 1 [T], se aplica una regla de tres con los resultados obtenidos en [T/año/ha] de la Tabla 29 y Tabla 30. Los resultados de estos cálculos están detallados de manera autoexplicativa en el Anexo 9 Factor de Compensación.

Se debe recordar que los valores obtenidos de depositación de MP10 son calculados a partir de árboles que fueron medidos en terreno. Para los árboles medidos en el área peri-urbana estos correspondían a individuos ubicados en bosques densos y que tuvieran más de 10 [cm] de DAP, los cuales corresponden a individuos en su mayoría adultos. Para el caso del área urbana, los árboles medidos se encuentran en el sector de mayor densidad muestreada y cobertura del área verde y tienen un DAP mayor a 20 [cm], los cuales también corresponden a árboles adultos en su mayoría. Cabe destacar que para el caso del área urbana los árboles por lo general presentan condiciones de sitio ideales, es decir espacio suficiente para desarrollarse, suelos ricos en nutrientes y disponibilidad de riego durante todo el año.

Se obtuvieron los valores de factor de compensación para cada zona de análisis para las dos situaciones de concentración de MP10 trabajadas en esta consultoría, es decir para valores **máximos y medios de concentración de MP10 anual**. En la Tabla 29 se muestran los resultados de los cálculos.

Tabla 29. Factor de compensación por masas vegetacionales y áreas verdes para compensar 1 [T] de MP10 emitido.

Zona de análisis	Factor de compensación [Ha] en condiciones de concentración máxima de MP10 anual	Factor de compensación [Ha] en condiciones de concentración media de MP10 anual
Andes	1,3	4,8
Costa	0,7	2,8
Noroeste	1,6	9,5
Sur	0,7	3,0
Urbana	1,4	5,4
Promedio peri-urbana	1,1	5,0

Como se observa en la tabla anterior, los valores de Factor de compensación varían entre ambas condiciones de concentración de MP10. De acuerdo a esto se calculó el promedio entre ambos factores por zonas de análisis los cuales se detallan en la Tabla 30. El factor de compensación promedio para la zona peri-urbana de la region es de 3,1 [ha].

Tabla 30. Factor de compensación para compensar 1 [T] de MP10 emitido promediando valores obtenidos en situación de Concentración máxima y media de MP10.

Zona de análisis	Factor de Compensación [Ha]
Andes	3,1
Costa	1,8
Noroeste	5,6
Sur	1,9
Promedio peri-urbana	3,1

La propuesta del factor de compensación para el área urbana se obtuvo al calcular el factor de compensación obtenido al considerar depositaciones de MP10 con concentración máxima MP10, obteniéndose un valor de 1,4 [ha] (Tabla 31). Se propone este factor diferenciado al área peri-urbana, dado por la diferencia en la estructura y composición existente en áreas verdes, la cercanía a fuentes de emisiones y la factibilidad de implementación para la creación de mayor cobertura arbórea dentro de la ciudad.

Tabla 31. Factor de compensación para compensar 1 [T] de MP10 emitido promediando valores obtenidos en situación de Concentración máxima de MP10 en el área urbana.

Zona de análisis	Factor de Compensación [Ha]
Urbana	1,4

Fuente: Elaboración propia.

El valor de 3,1 [Ha] para área peri-urbana es un valor realista en términos de superficie a compensar para Proyectos de Compensación de Emisiones en sectores peri-urbanos. Este factor no se encuentra alejado del factor actual que ha venido trabajando el SERMI MA-RMS en los últimos 5 años, que corresponde a un valor de 2,15 [Ha] a compensar cuando se emite 1 [T] de MP10.

En cuanto a la zona urbana es recomendación de estos consultores, el utilizar un factor a compensar menor, obtenido al utilizar la concentración máxima anual de MP10, factor que da de 1,4 [Ha]. Este valor tiene una mejor posibilidad de implementación dado los tamaños de los terrenos existentes para este fin dentro de la ciudad, lo que podría incentivar la compensación cercana a las fuentes de emisión de MP10.

Según lo anteriormente expuesto, **se propone el factor de compensación de 3,1 [Ha] para área peri-urbana y de 1,4 [Ha] para área urbana.**

7.4.2 Propuesta de líneas de acción para programas de compensación de emisiones

Varios estudios han identificado que la vegetación cumple un rol clave en la sustentabilidad y la calidad de vida en las ciudades, siendo reconocida como un proveedor fundamental de servicios ecosistémicos, especialmente el de regulación de la calidad del aire, cuantificado en

varias publicaciones tanto a nivel mundial (Cavanagh et al., 2009, Janhall, 2015, Manes et al., 2016) como nacional (Escobedo y Nowak, 2009, Préndez et al., 2019).

La ventaja de utilizar vegetación arbórea en la compensación de emisión de contaminantes, es que cumple un rol en la compensación de emisiones de MP10 y además promueve la provisión de otros servicios ecosistémicos que eventualmente afectan de manera positiva el bienestar y la salud de las personas, a la vez en que contribuyen a la mantención de la biodiversidad de la Región.

La mayor diversidad en especies y complejidad en estratos de vegetación promueve mayor eficiencia en la depositación de MP10 al presentar mayor superficie de depositación y distintos tipos de hojas para realizarlo (Vieira et al., 2018). Además, la planificación y manejo de los árboles es de importancia para promover la depositación de MP10, es así como copas densas y sanas depositan más contaminantes y el arbolado establecido en avenidas transitadas depositan más MP10 que árboles que se encuentran más lejos de las fuentes de emisión del contaminante (Grote et al., 2016; Bodnaruk et al., 2017).

En esta sección se describen los resultados de la revisión bibliográfica en que se identifican y describen acciones que se orientan a recuperar, mantener, aumentar y evitar la pérdida de la biomasa foliar de la vegetación presente en la RMS, con el objetivo de incrementar la depositación de MP10 en estas masas vegetacionales.

7.4.3 Áreas prioritarias para proyectos de compensación de emisiones

La identificación de áreas prioritarias para el establecimiento de programas de compensación de emisiones en la ciudad de Santiago y en el área peri-urbana, se presenta como una estrategia eficiente para aplicar dentro del PPDA de la ciudad, favoreciendo localizaciones estratégicas.

Como se observó en la sección Resultados de cálculos de depositación de MP10 por la vegetación muestreada utilizando el modelo I-Tree, los valores de depositación de MP10 están estrechamente relacionados con la distribución de la vegetación dentro y alrededor de las ciudades, siendo más eficientes aquellos árboles que se encuentran más cerca de la fuente emisora, dada la movilidad del contaminante MP10 (Beckett et al., 2000).

Lo anterior va en concordancia con lo descrito por Selmi et al. (2016) y lo cuantificado por Beckett et al. (2012), en que la eficiencia en la purificación del aire por los árboles, depende dentro del modelo I-Tree principalmente de la estructura de éstos y de la concentración de los contaminantes. Esto sugiere que la localización de las masas vegetacionales y áreas verdes es relevante al momento de proponer una acción de compensación, por lo que al ser cercana a las áreas de emisión o en zonas de mayor concentración, mayor será la eficiencia de la vegetación en la depositación de MP10.

7.4.3.1 Áreas prioritarias en zonas urbanas

Para el área urbana, se identifican 6 áreas prioritarias para desarrollar PCE. Cabe destacar que las tres primeras se incluyen en la guía borrador de la SEREMI del MA-RMS (Anexo 13), que ha desarrollado en función de los PCE realizados en los últimos 5 años.

- **Cerros isla:** son amplias superficies insertas dentro de las ciudades y que entregan importantes servicios ecosistémicos tales como recreación, regulación térmica y purificación del aire (Fernandez, 2011). Esto último, debido a que los cerros islas incluyen varios usos como áreas verdes consolidadas, áreas de matorral y bosque que actúan como fuentes de depositación de contaminantes, permitiendo la depositación de MP10 al interior de las ciudades (Araya, 2015).

- **Corredores verdes urbanos y/o ribereños:** los corredores verdes dentro de las ciudades, ya sea asociados a cursos hídricos o como parques lineales, cumplen importantes funciones ecosistémicas (Vasquez, 2016). En el caso particular de corredores en torno a cursos hídricos, sus funciones ecológicas están estrechamente relacionadas al cauce al que están asociados, destacando la protección de las riberas en eventos de inundaciones, provisión de hábitat, purificación del agua, entre otros servicios ecosistémicos (Lerner y Holt, 2012). Los corredores verdes vegetados, ribereños o no, proveen servicios ecosistémicos ligados a la regulación del aire, mitigando la contaminación ambiental, por medio de la depositación de contaminantes (Hewitt et al., 2020).

- **Áreas verdes no consolidadas:** este tipo de áreas verdes son importantes para desarrollar proyectos de PCE, dado que son superficies que, si bien se encuentran destinadas en su uso para áreas verdes, no presentan un proyecto establecido, y a través de la implementación de un PCE se podrá convertir en área verde de la cual se beneficie la ciudadanía.

- **Cercanía a población vulnerable:** se busca orientar la localización de los PCE hacia sectores urbanos con concentración de personas vulnerables, como el caso de residencias de hogares de ancianos, centros de salud, y colegios, para mejorar la calidad del aire, la regulación de temperaturas y la disminución de la contaminación acústica (De Carvalho, 2019).

De igual forma, se ha evidenciado la existencia de una relación entre la inequidad ambiental y la salud, reflejándose en comunidades que presentan bajos status socioeconómico tienden a estar expuestas a una menor calidad del aire (Hajat et al., 2015), por lo que también podrían ser considerados estos barrios de bajos ingresos como población vulnerable.

Se debe evaluar cada Proyecto de Compensación de Emisiones según presencia y localización de este tipo de establecimientos con presencia de población vulnerable y/o inequidades ambientales.

- **Cercanía a fuente de emisiones o lugares con mayor concentración de contaminantes:** se busca dar prioridad a áreas para el establecimiento de PCE a lugares que se encuentren dentro de 5 [km] desde la fuente emisora de MP10, considerando movilidad de este contaminante. Estos lugares al presentar vegetación arbórea actuarían como cortinas verdes (filtros) en primera línea, que reducirían el movimiento de las partículas contaminantes evitando su dispersión por el aire (Janhäll, 2015).

- **Cercanía a sectores de alta aglomeración peatonal:** la vegetación arbórea cercana a lugares con alto tráfico de personas como centros urbanos, paseos peatonales y áreas comerciales, entre otros, mejora la calidad de aire al nivel de respiración de los seres humanos (Bodnaruk et al., 2017, Xing y Brimblecombe, 2019). Cuando hay poca vegetación arbórea establecida en

estos centros urbanos, las personas se ven expuestas a mayores concentraciones de contaminación con posibles consecuencias negativas para el sistema respiratorio.

7.4.3.2 Áreas prioritarias en zonas peri-urbana

En el área peri-urbana, se identificaron 3 áreas prioritarias para los PCE, las cuales son descritas a continuación. Cabe destacar que la primera se encuentra incluida en la guía borrador la SEREMI del MA-RMS (Anexo 13), que ha desarrollado en función de los PCE realizados en los últimos 5 años.

- **Áreas de alto valor ambiental o destinadas a la conservación de masas vegetacionales:** corresponden a áreas que no necesariamente están declaradas por ley como sitios de conservación. Están presentes en lugares periféricos a la ciudad de Santiago y se configuran como áreas de bosque, matorral o humedales. Se identifica que estas áreas poseen alto valor ambiental para la conservación y para proveer el servicio ecosistémico de purificación del aire (Jennings, 2003).

Dentro de las áreas de alto valor ambiental se incluyen las Áreas silvestres protegidas, que corresponden a áreas declaradas como sitios de conservación, tales como Santuarios de la Naturaleza y Parques naturales, con usos de bosques, matorrales o humedales (según Catastro de Bosque Nativo; CONAF y CIREN, 2013); y a las que se ha reconocido su rol esencial al ser proveedoras de una gran variedad de servicios ecosistémicos (Comité Nacional de Restauración Ecológica, 2018). Dado que estas son grandes extensiones de cobertura arbórea continua serían de gran eficiencia para compensar emisiones de MP10.

- **Sitios conectores entre áreas peri-urbana y urbana:** la conectividad del paisaje, permite robustecer la resiliencia de los ecosistemas frente a perturbaciones. Jennings et al. (2003) identificaron este tipo de áreas, que permiten dar conectividad a los ecosistemas, como prioritarias a conservar y además facilitan la existencia de coberturas arbóreas continuas promoviendo una mayor depositación de MP10 en masas vegetacionales. Los ecosistemas interconectados pueden llegar a convertirse en corredores biológicos, aumentando la provisión de servicios ecosistémicos incluido el de purificación y mejora en la calidad del aire, además de la conservación de biodiversidad dentro de la RMS (Zellmer et al., 2019).

- **Continuación de PCE anteriores:** estas áreas corresponden a proyectos de compensación de emisiones que ya cumplieron su período comprometido, con lo que la vegetación establecida no tiene asegurada su mantención y seguimiento. Generar continuidad a largo plazo entre proyectos de reforestación y conservación se configura como un esfuerzo prioritario en el establecimiento, manejo, mantención y conservación de bosques peri-urbanos (FAO, 2016) que permitirán mantener en el tiempo su rol en la depositación de MP10.

7.4.4 Descripción de líneas de acción

El desarrollo de líneas de acción tiene por finalidad identificar grupos de actividades y otras actividades clave para el establecimiento, mantenimiento y aumento de las masas vegetacionales y áreas verdes, que vayan dirigidas a promover el desarrollo de árboles y biomasa foliar en óptimas condiciones sanitarias. Esto tiene por finalidad lograr potenciar su crecimiento, aumentando la producción de biomasa y hojas para la depositación de MP10.

Se debe mencionar que varias de las acciones incorporadas en esta sección ya son trabajadas por la SEREMI del MA-RMS, con lo que la información entregada a continuación viene a validar y complementar su trabajo y aportar otras nuevas ideas para mejorar el desarrollo de los PCE.

En la Tabla 32 y Tabla 33 se presenta un resumen de las líneas de acción propuestas para el área urbana y peri-urbana, se listan las líneas de acción primarias y secundarias asignadas a cada una, que serán descritas en las siguientes secciones. Cabe destacar que cada línea de acción primaria tiene sus propias acciones secundarias, las cuales pueden ser aplicadas en todas las áreas prioritarias definidas en la sección Áreas prioritarias para proyectos de compensación de emisiones tanto para área urbana como peri-urbana.

Tabla 32. Resumen de líneas de acciones primarias y secundarias propuestas que pueden ser aplicadas en las áreas prioritarias de PCE identificadas para el área urbana.

Líneas de acción primarias	Líneas de acción secundarias
Creación	Construcción de áreas verdes
	Preparación del suelo
	Riego asistido
	Fertilización
	Construcción vivero e invernadero
	Cosecha de agua
	Medidas de protección contra incendios forestales
Mantenimiento	Enriquecimiento
	Manejo silvicultural y fitosanitario
	Reemplazo de árboles
	Mantenimiento de accesorios
	Seguimiento
Rehabilitación ambiental	Enriquecimiento
	Manejo fitosanitario y silvicultural
	Seguimiento
Educación ambiental	Instalación de señalética
	Difusión

Fuente: elaboración propia.

Tabla 33. Resumen de líneas de acciones primarias y secundarias propuestas que pueden ser aplicadas en las áreas prioritarias de PCE identificadas para el área peri-urbana.

Líneas de acción primarias	Líneas de acción secundarias
Rehabilitación ambiental	Enriquecimiento
	Preparación de suelo para plantación
	Manejo fitosanitario y silvicultural
	Riego asistido
	Mantenimiento de accesorios
	Fertilización
	Recolección de semilla y viverización
	Construcción de vivero y/o invernadero
	Control de Erosión
	Control de especies invasoras
	Cosecha de agua
	Seguimiento
Protección, Control y Vigilancia	Construcción y/o reparación de cercos perimetrales
	Medidas de protección contra incendios forestales
	Construcción de infraestructura de vigilancia
Educación Ambiental	Instalación de señalética
	Difusión

Fuente: elaboración propia.

7.4.4.1 Líneas de acción primarias

Las líneas de acción primarias se configuran como grupos de actividades que buscan reforzar las condiciones de los programas de compensación y promover el óptimo crecimiento de los árboles maximizando la biomasa foliar donde se deposita el MP10.

En el documento borrador de la Guía de Compensación de MP10 de la SEREMI del MA-RMS estas líneas de acción tienen por nombre ejes de acciones, y contemplan tres grupos que son “Rehabilitación y Restauración Ecológica”, “Protección, Control y Vigilancia” y “Educación Ambiental”, que aplican a todos los PCE. En esta propuesta, se identificaron y agregaron las

líneas de acción de *Creación y Mantenición* para las áreas urbanas. A continuación se describen las líneas de acción listadas en la Tabla 32 y Tabla 33.

- **Creación:** tiene por objetivo la construcción y establecimiento de nuevas áreas verdes dentro de la ciudad, las que al aumentar la masa vegetacional promoverán la depositación del MP10 y a su vez otra serie de servicios ecosistémicos tales como almacenamiento de carbono, recreación, regulación hídrica (Nowak et al., 2006), además de proveer hábitat dentro de ciudades aportando a la conservación de la biodiversidad en las ciudades. Esta acción incluye la actividad de construcción, preparación del suelo para plantación, riego asistido, fertilización, construcción vivero e invernadero, cosecha de agua y medidas de protección contra incendios forestales.

- **Mantenición:** grupo de acciones que tienen por objetivo realizar mejoramiento a las masas vegetacionales ya existentes. Esta línea busca mantener las condiciones adecuadas de las masas vegetacionales, maximizando el desarrollo de su biomasa foliar y tamaño de la copa. Esta acción involucra desde el mejoramiento de la calidad del suelo y del sistema de riego hasta guiar el crecimiento y desarrollo de los árboles. Específicamente, se incluyen las acciones de Enriquecimiento, Manejo silvicultural y fitosanitario, Reemplazo de árboles, Mantenimiento de accesorios y Seguimiento.

- **Rehabilitación ambiental:** corresponde al proceso de recuperación de algunas funciones y algunas especies en relación a un ecosistema original, recuperando biomasa vegetal (Cortina et al., 2006). En contraste a lo anterior, los proyectos de restauración ecológica son planificados en horizontes de tiempo muy largos (sobre 30 años), con variadas etapas dependiendo de la evolución del ecosistema; según esto se propone la Rehabilitación ambiental, proceso con metas logrables en el corto y mediano plazo (5 a 15 años).

La RMS ha sido una región altamente impactada durante los últimos 100 años, con lo que sus funciones ecosistémicas, composición y estructura de especies están alejadas de lo que fue su ecosistema de referencia. Con esto, se propone el eje de rehabilitación ambiental a cambio del de restauración ecológica propuesto por la SEREMI-MA RMS en su guía borrador (Anexo 13), puesto que establece metas más realizables que la restauración, al recuperar sólo algunas funciones ecosistémicas y utilizando algunas especies presentes en el ecosistema original (Comité Nacional de Restauración Ecológica, 2018), siendo flexible al permitir el establecimiento de otras especies que contribuyen a cumplir las funciones ecosistémicas que se busque recuperar. Es así como la rehabilitación ambiental en programas de PCE buscaría recuperar biomasa para promover la depositación de MP10, y a la vez recuperar otras funciones del ecosistema que refuerzan la resiliencia ante posibles perturbaciones, manteniendo en el tiempo su diversidad de especies, estructura de la vegetación y prosperando sus procesos ecológicos.

Se incluyen las acciones de Enriquecimiento y plantación, Manejo fitosanitario y silvicultural, Riego asistido, Recolección de semilla y viverización, Control de Erosión, Control de especies invasoras, Construcción de vivero y/o invernadero, Cosecha de agua y Seguimiento.

- **Protección, control y vigilancia:** se busca generar herramientas para robustecer la protección de los PCE, promoviendo la conservación del área, con el objetivo de lograr el establecimiento exitoso y óptimo desarrollo de la masa vegetacional en el largo plazo asegurando la protección del área en que se establecen los PCE y evitando posibles pérdidas en la biomasa foliar. Se

incluyen las acciones de Construcción y/o reparación de cercos perimetrales, Medidas de protección contra incendios forestales y Construcción de infraestructura de vigilancia.

- **Educación Ambiental:** tiene por objeto generar instancias de educación sobre temas relacionados al incremento en la biomasa foliar de los árboles, al rol de la vegetación en la depositación de MP10, sobre la diversificación de especies vegetales en la estructura de la biomasa foliar para maximizar la depositación de MP10, o bien comunicando en cuanto a cómo ayudar a proteger al bosque o el arbolado urbano ante perturbaciones climáticas o antrópicas, tales como eventos de olas de calor o incendios. Se incluyen las acciones de Instalación de señalética y Difusión.

7.4.4.2 Líneas de acción secundarias

Las líneas de acción secundarias corresponden a actividades y acciones necesarias para el desarrollo de las líneas de acción primarias. A continuación se describen las líneas de acción secundarias listadas en la Tabla 32 y Tabla 33 tanto para área urbana como peri-urbana. Cabe mencionar que todas las acciones mencionadas en el borrador de la Guía de Compensación de la SEREMI del MA-RMS se incluyen en este listado. Además, se agregaron las siguientes: *Construcción de áreas verdes, Preparación del suelo para plantación, Reemplazo de árboles, riego asistido, Mantenimiento de accesorios y Fertilización.*

- **Construcción de áreas verdes,** se incluyen las labores de instalación de infraestructura gris y verde, la cual generará como resultado un aumento de la masa vegetacional en la ciudad. La implementación de estructuras verdes ha sido considerada una solución en la planificación urbana para mejorar la calidad del aire al aumentar la masa vegetacional (Abhijith et al., 2017).

La selección de especies será fundamental para el éxito del proyecto y además para promover la depositación de MP10 (Langenheim, 2020). Se debe considerar el espacio físico que requieren los árboles para su desarrollo, tales como la profundidad de suelo, el espacio disponible en altura y requerimientos hídricos, entre otros. Por el otro lado, se debiera promover el uso de especies con alto potencial de depositación de MP10 (Sección Depositación por especie) para favorecer la purificación del aire.

Dentro de esta línea se contemplan sub-actividades relacionadas al correcto establecimiento de los árboles, con lo que una guía técnica dirigida a asegurar la calidad del establecimiento de los árboles permitirá aumentar las probabilidades de éxito de la acción. Dentro de esta guía se incluye el mejoramiento de la calidad del suelo, a través del desarrollo de actividades de descompactación, incorporación de materia orgánica, mejoramiento de las condiciones de drenaje, mejoramiento de la estructura del suelo y aporte de nutrientes al suelo. Otro tipo de consideraciones podrían dirigirse a establecer protecciones para evitar daños en el tronco de los árboles y el uso de tutores para guiar el crecimiento de los árboles. Se contempla también abordar el uso de agua incluyendo la construcción de tasas de riego e instalación de sistemas de riego.

En lo que respecta a la composición y estructura de las especies plantadas, se debe poner atención en la planificación de las distancias de plantación según disponibilidad de riego, la utilización de plantación en cluster (núcleos) para promover la facilitación entre individuos (Maestre et al., 2003), la selección de las especies dominantes correctas dependiendo de la ubicación del proyecto, en relación a las condiciones climáticas del lugar de emplazamiento de

los árboles y la posible inclusión de especies en categorías de conservación para promover a la conservación de la biodiversidad.

En la selección de especies, se debe considerar la utilización de especies que potencien la depositación de MP10 y otras consideraciones como el espacio necesario para el correcto desarrollo de la copa, la tolerancia a la insolación, la disponibilidad de espacio para el crecimiento de raíces, entre otras. Estas se encuentran detalladas en Arbor Day Foundation (2020)¹⁷.

De especial importancia para la Región Metropolitana de Santiago, dada las bajas precipitaciones y los aumentos en la frecuencia y extensión de olas de calor en los últimos años, es la utilización de especies con bajos requerimientos hídricos lo que promueve las probabilidades de éxito en el establecimiento a largo plazo, correcto crecimiento y por ende su capacidad de depositación de MP10 en el tiempo.

-Preparación del suelo para plantación, se incluye el mejoramiento de la calidad del suelo al realizar actividades de descompactación, incorporación de materia orgánica, mejoramiento de las condiciones de drenaje, mejoramiento de la estructura del suelo y aporte de nutrientes al suelo (City of Guelph, 2019), todo dirigido a potenciar el correcto crecimiento de los árboles y por ende el desarrollo de sus copas depositando MP10 en el máximo potencial de la especie plantada.

La compactación de los suelos limita la exploración radicular, dificultando el acceso a nutrientes y agua por parte de las plantas, comprometiendo su establecimiento, sobrevivencia y crecimiento, así como desarrollo de biomasa (Soto et al., 2015), impactando en última instancia a su capacidad para depositar MP10. Kozłowski (1999) realizó un análisis de metadata respecto al efecto de la compactación sobre el crecimiento de diversas especies de árboles, dilucidando el efecto de la compactación del suelo respecto a las tasas de crecimiento de diversas especies. Se refleja un efecto negativo generalizado en el desarrollo de diversas especies, presentándose esto en diversos estudios en diferentes países. Por ejemplo, una reducción de un 25% del crecimiento de *Picea abies* en un estudio realizado en Suecia; en el caso de un estudio realizado con *Pinus ponderosa* la reducción de su crecimiento correspondía entre un 6 y 12%; por otra parte un estudio con *Pinus radiata* se observó una disminución de un 32% de la tasa de crecimiento de estos árboles al compararlos con individuos de la misma especie establecidos en sitios no compactados.

Cellier et al. (2014) concluyeron que al adicionar materia orgánica al suelo en proyectos de reforestación y restauración, la sobrevivencia y crecimiento de las plantas aumenta significativamente, teniendo efectos en el aumento de la humedad del suelo incluso en la temporada más seca del año y dejando los nutrientes del suelo más disponibles para las plantas promoviendo a un correcto desarrollo de la biomasa foliar.

¹⁷ <https://www.arborday.org/trees/righttreeandplace/>

- **Enriquecimiento y plantación**, busca guiar acciones que tienen por finalidad aumentar el número de especies (aumentar la riqueza) presentes en el PCE mediante la plantación de nuevos individuos, para diversificar la composición y estructura de la vegetación y hacer más eficiente la depositación de MP10.

Además plantar diversidad de especies arbóreas permite robustecer la vulnerabilidad de los ecosistemas ante perturbaciones, favoreciendo los procesos de facilitación entre especies. La diversidad de formas, tamaños y texturas de hojas, y variabilidad en la altura de los árboles y formas de copa, permite generar cortinas continuas de follaje sobre el que se produce la depositación de MP10; la heterogeneidad de follajes en cuanto a altura, textura y abundancia permite optimizar la depositación de contaminantes (Hewitt et al., 2020).

Dado que la capacidad de depositación de MP10 por parte de los árboles depende de diversos factores como el tipo de copa, la morfología de las hojas, las densidades de las copas, y la presencia de microestructuras como tricomas (Chen et al., 2017), se vuelve trascendental contar con una superficie vegetal heterogénea, vale decir, compuesta por diversas especies que presenten diversos rangos de altura, densidades de copa, tipos de hojas, y de esta forma maximizar la capacidad de depositación de MP10 en los PCE.

En el área urbana, se debe poner especial énfasis en la selección de las especies a plantar en cuanto a sus necesidades de espacio, velando por identificar la especie adecuada que se adapte a las condiciones de sitio (Ojeda et al., 2014) para evitar posibles conflictos entre árboles y personas o infraestructuras presentes en áreas verdes tales como cableado eléctrico y cañerías subterráneas.

Se debe asegurar riego a los árboles plantados al menos durante los primeros 3 años en las estaciones más secas del año para la RMS, esto es entre los meses de noviembre y abril (Becerra et al., 2018) para asegurar un correcto establecimiento de los árboles plantados para enriquecimiento.

- **Manejo fitosanitario y silvicultural**, busca mejorar las condiciones sanitarias de los árboles dentro del sitio del PCE promoviendo a potenciar el crecimiento de la biomasa foliar, ya sea detectando y realizando tratamiento a posibles plagas y enfermedades, como elaborando y ejecutando planes silviculturales para modelar el crecimiento de la masa vegetal que promueva al aumento y dé vigor a los puntos de crecimiento más importantes presentes en la copa de los árboles. Esto va dirigido a promover el crecimiento de árboles sanos, libres de plagas y enfermedades, y evitando la supresión de estos, de tal forma de que maximicen la depositación del MP10.

Dentro de los manejos silviculturales y fitosanitarios destacan acciones de poda de ramas y raleo de individuos con crecimiento deficiente. Estas acciones están sujetas a las particularidades de cada sitio y/o de cada uno de los árboles dentro del área de interés, es por ello que se deben identificar previamente aquellos individuos que puedan presentar daños físicos visibles tales como pudriciones en ramas o enfermedades producidas por plagas, o bien identificar sitios donde los árboles presenten crecimiento deficiente producto de la competencia con otros árboles, o a condiciones de sitio deficientes (suelos compactados, bajos en nutrientes, con mal drenaje, entre varios), con tal de maximizar el crecimiento y reducir las tasas de mortalidad de los árboles.

En lo que respecta al manejo silvicultural, las acciones de raleo tienen por finalidad disminuir la competencia entre los árboles al interior de un bosque o plantación, disminuyendo la densidad de individuos. Espinosa et al. (1994) constataron que la aplicación de raleo de diversas intensidades sobre plantaciones de *Pinus radiata* de 6 años tuvo efectos positivos sobre sus tasas de crecimiento, reflejadas en que el tratamiento control (sin manejo silvicultura, 1550 árboles/hectárea), presentó un crecimiento 35% menor a la tasa de crecimiento del tratamiento de raleo más intenso (400 árboles/hectárea). Esto, ya que al ralear, disminuir la densidad de individuos, quedan más recursos disponibles para los árboles restantes, en términos de radiación solar, nutrientes y agua.

En lo que respecta a las podas, corresponde a una acción que permite el manejo del crecimiento de los árboles (Martínez, 2013) tanto en términos de forma de la copa como de altura del árbol completo. Se debiera comenzar con podas de formación, guiando al árbol durante los primeros 5 años desde su plantación, direccionando su crecimiento, ya sea corrigiendo bifurcaciones en troncos principales, eliminando ramas con crecimiento suprimido, o bien podando las ramas más bajas para levantar la copa con el fin de que se destinen los recursos de crecimiento en la formación de árboles sanos y resistentes a perturbaciones.

Otro tipo de podas corresponden a las podas sanitarias, con las que se busca eliminar ramas que presenten heridas con mala recuperación, pudriciones de tronco o bien eliminar presencia de parásitos, que generen mermas en el desarrollo de la biomasa foliar.

Prácticas silviculturales como las mencionadas anteriormente son extensamente empleadas en cultivos forestales productivos tradicionales, como son las plantaciones de *Pinus radiata*, aunque también se han aplicado al bosque nativo, teniendo resultados similares. Donoso y Soto (2010) constataron el efecto positivo de manejos silviculturales (podas y raleos) en el manejo de especies de *Nothofagus* en la Región de los Ríos, evidenciando mejoras en la productividad y crecimiento, dado por la reducción en las densidades de los individuos en el área y al levantamiento de las copas de los árboles.

- **Riego asistido**, las medidas de riego asistido durante los primeros años de una plantación, tienen incidencia directa sobre la sobrevivencia y el correcto establecimiento de los árboles en terreno. Un experimento llevado a cabo por Becerra et al. (2013) sobre el efecto del riego en la sobrevivencia de diversas especies del bosque esclerófilo de Chile central, arrojó un efecto positivo evidente del riego en la sobrevivencia de las plántulas, presentando un 23% de mortalidad por parte de las especies que fueron regadas, en contraste con aquellas que no tuvieron aportes de riego en los primeros años luego de la plantación (38% de mortalidad).

Otro estudio de Becerra et al. (2018) presentó al efecto de la sobrevivencia de especies nativas del bosque esclerófilo, concluyendo que el 100% de los individuos de las especies *Colliguaja odorifera*, *Schinus polygamus* y *Quillaja saponaria* sobrevivió luego de la plantación, al haber sido regados durante los 3 primeros años. De esta forma, la presencia de riego tiene incidencia directa sobre la sobrevivencia de las plantas, siendo trascendental durante los primeros 3 años de establecimiento de los árboles en los meses más secos del año para la RMS (noviembre a abril).

Es importante mencionar que no se recomienda que los árboles queden con riego permanente (por más de 5 años desde la plantación), puesto que estarían aclimatándose a condiciones de mayor humedad en el suelo, situación irreal para la RMS; lo anterior radica en que si

eventualmente se elimina el riego, es altamente probable que los individuos no logren adaptarse a la aridez propia de esta Región.

Cabe agregar que en el contexto de sequía y olas de calor, cuando las precipitaciones sean muy deficientes durante los meses de invierno, se debe considerar realizar riegos de emergencia con la finalidad de evitar la pérdida de biomasa foliar, referido a la muerte de follaje verde en especies en que se ha visto no han soportado la sequía de los últimos 5 años en la RMS, tales como Quillay, Peumo y Litre (Miranda et al., 2020).

- **Reemplazo de árboles**, Esta acción apunta a la identificación de árboles dañados o moribundos dentro de un sitio, buscándose la eliminación de individuos muertos en pie, o bien en mal estado, por ejemplo que presenten daños de copa superiores al 70%, para ser reemplazados por nuevos árboles.

Posterior a la eliminación del árbol, se debe asegurar que existan las condiciones idóneas para el exitoso establecimiento del nuevo árbol, por ejemplo, que las raíz del árbol anterior esté suficientemente descompuesta, o bien que sea eliminada para evitar que se transforme en obstáculo para el crecimiento y exploración de las raíces del nuevo árbol.

Otro punto importante, es la prospección y estudio del sitio en que se eliminó el árbol, identificando posibles causas de daño que podrían mermar al crecimiento del nuevo individuo, por ejemplo suelos contaminados o inadecuados, presencia de obstáculos que impidan el crecimiento (pedregosidad, escombros en el suelo, etc), falta de riego, fuentes de daño externas como pueden ser el daño de copa por parte de autos y camiones, o el daño de corteza por uso de orilladoras.

Se incluye también el reemplazo de árboles que den origen a conflictos con las personas o infraestructuras, por ejemplo que liberen alérgenos, que tengan espinas, que se desenganchen fácilmente o bien que estén mal ubicados, como en el caso de árboles bajo tendido eléctrico (Hirons y Sjöman, 2019).

También se podrá evaluar la pertinencia del reemplazo de árboles de origen exótico para dar lugar a especies nativas, con bajos requerimientos hídricos y altos valores de depositación de MP10 (Tabla 25 y Tabla 26).

- **Instalación y mantenimiento de tutorado, protecciones, señalética y tasa de riego**, se busca realizar mantención a estructuras instaladas para promover protección y crecimiento de los árboles, tales como tutores, protecciones contra herbivoría (protectores individuales), contra roces por automóviles, señalética y carteles informativos, tasas y sistema de riego cercanos al árbol.

En esta acción se incluye tanto la implementación (establecimiento) como el retiro de elementos de protección de las cercanías del árbol, puesto que cuando no se retiran, podrían generar mermas en el crecimiento óptimo, por ejemplo cuando las protecciones interfieren con el crecimiento del tronco de los árboles, pudiendo generar heridas, o incrustarse en el tronco, provocando daños y aumentando la propensión al desarrollo de enfermedades (Ojeda et al., 2014), lo que pone en desmedro la producción de biomasa foliar.

En lo que respecta al uso de protectores individuales contra herbivoría, un experimento desarrollado por González et al. (2017) con plántulas de *Prosopis chilensis* evidenció que el uso

de protectores tiene un efecto directo en la sobrevivencia y desarrollo de las plantas, sin embargo estas presentaban daño por herbívoros en la porción de la copa que se encontraba sobre el protector, por tanto se debe considerar utilizar tubos protectores más altos, o bien excluir definitivamente a las especies de animales de ganado. Adicionalmente se menciona en el estudio que protectores elaborados de materiales de degradación rápida, como la malla raschel, pierden su eficacia en el tiempo al deteriorarse con el sol (aproximadamente a los 2 años de establecida), con lo que la mantención de estos debe realizarse con mayor frecuencia, o bien promover el uso de materiales que sean más resistentes (Tetrapack, o bien Polivinilo resistente a radiaciones).

-Fertilización, estas acciones buscan generar aportes de nutrientes al suelo con tal de suplir la carencia de nutrientes en suelos pobres o degradados, y acelerar y promover un óptimo crecimiento de los árboles. Se recomienda realizar fertilización cuando el sistema radical ya está desarrollado(1 año después de la plantación), y no al momento mismo del establecimiento en terreno (Ojeda et al., 2014).

En un estudio llevado a cabo por Donoso et al. (2009) respecto al efecto de el uso de fertilizantes frente al crecimiento y sobrevivencia de *Nothofagus dombeyi*, concluyeron que la relevancia del uso de fertilizantes es significativo para los primeros 3 años de crecimiento de las plántulas, después de este periodo no existen diferencia significativas respecto a la aplicación de fertilizantes y el crecimiento de los árboles. Siguiendo la misma línea, un experimento llevado a cabo con plántulas de *Prosopis chilensis* en Chacabuco por González et al. (2017), arrojó un efecto positivo de la fertilización respecto al crecimiento de las plantas tanto en términos de altura como de diámetro. De esta forma, el uso de fertilización facilitaría el crecimiento de las plántulas en los años iniciales de los programas de compensación de emisiones de MP10.

- Recolección de semilla y viverización, se busca guiar acciones para la cosecha de semillas de especies establecidas dentro de la misma RMS, con la finalidad de asegurar la propagación de árboles que cuenten con una genética adaptada a las condiciones ambientales locales (RMS), es decir, que cuenten con la capacidad de sobrevivir y desarrollarse en los diversos contextos edafoclimáticos de la RMS. Este grupo de acciones van orientadas a la producción de nuevas plantas, y por tanto al aumento de la biomasa foliar para promover la depositación de MP10.

Las acciones de recolección de semillas deben realizarse en áreas de protección oficial con alto valor ambiental. Las acciones de viverización, deben ser idealmente realizadas dentro de la Región, con el fin de que las plantas producidas estén aclimatadas a las condiciones locales, de tal forma de obtener individuos arbóreos aptos para ser plantados en PCE. Se debe considerar que el establecimiento de viveros, debe cumplir con las exigencias del Servicio Agrícola y Ganadero (SAG, 2020).

- Construcción de vivero y/o invernadero, estas acciones van enfocadas a generar guías para la construcción de áreas destinadas a la producción de plantas, acciones que se alinean con generar aumento de biomasa foliar mediante la producción de nuevas plantas. Como se mencionó en la descripción de las acciones de *Recolección de Semillas y Viverización*, es muy importante la reproducción de nuevas plantas que estén adaptadas a condiciones locales, y provengan de semillas recolectadas dentro de la misma RMS.

Por otra parte, la creación de un vivero al interior de un área urbana como parte de un programa de compensación, podrían poner a disposición de municipalidades la infraestructura necesaria para la producción de árboles que pueden ser usados en diversos proyectos de mejora de áreas verdes. Un ejemplo de ello se presenta en la Municipalidad de La Reina¹⁸.

- **Control de Erosión**, estas medidas van en la línea de mejorar las condiciones y calidad del suelo presente en el área en que se va a establecer un PCE, asegurando condiciones de suelo adecuadas que incrementan el éxito en el establecimiento de los árboles, y el posterior crecimiento de la plantación. Algunos de los efectos que se busca al generar acciones de control de erosión del suelo, es evitar que mediante la escorrentía superficial de las lluvias se pierda el suelo superficial a través del arrastre de sedimentos, lo que da origen a cárcavas. Considerando lo anterior, existen algunas técnicas, como el establecimiento de canaletas que permiten evitar la generación de cárcavas y la pérdida de las capas orgánicas presentes en el suelo. La utilización de fajas con ramas u otros tratamientos lineales de control de erosión tienen lugar dentro de estas acciones (Francke et al., 1998).

La protección del suelo contra procesos de erosión puede realizarse con el establecimiento de coberturas herbáceas, o bien el esparcimiento de hojarasca (hojas y ramillas provenientes del mismo sitio) o mulch (por ejemplo coberturas de hojas, chips de ramas trituradas y paja) sobre la capa superficial del suelo (Hartanto, 2003). Los suelos protegidos de la erosión, son suelos que permiten el desarrollo de microfauna edáfica, la que permite la formación de capas orgánicas dentro del mismo, capas son fuente de nutrientes naturales para los árboles presentes en el lugar (Francke et al., 1998), además de conservar la estructura del suelo, lo que permite preservar la humedad por más tiempo y disminuir la temperatura del suelo garantizando el correcto desarrollo de raíces.

En términos generales, las especies que son aptas para establecerse en suelos degradados, son aquellas que presentan bajos requerimiento nutricionales y de humedad en el suelo, especies que cubren amplias extensiones de suelo rápidamente, y aquellas que aumentan el contenido de materia orgánica del suelo en un corto periodo de tiempo (Bayen et al, 2016). Respecto al efecto directo que tiene la erosión y la escorrentía sobre la sobrevivencia de plántulas, destaca la mortandad de estas producto de que las raíces más superficiales, quedan expuestas al aire cuando existe arrastre de sedimentos o, por el contrario, al hecho de quedar excesivamente enterradas por el movimiento de los sedimentos (Wang et al., 2012).

Un experimento llevado a cabo en Etiopía, sobre la capacidad de sobrevivencia y desarrollo de 3 especies de arbustos arborescente en contextos de erosión de suelo, planteó el establecimiento de estas 3 especies en diferentes secciones de cárcavas, considerando la parte base y la pendiente de estas, así como el área circundante. Como resultado se observó que la mayor mortalidad de plántulas se detectó en la parte baja de las cárcavas, un área más

18

<https://www.lareina.cl/transparencia/recursos/archivos/SubsidiosyProgramasSociales/ProgramasSociales2012/Vivero.pdf>

vulnerable a ser afectada por el arrastre de sedimentos, así como presentar menos cantidad de nutrientes (Reubens et al., 2009). De esta forma, se vuelve trascendental a la hora de trabajar con sitios altamente degradados, que se apliquen técnicas de control de erosión con tal de asegurar el éxito de los programas de compensación.

- **Control de especies invasoras**, las acciones enfocadas al control de especies invasoras, buscan reducir los impactos que tienen estas especies sobre las especies vegetales de interés que se están cultivando en el PCE. Existe una gran variedad de especies arbóreas invasoras presentes en la RMS, tales como el Aromo (*Acacia dealbata*) y Peumo extranjero (*Crateagus monogyms*), que ocupan el hábitat de especies nativas, desplazándolas e impidiendo su germinación (regeneración natural) y compitiendo por recursos (luz, suelo, humedad, nutrientes, espacio aéreo) afectando directamente al desarrollo, y por tanto generando cambios en la estructura y composición de los bosques, afectando la biodiversidad y los procesos ecológicos sucesionales (Becerra, 2006). Este tipo de especies tienen la particularidad de poseer una capacidad de crecimiento más rápido que las especies nativas, generando competencias y suprimiendo a otras especies. Además, dispersan sus semillas con facilidad colonizando nuevas áreas ya que son resistentes a condiciones adversas. Esta actividad va dirigida a promover la sanidad del ecosistema y así maximizar el potencial de deposición de MP10.

En otro estudio realizado por Becerra (2006), respecto a la presencia de especies invasoras en la cuenca preandina de la zona central de Chile, concluyó que dichas especies tienden a establecerse en contextos de quebrada por sobre condiciones de ladera sur y norte. Lo que implicaría que estas especies presentan una tendencia a ocupar sitios de condiciones ambientales favorables, como son las quebradas, desplazando especies nativas. Cabe destacar que las quebradas suelen ser sitios de alta biodiversidad y de coberturas más densas, por tanto se debe velar por conservarlas y evitar que se abran sitios sin coberturas arbóreas; las plantas exóticas invasoras presentan una mayor facilidad de colonizar espacios abiertos (baja cobertura arbórea).

Dentro de este grupo de acciones, existen estrategias ecológicas de control de herbáceas, el control manual destaca como una alternativa que evita el uso de herbicidas que podrían resultar tóxicos para las especies de interés. El control manual se aplica cuando las plantas invasoras ya han desarrollado biomasa y consiste en la utilización de cualquier medio mecánico manual, con herramientas o con máquinas para arrancar, cortar, aplastar o cubrir malezas para eliminar las malezas. La elección del método específico de control manual a utilizar debe evaluarse caso a caso, muchas veces da buenos resultados aplicar control manual con herramientas simples como azadones, machetes o rozones, cuando las malezas son de pequeños tamaños y cubren áreas manejables; mientras que cuando las malezas cubren densamente el suelo o tienen tamaños más grandes con tejidos vegetales leñosos, se podría utilizar desbrozadoras mecánicas (Donoso et al., 2015).

- **Cosecha de agua**, se busca generar infraestructuras para generar mecanismos de cosecha de agua lluvia (PNUD, 2016), por ejemplo: la implementación de sistema de recolección de agua lluvia mediante surcos en media luna, para terrenos con pendientes moderadas a fuertes; la instalación de contenedores para recolectar el agua caída durante los meses de otoño e invierno, para ser utilizado durante la temporada seca del año; o la construcción de zanjas de infiltración (Locatelli et al., 2020) que desemboquen en contenedores de acumulación (Van Veenhuizen y Prieto-Celi, 2000) con la finalidad de utilizarla para riego posteriormente.

Destaca el uso de estructuras de cosecha de agua de tipo atrapanieblas, las cuales podrían ser particularmente útiles en ambientes costeros debido a la existencia de la vaguada costera. En un experimento desarrollado por Fessehay et al. (2014) en la Región de Coquimbo, se implementaron 100 atrapanieblas los cuales presentaron una productividad muy variada que va entre 0 y 20 [L/m²/día], esto último debido a que la presencia de niebla es estacional y depende de la zona del país. Se debe destacar que la SEREMI-MA RMS ya está trabajando en proyectos de PCE con la implementación de Atrapanieblas, específicamente en la zona de la cordillera de las costa de la RMS, cuando hay influencia de la Baja Costera, influencia que debe ser evaluada específicamente para cada proyecto dependiendo de su localización.

Por otra parte, un experimento realizado en India, en un contexto semiárido, respecto a la sobrevivencia de plántulas de 3 especies de arbustos arborescente, bajo la aplicación de técnicas de retención de humedad, franjas de infiltración y hoyos, observaron que aquellas plantas bajo el tratamiento de medialunas presentaron una sobrevivencia de entre 62% y 10%, contrastando con el tratamiento testigo y la aplicación de hoyos en que la sobrevivencia fue nula (Bayen et al., 2016).

Estas acciones de cosecha de agua tienen especial relevancia al contexto climático de la RMS, considerando el fenómeno de sequía y olas de calor, ya que estas intervenciones del terreno van dirigidas a asegurar el correcto desarrollo de la plantación velando por conservar la humedad del suelo, promoviendo al crecimiento de las raíces y de la parte aérea de los árboles. El estrés hídrico puede disminuir la productividad de los bosques como resultado de una disminución del Índice de Área Foliar (Pereira y Pallardy, 1989), esto, debido a una reducción de la biomasa. Un estudio realizado por Donoso et al. (2011) respecto al efecto del estrés hídrico sobre el crecimiento de especies del bosque esclerófilo, determinó que especies como el Quillay presenta una disminución del 55% de su biomasa en condiciones de estrés hídrico. Esto debido a que en condiciones de sequía algunas especies leñosas pierden sus hojas como estrategia adaptativa (Pereira y Pallardy, 1989), con lo que reducen significativamente sus tasas fotosintéticas y con ello la producción de nuevos tejidos.

- **Construcción y/o reparación de cercos perimetrales**, esta acción tiene por finalidad la delimitación de áreas en que se establecen los PCE para evitar el tránsito de ganado, fauna asilvestrada y personas, cuyos comportamientos podrían mermar la evolución de la vegetación establecida en el PCE y las acciones llevadas a cabo dentro de éste, provocando pérdidas de biomasa foliar. La presencia de cercos perimetrales permite un mayor control sobre el establecimiento de plantaciones nativas, ya sea evitando el deterioro de las plantas, controlando la erosión del suelo debido al tránsito, y disminuyendo la muerte de muchos individuos por ramoneo o herbivoría, incluyendo plantas obtenidas desde regeneración natural.

Un experimento llevado a cabo por Morales et al. (2015) respecto al efecto de la exclusión de herbívoros frente a la sobrevivencia de plántulas de Belloto del Norte de alrededor de 37 [cm] de altura, en la zona central del país, encontraron que la sobrevivencia de las plántulas en un contexto de exclusión y sin exclusión alcanzaba un 20% y 0% respectivamente en un ecosistema de matorral. Resultados similares fueron encontrados respecto a la sobrevivencia de las especies arbustivas Romerillo (*Baccharis linearis*) y Bailahuen (*Haplopappus parvifolius*) respecto al efecto de la exclusión de herbívoros frente a su sobrevivencia (Cuevas et al., 2013) evidenciando la relevancia del control de herbívoros para el establecimiento y sobrevivencia de

proyectos de reforestación o enriquecimiento. Ha sido documentado que la presencia de conejos (*Oryctolagus cuniculus*) en áreas destinadas a conservación y reforestación tiene directa relación con el escaso reclutamiento de especies esclerófilas nativas, dificultando procesos sucesionales (Becerra, 2006).

- **Medidas de protección contra incendios forestales**, los incendios forestales son un problema complejo para las áreas con coberturas de bosques, no solo porque implica una destrucción de los ecosistemas, sino que además afectan a la recuperación de los bosques post-incendio es un proceso lento, siendo difícil la recuperación de las funciones ecosistémicas que el bosque poseía originalmente (Becerra et al., 2018). Dentro de la pérdida de funciones cabe mencionar la protección del suelo, provisión de humedad en microclimas, pérdidas de coberturas vegetales, provisión de hábitat, regulación del ciclo de nutrientes y agua, purificación del aire, regulación térmica, entre otros. Con ello, la deposición de MP10 se ve afectada directamente.

El control de incendios incluye acciones asociadas a la construcción de cortafuegos, el establecimiento de senderos y señalética adecuada para el caso de áreas abiertas al turismo, mantención de caminos y fajas bajo tendidos eléctricos, la elaboración de planes de silvicultura preventiva contra incendios forestales tales como podas, retiro de material combustible y chipeado de ramas (Aravena et al., 2005).

En el caso de Chile Central, si bien el bosque esclerófilo tiene la capacidad de regenerarse después de un evento de incendio forestal, esta recuperación es un proceso que lleva tiempo incluso sin poder llegar a recuperarse completamente, por lo que se vuelve trascendental la aplicación de medidas de prevención. Este grupo de acciones, que buscan evitar la pérdida de la biomasa foliar debido a incendios, son aplicables tanto en áreas peri-urbanas como en áreas urbanas, siendo el caso de los cerros isla inmersos dentro de la ciudad de Santiago, cerros que en los últimos años han sido arrasados por incendios forestales (como es el caso del Cerro San Cristóbal en Febrero del año 2020¹⁹).

- **Construcción de infraestructura de vigilancia**, esta acción va dirigida a la construcción de infraestructura que permita generar puntos de vigilancia respecto a un área con cobertura de bosques y matorrales, tanto en un contexto peri-urbano como urbano (cerros isla). La finalidad de esta infraestructura es la prevención de desastres sobre las masas vegetacionales y áreas verdes, por ejemplo, mediante la detección temprana de incendios forestales (Martínez, 2013). Este grupo de acciones busca evitar la pérdida de biomasa foliar al reducir los impactos negativos que podrían provenir de personas tales como incendios forestales, o daño directo en las plantas, daños por depredación del ganado.

Es adecuada la implementación, construcción y mantención periódica de senderos de emergencia, con tal de contar con la delimitación adecuada para el acceso de vehículos y equipo de control de incendios en caso de generarse focos de incendios dentro de estas áreas. Se

¹⁹ <https://www.latercera.com/nacional/noticia/incendio-cerro-san-cristobal/1014118/>

incluyen casetas, torres y/o miradores de control y vigilancia, y construcción y/o mantención de senderos y/o camino de vigilancia para la facilitación del tránsito de guardaparques y brigadistas. Este tipo de estructuras también permiten la detección de ganado, fauna exótica o de personas dentro del área del PCE y que pudieran ocasionar efectos dañinos sobre la vegetación.

-Instalación de señalética, estas acciones buscan presentar la información necesaria para que las personas que se encuentren dentro de un área del PCE no dañen o deterioren dichos lugares durante su estadía. Buscan educar al público respecto a las reglas y condiciones mínimas para ser aceptado el ingreso de público al interior del PCE, vale decir, prohibiciones, obligaciones y derechos, además de la descripción de senderos disponibles en cuanto a su extensión, duración aproximada, nivel de dificultad, entre otras.

Por otra parte, promover la educación ambiental y conocimiento del patrimonio natural de la región por medio de la presentación de la existencia de ciertas especies de importancia, por ejemplo en categorías de conservación o relevancia endémica. Este grupo de acciones busca evitar la pérdida de biomasa foliar al reducir los impactos negativos de las personas con los árboles.

- Seguimiento, el desarrollo de planes de seguimiento se configura como una de las acciones más importantes desde el momento en que se establecen los árboles dentro del proyecto de conservación. Este grupo de acciones busca asegurar el correcto establecimiento, desarrollo y mantenimiento de la vegetación presente en los PCE en el largo plazo, promoviendo al correcto desarrollo de la biomasa foliar. Cuanto más sostenido en el tiempo sea el seguimiento y mantención de la vegetación, más resiliente se vuelve el proyecto, en términos de asegurar la sobrevivencia y establecimiento de las plantas, aumentando la funcionalidad del ecosistema (creación de hábitat, protección de biodiversidad, generación de nichos para especies más avanzadas en la sucesión ecológica), generando sitios de mejor calidad ecosistémica al ir enriqueciendo con nuevas especies, generando masas vegetacionales más diversas en composición y estructura, y más resilientes a posibles cambios ambientales.

Los planes de seguimiento deben ser específicos para cada proyecto, pues el éxito de la plantación tiene estrecha relación con las condiciones locales (condiciones edafoclimáticas), por tanto no se recomienda estandarizar un plan de seguimiento para varios proyectos. Los planes de seguimiento deben ser elaborados en base a indicadores, igualmente específicos para cada PCE. Dentro de este grupo de acciones se incluye el monitoreo del estado de las plantas, el estado de las estructuras asociadas a la sobrevivencia de las mismas, sean, estructuras ligadas al riego, exclusión de ganado, entre otras. Tiene por objeto corregir falencias o deterioros, y evaluar el estado general del PCE y su evolución en el tiempo, lo que permite tomar decisiones informadas sobre la aplicación de nuevas acciones a través del tiempo.

- Difusión, este grupo de acciones busca generar conciencia a la ciudadanía sobre la importancia de las masas vegetacionales y áreas verdes en el rol de proveer servicios ecosistémicos en específico el de purificación del aire por medio de la depositación de MP10. Estas acciones van orientadas a fomentar el cuidado de los árboles promoviendo la conservación y buen desarrollo de la biomasa foliar. Se promueve a la producción y transferencia de información referente a la importancia de las masas vegetacionales y áreas verdes en términos de conservación de la biodiversidad considerando que el bosque esclerófilo de la RMS cuenta con una alta riqueza de

especies arbóreas, siendo hotspot de biodiversidad a nivel mundial y proveyendo una gran cantidad de servicios ecosistémicos.

De esta forma, cualquier hallazgo derivado del estudio de la depositación de MP10 por la vegetación desde PCE, podría ser difundido hacia la ciudadanía con el objeto de generar flujos de información y de esta manera involucrar a las personas sobre la importancia de conservar masas de vegetación en y cercanas a la ciudad.

Se incluye la elaboración de material gráfico, presentaciones en conversatorios y desarrollo de proyectos que involucren a la ciudadanía (Evans et al., 2018). Este grupo de acciones tienen por objeto educar para evitar pérdidas de árboles por descuidos y malas prácticas de las personas hacia la vegetación y por otro lado entregar información a la ciudadanía sobre cómo se pueden cuidar y mantener los bosques y áreas verdes, promoviendo al desarrollo de la biomasa foliar y por tanto a la purificación del aire.

7.4.5 Propuesta de gestión de líneas de acción

Para la gestión de las líneas de acción, se presenta una propuesta según prioridades de implementación de las líneas de acción, con la finalidad de facilitar la implementación y designar la pertinencia de las acciones según si se aplica en terrenos de áreas urbanas o periurbanas para cumplimiento de Programas de Compensación de Emisiones (PCE). De acuerdo a su gestión, se propone que a cada línea de acción se le asigne una escala de prioridad de acuerdo a la contribución que cada línea de acción aporta al incremento de la biomasa foliar y por tanto a la depositación de MP10, o bien a evitar la pérdida de ésta biomasa foliar. La definición de las categorías de prioridad de implementación se detalla en la Tabla 34.

Tabla 34. Escala de prioridad de implementación para gestión de líneas de acción.

Símbología	Prioridad de Implementación	Descripción
	Alta	Son acciones que se relacionan directamente con incrementar biomasa foliar o evitar la pérdida de biomasa.
	Media	Son acciones dirigidas a mejorar las condiciones de sitio donde se encuentran los árboles con el objetivo de generar el incremento de la biomasa foliar y/o promover la sobrevivencia de las masas vegetacionales.
	Baja	Se refiere a acciones que promueven indirectamente la mejora en las condiciones de desarrollo de los árboles.
	No Aplica	Corresponden a acciones que no son pertinentes o no son aplicables.

Fuente: elaboración propia.

Se debe mencionar que las acciones propuestas y su priorización a implementar, si bien se presentan por zona de análisis, quedan sujetas a modificaciones en acuerdo con el criterio de la SEREMI-MA RMS, dada su experiencia en la aplicación de los PCE en la RMS. La factibilidad en la implementación de cada acción quedará determinada por la realidad de cada proyecto y

las condiciones del terreno que está relacionado directamente por su localización exacta en la Región Metropolitana de Santiago.

En la Tabla 35, se entrega la propuesta de gestión de líneas de acción según prioridad de implementación por cada zona de análisis. Se debe mencionar que en el capítulo (Descripción de líneas de acción) la descripción de las líneas de acción se encuentra el detalle de cómo cada una de estas líneas de acción influyen el desarrollo de biomasa foliar aumentando la capacidad de depositación de MP10 por los árboles.

Tabla 35. Propuesta de gestión de líneas de acción según prioridad de implementación.

Líneas de acción		Zona de análisis				
Primarias	Secundarias	Andes	Costa	Sur	Noroeste	Urbano
Creación	Construcción	Gray	Gray	Gray	Gray	Green
	Preparación del suelo para plantación	Yellow	Yellow	Yellow	Yellow	Green
Rehabilitación ambiental y Mantenimiento	Enriquecimiento y plantación	Green	Green	Green	Green	Green
	Manejo fitosanitario y silvicultural	Green	Green	Green	Green	Yellow
	Riego asistido	Green	Green	Green	Green	Green
	Reemplazo de árboles	Gray	Gray	Gray	Gray	Green
	Mantenimiento de accesorios	Light Green	Light Green	Light Green	Light Green	Yellow
	Fertilización	Yellow	Yellow	Yellow	Yellow	Yellow

Líneas de acción		Zona de análisis				
Primarias	Secundarias	Andes	Costa	Sur	Noroeste	Urbano
	Recolección de semilla y viverización					
	Construcción de vivero y/o invernadero					
	Control de Erosión					
	Control de especies invasoras					
	Cosecha de agua					
	Seguimiento					
Protección, Control y Vigilancia	Construcción y/o reparación de cercos perimetrales					
	Medidas de protección contra incendios forestales					
	Construcción de infraestructura de vigilancia					
Educación Ambiental	Instalación de señalética					
	Difusión					

Fuente: elaboración propia.

En la guía borrador de la SEREMI MA-RMS (Anexo 13), que ha desarrollado en función de los PCE realizados en los últimos 5 años, se propone que en cada PCE se cumpla un número de acciones. Con esto, se propone un esquema en que por cada PCE se deban cumplir un mínimo de acciones según escala de prioridades.

Para el área urbana se propone fortalecer la creación de áreas verdes donde se incluyan al menos 2 acciones de alta prioridad, 2 de prioridad media y 2 de prioridad baja. Para área peri-urbana se propone incluir a lo menos 3 acciones de alta prioridad (dependiendo de las características de la zona, superficie y cantidad de tiempo a compensar), 1 de prioridad media y 1 de prioridad baja (Tabla 36).

Cabe recordar, que se identifican las líneas de acción de alta prioridad como acciones que directamente promueven el aumento de la biomasa foliar y por ende la capacidad de depositación de MP10 en masas vegetacionales y áreas verdes. Con el objeto de equilibrar el factor de compensación entre área urbana y peri-urbana (que presenta mayor factor de compensación) se proponen incluir menos cantidad de acciones mínimas para esta área; mientras que para área urbana (al ser menos hectáreas a compensar) se propone que se incluyan más acciones mínimas a implementar (Tabla 36), y de esa manera distribuir de manera más equitativa la implementación de los PCE.

Tabla 36. Número de acciones mínimas exigidas según prioridad de implementación.

Área	Número de acciones mínimas a implementar en el PCE		
Urbana	2	2	2
Peri-urbana	3	1	1

Fuente: elaboración propia.

7.4.6 Propuesta de publicación en formato digital que pueda ser utilizada como medio de difusión del estudio.

El resultado de la propuesta de publicación en formato digital se entrega en el Anexo. 10.

7.5 Objetivo e) Exposición de los resultados de la consultoría ante la comunidad local interesada y/o técnicos.

La exposición de los resultados de la consultoría ante la comunidad local interesada y/o técnicos será realizada por medio de la plataforma digital Google Teams el día viernes 20 de noviembre a las 10 hrs. La invitación fue gestionada y difundida por la SEREMI-MA RMS a la comunidad interesada. La exposición tuvo una duración aproximada de 45 minutos y un periodo de 15 minutos para preguntas del público asistente. Los contenidos de la presentación se definieron en común acuerdo con el mandante y se basan en la Propuesta de publicación en formato digital con énfasis en metodología y resultados obtenidos en el presente estudio de la Licitación. En el Link <https://web.microsoftstream.com/video/f766f7cf-5597-46c9-8fb5-de815833ddec> se entrega grabación de la presentación. En el Anexo 11 se entrega la

Presentación Power Point que fue utilizada durante la exposición, además de una imagen de la invitación a la exposición.

8 Conclusiones

Las masas vegetacionales y áreas verdes de la Región Metropolitana cumplen un rol muy relevante al ser proveedores de variados servicios ecosistémicos y ser hábitat para la fauna de la región. Fuera de las ciudades estas masas vegetacionales cumplen con variadas funciones y servicios ecosistémicos y son reservorios de biodiversidad, mientras que la vegetación en las áreas verdes de las zonas urbanas se configuran como las principales proveedoras de servicios ecosistémicos y son hábitat para la fauna que existe en la ciudad.

El presente estudio, se concentró en el servicio ecosistémico del rol de las masas vegetacionales y áreas verdes sobre la depositación de material particulado MP10, con el objeto de proveer sustento científico sobre el aporte de estas masas vegetacionales y áreas verdes para la compensación de las emisiones de MP10 en la Región Metropolitana como parte de los instrumentos de compensación listados en el marco del Plan de Prevención y Descontaminación Atmosférica de la RMS.

De acuerdo a los resultados encontrados en este estudio, se cumplió con todos los objetivos solicitados en la presente licitación, en que se incluye la caracterización de las masas vegetacionales de la RMS, su monitoreo en cuanto a la depositación de MP10, la construcción de una propuesta de factor de compensación basado en datos de terreno junto con una propuesta de implementación gestinable de las líneas de acción definidas para los programas de compensación de emisiones.

Sobre la caracterización de las masas vegetacionales de la RMS cabe destacar que la Región aún cuenta con una cobertura considerable de bosque denso y semidenso, correspondiente a cerca del 55% de acuerdo al catastro de CONAF y CIREN (2013). Las especies arbóreas dominantes en la Región corresponden a las pertenecientes al bosque esclerófilo siendo estas Quillay, Peumo y Litre y el Espino perteneciente al matorral esclerófilo. La dominancia de especies varía de acuerdo a la localización dentro de la RMS, donde especies de carácter más xerófito dominan hacia el norte de la Región y especies más higrófilas se pueden encontrar hacia el sur de la RMS. Esto es un indicativo del avance de ecosistemas más áridos dentro de la Región.

La vegetación presente en la RMS que fue estudiada en la presente licitación, fueron aquellos bosques definidos con cobertura de tipo densa y semidensa por el catastro de Bosque Nativo (CONAF y CIREN, 2013). De acuerdo a las características de estos bosques, se dividió el análisis en cuatro zonas de la Región según distribución de especies dominantes: Noroeste, Costa, Andes y Sur.

En términos de cobertura arbórea, se observó que las mayores coberturas de copa del estrato arbóreo ocurren hacia el sur de la Región en coincidencia con la dominancia de especies más higrófilas, existiendo mayor complejidad estructural del bosque y valores mayores del Índice de Área Foliar. En cuanto a la condición de daño de los bosques medidos, se encontró gran variabilidad a lo largo de la Región, siendo los bosques de área Noroeste los que presentan

mayores niveles daños en sus copas, seguidos por los bosques en la zona Andes. Para la conservación de estos bosques, se hace necesario la implementación de acciones de rehabilitación ambiental y mejoramiento sanitario de los árboles para el mejoramiento en sus condiciones de copa, promover un incremento en su funcionalidad y así apoyar la conservación de todos los componentes del ecosistema, incluyendo el aumento en la biomasa foliar para favorecer la depositación de MP10. Dentro de la Región se encontraron individuos de gran tamaño y bosques en buen estado, lo que destaca la importancia de incentivar programas de conservación para la RMS tales como son los santuarios de la naturaleza y áreas protegidas públicas.

En cuanto a la caracterización de la vegetación urbana se observó que gran parte de la vegetación se encuentra en plazas, parques y cerros islas. Cabe recordar que las mediciones en áreas verdes se focalizaron a sectores con cobertura de vegetación arbórea densa y semi-densa según lo encontrado en terreno. Gran parte de la vegetación de estas áreas es de origen geográfico exótico, sin embargo, en zonas de mayor cobertura arbórea domina la especie nativa Quillay, seguido en segundo lugar ocupado por Cedro del Líbano, Alcornoque y el Pimiento. Se encontró que los árboles en el área urbana presentan mayores tamaños pero coberturas arbóreas menores que en zonas peri-urbanas.

A continuación se abordara lo concluido en cuanto al **monitoreo de la depositación de MP10 en masas vegetacionales y áreas verdes**, referido tanto a la metodología de estimación como a los resultados obtenidos.

Se revisaron tres métodos para cuantificar la depositación de MP10 en áreas verdes y masas vegetacionales. El primer método consiste en la medición del material particulado depositado sobre las hojas de árboles, método que presenta la mayor exactitud en los resultados dado que permite medir la cantidad de MP10. Sin embargo, este método es de aplicación local dado que requiere de instrumentos especializados y algún grado de expertíz del profesional que realice la medición. Además, requiere de realizar un muestreo extensivo en la Región para la inclusión de distintas especies y localizaciones con el objeto de lograr generalizar los datos obtenidos. De lo anterior se entiende que su aplicación es costosa, requiere de mayor cantidad de tiempo y es menos probable de repetir en el largo plazo.

El segundo método corresponde a la utilización de modelos matemáticos para estimar la depositación de MP10, dentro de este grupo de métodos, se seleccionó el modelo I-Tree, que presenta la ventaja de ser ampliamente utilizado tanto en investigaciones científicas como en reportes gubernamentales. Este método permite realizar repeticiones en el tiempo, no es complejo de aplicar por lo que es transferible a profesionales fuera de este grupo consultor, y los datos de entrada que requiere para actualizar la información podrían sólo referirse al estado sanitario de la vegetación, tamaño de las copas de los árboles y concentración de MP10 medido en estaciones de la red MACAM. El modelo I-Tree presenta un grado medio de exactitud dado que no mide en sí el material particulado depositado en las hojas, pero lo estima a través de ecuaciones ampliamente probadas.

El tercer método es el menos preciso, dado que trabaja a escalas que por lo general no son capaces de sólo capturar la copa de árboles, a menos que se trate de imágenes satelitales de resolución submétrica; además requiere de la adecuación de los modelos de cuantificación de depositación de MP10 a la realidad de la Región.

De acuerdo con los **resultados presentados en cuanto a la estimación de depositación de MP10 en masas vegetacionales y áreas verdes**, se concluye lo siguiente:

Sobre la variabilidad territorial de la depositación en masas vegetacionales y áreas verdes:

Del análisis de depositación de MP10 realizado, se observó que existe variabilidad territorial en la Región, lo que indica que lo más adecuado para aplicar en Programas de Compensación de Emisiones sería la utilización de un factor de compensación de acuerdo con la localización específica de cada PCE.

Los valores menores de depositación de MP10 ocurren hacia sectores donde la vegetación tiene copas menos densas o en mal estado sanitario en el área peri-urbana, lo anterior se observó en la zona noroeste de la Región y en la pre-cordillera andina, donde la vegetación se encuentra más perturbada ya sea por efectos antrópicos o bien climáticos (mega sequía y olas de calor, produciendo intensos daños de Browning en el follaje de los árboles). En áreas urbanas se produce menor depositación de MP10 cuando se trata de especies caducas o que presentan mal estado sanitario en sus copas. Es por esto que, uno de los factores importantes a considerar al evaluar la vegetación para depositación de MP10 es que los árboles se encuentren desarrollándose en buenas condiciones de sitio que le permitan realizar este proceso en su máximo potencial.

Sobre la magnitud de la estimación de compensación: se considera para el cálculo de depositación de MP10 el utilizar las concentraciones máximas de MP10 para ambientes peri-urbanos, y más aún para ambientes urbanos, dado que indicaría el rol fundamental de los árboles al depositar MP10 considerando las peores condiciones del aire.

De la condición sanitaria de los árboles: se considera que se utilicen los cálculos con copa completa, dado que los PCE son proyectos en los cuales se espera que en el largo plazo se mantengan activos promoviendo buenas condiciones de sitio reflejado en el desarrollo de árboles sanos con buenas condiciones de copa, permitiendo que la depositación de MP10 sea cercana al máximo potencial de los árboles que incluyan.

Similar a estudios de otras ciudades del mundo se obtuvo que los mayores valores de depositación de MP10 dentro de la ciudad ocurren en especies de tipo coníferas ya sea caducas y siempreverde (Silli et al., 2015, Marando et al., 2016, Selmi et al., 2016, Botallico et al., 2016 y Fusaro et al., 2017).

Los resultados de la depositación MP10 permiten generar evidencias para la selección de especies que más depositan MP10 en sus hojas. Con esto, se podrán dirigir los esfuerzos de los programas de compensación hacia la conservación o al incremento de masas vegetacionales y áreas verdes con las especies más eficientes para conseguir este objetivo.

Para la implementación de los PCE se generó una **propuesta de líneas de acción**, la cual contiene actividades orientadas al incremento de la biomasa foliar que están dirigidas a aumentar la superficie de depositación para MP10. Cabe destacar que las acciones mencionadas cumplirán roles más allá de sólo la depositación de MP10 ya que potenciarán otros servicios ecosistémicos que pueden ser provistos por las masas vegetacionales y las áreas verdes.

De acuerdo a lo anterior, se destaca que lo revisado en la literatura y lo derivado de la experiencia de los consultores que emiten este informe, lo que ha venido realizando la SEREMI MA- RMS en los últimos 5 años va en línea con los resultados de este estudio. Mediante revisión bibliográfica, se identificaron nuevas líneas de acción, las cuales se definen y sustentan con literatura que permite robustecer la pertinencia de estas dentro de los PCE.

Algunas de las acciones adicionales a lo ya establecido en la Guía Borrador de la SEREMI MA- RM (Anexo 13) se incluyen la determinación de áreas prioritarias para el establecimiento de PCE en áreas urbanas que se encuentren cercanas a población vulnerable, a la fuente de emisión de MP10 y a lugares con mayores concentraciones de contaminantes, y a áreas urbanas cercanas a sectores de alta aglomeración peatonal. En el área peri-urbana se propone la identificación de áreas prioritarias correspondientes a los sitios conectores entre áreas urbanas y peri-urbanas y a acciones que signifiquen la continuación en el tiempo de PCE anteriores.

El objetivo de desarrollar una propuesta en la gestión de las líneas de acción busca en primera instancia el aumento de la biomasa foliar y evitar la pérdida de ésta, por otro lado, robustecer la salud de la vegetación arbórea con el propósito de maximizar la depositación de MP10. Un segundo propósito de las líneas de acción, es el generar conciencia en la ciudadanía sobre el importante rol de los árboles en la depositación de MP10 de manera de educar, promover a la conservación e incentivar el cuidado del arbolado urbano y masas de vegetación en cercanas a las ciudades, dirigido a optimizar la depositación de MP10 mejorando la calidad del aire en la ciudad, aportando a la biodiversidad y la mejora en la calidad de vida de las personas.

Se presentó además una **propuesta de prioridades de implementación de cada una de las líneas de acciones**, categorizándolas en acciones de prioridad alta, media, baja y no aplicable. Este esquema tiene por finalidad la facilitación en la gestión de las acciones y a ser una guía para evaluar la pertinencia de estas de acuerdo a la localización de cada PCE, tanto en áreas urbanas y peri-urbanas. Las prioridades fueron asignadas de acuerdo a la contribución de cada acción al incremento de la biomasa foliar, a evitar la pérdida de ésta, a mejorar la calidad de la biomasa foliar o a promover la conservación de la vegetación de la Región. La factibilidad de la implementación de estas categorías queda determinada por la realidad de cada PCE.

Finalmente, **se propuso un factor de compensación** para la emisión de una tonelada de MP10, el cual queda definido en un principio con un valor para el área urbana de 1,4 [ha] y de 3,1 [ha] para el área peri-urbana. De acuerdo a esto se observó que el factor propuesto no se encuentra lejos en magnitud del factor actualmente existente que utiliza la SEREMI-MA RMS. Consideramos un factor diferenciado para el área urbana para promover la creación de áreas verdes dado que existen menos posibilidades de encontrar terrenos de grandes tamaños disponibles para establecer un PCE. Esto además permitiría potenciar la aplicación de los PCE cercanos a los sitios donde la emisión ocurrirá.

El presente estudio refuerza evidencias sobre la importancia del rol de la vegetación en ambientes urbanos y peri-urbanos para el mejoramiento de la calidad del aire de la ciudad. Esto permite destacar la gran relevancia de las áreas de conservación que existen alrededor de la ciudad y dentro de la RMS, destacando su contribución como pulmones verdes al purificar el aire y proveer una serie de otros servicios ecosistémicos tales como la regulación hídrica o climática, o bien al presentarse como espacios de conexión con la naturaleza y conservación de la biodiversidad para las personas. Los resultados de esa consultoría destacan el rol de la

vegetación nativa en la depositación de MP10, siendo las especies nativas, para gran parte de las especies medidas, las más eficientes en la depositación de MP10.

Dentro de las áreas urbanas destaca el aporte que realiza la vegetación de las áreas verdes en la depositación de MP10, especialmente en áreas donde existen mayores concentraciones de MP10 y donde son estas áreas las que aportan la mayoría de los servicios ecosistémicos para la población en las comunas que carecen de vegetación. Por lo que la compensación de emisiones de MP10 en sectores con déficit de áreas verdes, va más allá de la calidad del aire, sino también apuntan hacia el cumplimiento de un rol social al disminuir las inequidades ambientales de la ciudad.

El uso de masas vegetacionales y el mejoramiento e implementación de áreas verdes para la compensación de emisiones de MP10, se muestra como una estrategia que aporta a la descontaminación del aire en la Región Metropolitana. El uso de vegetación para este objetivo tiene además la ventaja de ser una solución multidimensional que aporta no sólo a la descontaminación, sino también entrega otros beneficios como la recreación, la mitigación a los efectos del cambio climático, y la protección contra posibles desastres naturales, entre otros. El incentivar las compensaciones de emisiones de MP10 en masas vegetacionales y áreas verdes también podría entenderse como un aporte a la conservación de la biodiversidad de la Región, generando ciudades más resilientes para el futuro.

9 Anexos

Anexo 1: Material complementario a informe.

Anexo 2: Archivo Excel con datos levantados desde terreno.

Anexo 3: Archivo Excel con velocidades de viento.

Anexo 4: Archivo Excel con concentración de Material Particulado.

Anexo 5. Fichas de caracterización del arbolado en parcelas de muestreo urbanas y peri-urbanas (2 archivos word).

Anexo 6. Archivo Excel con cálculos de depositación de MP10 (4 archivos).

Anexo 7. Carpeta con archivos georreferenciados de parcelas de muestreo realizadas en campaña de verano con respectivo valor de depositación por parcela [T/año], Se incluyen archivos vectoriales y raster para elaboración de mapas.

Anexo 8. Diagramas de flujo (3 archivos .jpg).

Anexo 9. Factor de Compensación (2 archivos).

Anexo 10. Propuesta de publicación de difusión en formato digital.

Anexo 11. Presentación de difusión (archivo PDF de diapositivas y comprobación del evento)

Anexo 12. Fotos de terreno (link para descarga)

Anexo 13. Guía Borrador SEREMI-MA RMS

10 Referencias bibliográficas

- Abhijith, K. V., Kumar, P., Gallagher, J., McNabola, A., Baldauf, R., Pilla, F., Broderick, B., Di Sabatino, S., y Pulvirenti, B. (2017). Air pollution abatement performances of green infrastructure in open road and built-up street canyon environments—A review. *Atmospheric Environment*, 162, 71-86.
- Aboelghar, S. Arafat, A. Saleh, S. Naeem, M. Shirbeny y A. Belal. (2010). Retrieving leaf area index from SPOT4 satellite data. *Egypt. J. Remote Sens. Sp. Sci.*, 13, pp. 121-127.
- Akbar, T. A., Hassan, Q. K., Ishaq, S., Batool, M., Butt, H. J., y Jabbar, H. (2019). Investigative spatial distribution and modelling of existing and future urban land changes and its impact on urbanization and economy. *Remote Sensing*, 11(2), 105.
- Alvarado, A., Baldini A., y Guajardo, F. (2013). Árboles Urbanos de Chile. Programa de arborización: Un chileno, un árbol. Guía de reconocimiento. Bottalico F, Chirici G, Garfi V, Giannetti F, De Marco A, Nocentini S, Paoletti E, Salbitano F, Sanesi G, Serenelli C, Travaglini D. 2016. Air pollution removal by Green infrastructures and urban forests in the City of Florence. 8:243-251.
- Amorim, J.H., Rodrigues, V., Tavares, R., Valente, J., Borrego, C., (2013). CFD modelling of the aerodynamic effect of trees on urban air pollution dispersion. *Sci. Total Environ.* 461–462, 541–551.
- Annesi-Maesano, I. (2017). The air of Europe: where are we going?. *European Respiratory Review.* 26(146), 170024.
- Anyamba, A., y Tucker, C. J. (2005). Analysis of Sahelian vegetation dynamics using NOAA-AVHRR NDVI data from 1981–2003. *Journal of arid environments*, 63(3), 596-614.
- Aravena, J. P., Deramond Heitmann, C., Ortega, M., Ponce, X., y Camarín, R. (2005). Manual con Medidas para la Prevención de Incendios Forestales: Región Metropolitana.
- Araya, C. R. (2015). Cuantificación de servicios ecosistémicos urbanos en cerros isla. Doctoral dissertation, Pontificia Universidad Católica de Chile.
- Baldauf, R. (2017). Roadside vegetation design characteristics that can improve local, near-road air quality. *Transportation Research Part D: Transport and Environment.* 52: 354-361.
- Baldi, G., Noretto, M. D., Aragón, R., Aversa, F., Paruelo, J. M., y Jobbágy, E. G. (2008). Long-term satellite NDVI data sets: evaluating their ability to detect ecosystem functional changes in South America. *Sensors*, 8(9), 5397-5425.
- Ballester, F. (2008). El impacto del calor extremo en la salud: nuevos retos para la epidemiología y la salud pública.
- Bardelli, T., Giovannini, G., Pecchioli, L., (2011). Air quality impact of an urban park over time. *Procedia Environ. Sci.* 4, 10–16.

- Baumgardner D., Varela S., Escobedo F.J., Chacalo A., Ochoa C. (2012). The role of a peri-urban forest on air quality improvement in the Mexico city megalopolis. *Environmental Pollution* 163, 174-183.
- Bayen, P., Lykke, A. M., y Thiombiano, A. (2016). Success of three soil restoration techniques on seedling survival and growth of three plant species in the Sahel of Burkina Faso (West Africa). *Journal of forestry research*, 27(2), 313-320.
- Becerra, P. I., Cruz, G., Ríos, S., y Castelli, G. (2013). Importance of irrigation and plant size in the establishment success of different native species in a degraded ecosystem of central Chile. *Bosque*, 34(1), 103-111.
- Becerra, P. I. (2006). Invasión de árboles alóctonos en una cuenca pre-andina de Chile central. *Gayana. Botánica*, 63(2), 161-174.
- Becerra, P., Smith-Ramírez, C., y Arellano, E. (2018). Evaluación de técnicas pasivas y activas para la recuperación del bosque esclerófilo de Chile central.
- Beckett, K. P., Freer-Smith, P. H., y Taylor, G. (2000). The capture of particulate pollution by trees at five contrasting urban sites. *Arboricultural Journal*, 24(2-3), 209-230.
- Beckett, K. P., Freer-Smith, P. H. y Taylor, G. (1998). Urban woodlands: their role in reducing the effects of particulate pollution. *Environmental pollution*, 99(3), 347-360.
- Beckett, K. P., Freer-Smith, P. H. y Taylor, G. (2000). Particulate pollution capture by urban trees: effect of species and windspeed. *Global change biology*, 6(8), 995-1003.
- Behrens F. (2011). Selecting public street and park trees for urban environments: the role of ecological and biogeographical criteria. PhD Thesis, Lincoln University, New Zealand.
- Beninde, J., Veith, M., y Hochkirch, A. (2015). Biodiversity in cities needs space: a meta-analysis of factors determining intra-urban biodiversity variation. *Ecology letters*. 18(6): 581-592.
- Bodnaruk, E. W., Kroll, C. N., Yang, Y., Hirabayashi, S., Nowak, D. J., y Endreny, T. A. (2017). Where to plant urban trees? A spatially explicit methodology to explore ecosystem service tradeoffs. *Landscape and Urban Planning*, 157, 457-467.
- Bottalico F., Chirici G., Garfi V., Giannetti F., De Marco A., Nocentini S., Paoletti E., Salbitano F., Sanesi G., Serenelli C., y Travaglini D. (2016). Air pollution removal by Green infrastructures and urban forests in the City of Florence. *Agriculture and Agricultural Science Procedia*. 8:243-251
- Bottalico F., Travaglini D., Chirici G., Garfi V., Giannetti F., De Marco A., Fares S., Marchetti M., Nocentini S., Paoletti E., Salbitano F., y Sanesi G. (2017). A spatially-explicit method to assess the dry deposition of air pollution by urban forests in the city of Florence, Italy. *Urban Forestry y Urban Greening*. 27:221-234.
- Bratman G.N., Anderson C.B., Berman M.G., Cochran B., de Vries S., Flanders J., Folke C., Frumkin H., Gross J.J., Hartig T., Kahn Jr. P.H., Kuo M., Lawler J.J., Levin P.S., Lindahls T.,

- Meyer-Lindberg A., Mitchell R., Ouyang Z., Roe J., Scarlett L., Smith J.R., van den Bosch M., Wheeler B.W., White M.P., Zheng H., y Daily G.C. (2019). Nature and mental health: an ecosystem service perspective. *Science Advances*. 5.
- Buccolieri, R., Salim, S.M., Leo, L.S., Di Sabatino, S., Chan, A., Ielpo, P., de Gennaro, G., Gromke, C., (2011). Analysis of local scale tree–atmosphere interaction on pollutant concentration in idealized street canyons and application to a real urban junction. *Atmos. Environ.* 45, 1702–1713.
- Cabaraban M.T., Kroll C.N., Hirabayashi S., Nowak D.J. (2013). Modelling air pollutant removal by dry deposition to urban trees using WRF/CMAQ/i-Tree Eco coupled system. *Environmental Pollution* 176, 123-133.
- Cakmak S., Dales R.E., y Blanco Vidal C. (2007). Air pollution and mortality in Chile: Susceptibility among the elderly. *Environmental Health Perspectives*. 115, 524-527.
- Cavanagh, J. A. E., Zawar-Reza, P., y Wilson, J. G. (2009). Spatial attenuation of ambient particulate matter air pollution within an urbanised native forest patch. *Urban Forestry & Urban Greening*, 8(1), 21-30.
- Cellier, A., Gauquelin, T., Baldy, V., y Ballini, C. (2014). Effect of organic amendment on soil fertility and plant nutrients in a post-fire Mediterranean ecosystem. *Plant and soil*, 376(1-2), 211-228.
- Chen, L., Liu, C., Zou, R., Yang, M., y Zhang, Z. (2016) Experimental examination of effectiveness of vegetation as bio-filter of particulate matters in the urban environment. *Environment. Pollution*. 208.
- Chen, L., Liu, C., Zhang, L., Zou, R., y Zhang, Z. (2017). Variation in tree species ability to capture and retain airborne fine particulate matter (PM 2.5). *Scientific Reports*, 7(1), 1-11.
- Cilliers, S., Cilliers, J., Lubbe, R. y Siebert, S. (2012). Ecosystem services of urban green spaces in African countries—perspectives and challenges. *Urban Ecosystems*. 16:681–702.
- City of Guelph. (2019). Tree technical manual. disponible en <https://guelph.ca/wp-content/uploads/Tree-Technical-Manual.pdf>
- Comité Nacional de Restauración Ecológica. (2018). Documento marco para la Restauración Ecológica. Ministerio del Medio ambiente. Chile Mejor.
- CONAF y CIREN. (2013). Informe técnico final y cobertura digital. Proyecto Monitoreo de cambio, corrección cartográfica y actualización del Catastro de Bosque Nativo en las regiones de Valparaíso, Metropolitana y Libertador Bernardo O’Higgins. 131p.
- CONAF. (2017). Superficies de uso de suelo regional (actualizado a agosto 2017). Recuperado en <http://www.conaf.cl/nuestros-bosques/bosques-en-chile/catastro-vegetacional/>

- CONICYT-FONDEF IDEA (2015) Desarrollo de cubiertas vegetales de edificios para la mitigación de la contaminación atmosférica urbana a través de la captura de material particulado en clima semiárido. FONDEF IDEA 15110104 .
- Corporación Nacional Forestal (CONAF), Centro de Información de Recursos Naturales (CIREN). (2013). Monitoreo de cambios, corrección cartográfica y actualización del catastro de los recursos vegetacionales nativos de las regiones de Valparaíso, Metropolitana y Libertador Bernardo O'Higgins. Disponible en <https://sit.conaf.cl/exp/ficha.php>. Informe Técnico Final. Santiago, Chile.133 p.
- Cortina, J., Maestre, F. T., Vallejo, R., Baeza, M. J., Valdecantos, A., y Pérez-Devesa, M. (2006). Ecosystem structure, function, and restoration success: are they related?. *Journal for Nature Conservation*, 14(3-4), 152-160.
- Cuevas, J. G., Silva, S. I., Leon-Lobos, P., y Ginocchio, R. (2013). Nurse effect and herbivory exclusion facilitate plant colonization in abandoned mine tailings storage facilities in north-central Chile. *Revista Chilena de Historia Natural*, 86(1), 63-74.
- Currie, B.A., Bass, B., (2008). Estimates of air pollution mitigation with green plants and green roofs using the UFORE model. *Urban Ecosyst.* 11, 409–422.
- Dallimer, M., Tang, Z., Gaston, K. J., y Davies, Z. G. (2016). The extent of shifts in vegetation phenology between rural and urban areas within a human-dominated region. *Ecology and Evolution*, 6(7), 1942-1953.
- Davidson, C. I., y Wu, Y. L. (1990). Dry deposition of particles and vapors. In *Acidic precipitation* (pp. 103-216). Springer, New York, NY.
- De Carvalho, R. M.,y Szlafsztein, C. F. (2019). Urban vegetation loss and ecosystem services: The influence on climate regulation and noise and air pollution. *Environmental Pollution*, 245, 844-852.
- De Groot, R.S., Alkemade R., Braat L., Hein L., y Willemen, L. (2010). Challenges in integrating the concept of ecosystem services and values in landscape planning, management and decision making. *Ecological Complexity*. 7:260-272.
- De la Barrera, F., Reyes-Paecke, S., y Banzhaf, E. (2016). Indicators for green spaces in contrasting urban settings. *Ecological indicators*. 62:212-219.
- Decreto Supremo N° 16. (1998). Establece Plan de Prevención y Descontaminación Atmosférica para la Región Metropolitana. Ministerio Secretaría General de la Presidencia; Comisión Nacional de Medio Ambiente.
- Decreto Supremo N° 31. (2016). Establece Plan de Prevención y Descontaminación atmosférica para la región Metropolitana de Santiago. Ministerio del Medio Ambiente.
- Decreto Supremo N° 58. (2004). Reformula y Actualiza Plan de Prevención y Descontaminación Atmosférica para la Región Metropolitana (PPDA). Ministerio Secretaría General de la Presidencia.

- Decreto Supremo N° 66. (2009). Revisa, Reformula y Actualiza Plan de Prevención y Descontaminación Atmosférica para la Región Metropolitana (PPDA). Ministerio Secretaría General de la Presidencia.
- Deligiorgi, D., y Philippopoulos, K. (2011). Spatial interpolation methodologies in urban air pollution modeling: application for the greater area of metropolitan Athens, Greece. *Advanced Air Pollution*, 341-362.
- Deshmukh, P., Isakov, V., Venkatram, A., Yang, B., Zhang, K.M., Logan, R., Baldauf, R., (2018). The effects of roadside vegetation characteristics on local, near-road air quality. *AirQual. Atmos. Heal.* 1–12.
- Díaz-Robles, L., Dávila, S., Varela, C., Schiappacasse, L., & Environmental, T. (2012). The air quality in Chile: Twenty years of challenge: 105th Air and Waste Management Association Annual Conference and Exhibition 2012, ACE 2012.
- Dobbs C., Escobedo F., y Zipperer W. (2011). A framework for developing urban forest ecosystem services and goods. *Landscape and Urban Planning*. 99(3-4):196-206.
- Dobbs, C., Hernández-Moreno, Á., Reyes-Paecke, S., y Miranda, M.D. (2018). Exploring temporal dynamics of urban ecosystem services in Latin America: The case of Bogota (Colombia) and Santiago (Chile). *Ecological indicators*. 85:1068-1080.
- Donoso, C. (1982). Reseña ecológica de los bosques mediterráneos de Chile. *Bosque*. 4(2):117-146.
- Donoso, P., Navarro, C., Soto, D., Gerding, V., Thiers, O., Pinares, J., y Sanhueza, M. J. (2015). Manual de plantaciones de Raulí (*Nothofagus alpina*) y Coihue (*Nothofagus dombeyi*) en Chile. Universidad Católica de Temuco, Temuco, Chile.
- Donoso, S., Peña, K., Pacheco, C., Luna, G., y Aguirre, A. (2011). Respuesta fisiológica y de crecimiento en plantas de Quillaja saponaria y *Cryptocarya alba* sometidas a restricción hídrica. *Bosque (Valdivia)*, 32(2), 187-195.
- Donoso, P., y Soto, D. P. (2010). Plantaciones con especies nativas en el centro-sur de Chile: experiencias, desafíos y oportunidades. *Revista Bosque Nativo*, 47, 10-17.
- Donoso, P. J., Soto, D. P., Schlatter, J. E., y Büchner, C. A. (2009). Effects of early fertilization on the performance of *Nothofagus dombeyi* planted in the Coastal Range of south-central Chile. *Ciencia e investigación agraria: revista latinoamericana de ciencias de la agricultura*, 36(3), 475-486.
- Douglas, I. (2010). The role of green infrastructure in adapting cities to climate change. In *The Routledge handbook of urban ecology* (pp. 607-612). Routledge.
- Duchens, L. (1998). Informe final: evaluación de los recursos forestales de Chile.

- Dzierzanowski, K.; Popek, R.; Gawronska, H.; Saebo, A.; Gawronski, S.W. (2011). Deposition of particulate matter of different size fractions on leaf surfaces and in waxes of urban forest species. *Int. J. Phytoremediat*, 13, 1037–1046.
- Egas, C., Naulin, P. I., y Préndez, M. (2018). Contaminación Urbana por Material Particulado y su Efecto sobre las Características Morfo-Anatómicas de Cuatro Especies Arbóreas de Santiago de Chile. *Información tecnológica*. 29(4): 111-118.
- Elmqvist, T., Setälä, H., Handel, S. N., Van Der Ploeg, S., Aronson, J., Blignaut, J. N., Gomez-Baggethun, E., Nowak, D.J., Kronenberg, J., y De Groot, R. (2015). Benefits of restoring ecosystem services in urban areas. *Current opinion in environmental sustainability*. 14: 101-108.
- Escobedo F.J., Kroeger T., y Wagner J.E. (2011). Urban forests and pollution mitigation: analyzing ecosystem services and disservices. *Environmental Pollution*. 159 (8-9): 20178-2087.
- Escobedo F.J., Nowak D.J., (2009). Spatial heterogeneity and air pollution removal by an urban forest. *Landscape and Urban Planning* 90, 102-110.
- Escobedo, F. J., Wagner, J. E., Nowak, D. J., De la Maza, C. L., Rodriguez, M., y 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.
- Espinoza, M., García, J., y Valeria, O. (1994). Efecto de intensidades diferentes de raleo en el crecimiento de un rodal de pino radiata. *Bosque*, 15(1), 55-65.
- Evans, K., Guariguata, M. R., y Brancalion, P. H. (2018). Participatory monitoring to connect local and global priorities for forest restoration. *Conservation Biology*, 32(3), 525-534.
- Fares, S., Savi, F., Fusaro, L., Conte, A., Salvatori, E., Aromolo, R., y Manes, F. (2016). Particle deposition in a peri-urban Mediterranean forest. *Environmental pollution*. 218, 1278-1286.
- FAO. (2016). Guidelines on urban and peri-urban forestry, by F. Salbitano, S. Borelli, M. Conigliaro and Y. Chen. *FAO Forestry Paper No. 178*. Rome, Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- Fensholt, R., Langanke, T., Rasmussen, K., Reenberg, A., Prince, S. D., Tucker, C., y Epstein, H. (2012). Greenness in semi-arid areas across the globe 1981–2007—an Earth Observing Satellite based analysis of trends and drivers. *Remote sensing of environment*, 121, 144-158.
- Fensholt, R., y Rasmussen, K. (2011). Analysis of trends in the Sahelian 'rain-use efficiency' using GIMMS NDVI, RFE and GPCP rainfall data. *Remote Sensing of Environment*, 115(2), 438-451.

- Fessehaye, M., Abdul-Wahab, S. A., Savage, M. J., Kohler, T., Gherezghiher, T., y Hurni, H. (2014). Fog-water collection for community use. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 29, 52-62.
- Fernández, I. (2011). Los Cerros Islas como Hábitats de Fauna y Generadores de Servicios Ambientales para la Ciudad de Santiago de Chile. *Revista Conservación Ambiental*, 1(1), 9-15.
- Fernández, I. C., y Wu, J. (2018). A GIS-based framework to identify priority areas for urban environmental inequity mitigation and its application in Santiago de Chile. *Applied geography*. 94:213-222.
- Figueroa, J. A., Castro, S. A., Reyes, M., y Teillier, S. (2018). Urban park area and age determine the richness of native and exotic plants in parks of a Latin American city: Santiago as a case study. *Urban ecosystems*. 21(4):645-655.
- Francke, S., Vargas, R., Torugawa, K., y Marita, M. (1998). Manual de control de erosión. Proyecto Cuencas CONAF/JICA 87p.
- Freer-Smith, P. H., Beckett, K. P. y Taylor, G. (2005). Deposition velocities to *Sorbus aria*, *Acer campestre*, *Populus deltoides* × *trichocarpa* 'Beaupré', *Pinus nigra* and × *Cupressocyparis leylandii* for coarse, fine and ultra-fine particles in the urban environment. *Environmental pollution*, 133(1), 157-167.
- Fusaro, L., Marando, F., Sebastiani, A., Capotorti, G., Blasi, C., Copiz, R., Congedo, L., Munafó, M., Ciancarella, L., y Manes, F. (2017). Mapping and assessment of PM10 and O3 removal by woody vegetation at urban and regional level. *Remote Sensing*, 9(8), 791.
- García-Chevesich, P. A., Alvarado, S., Neary, D. G., Valdes, R., Valdes, J., Aguirre, J. J., y Olivares, C. (2014). Respiratory disease and particulate air pollution in Santiago Chile: contribution of erosion particles from fine sediments. *Environmental pollution*. 187: 202-205.
- Ghassoun, Y., Löwner, M.-O., (2017). Land use regression models for total particle number concentrations using 2D, 3D and semantic parameters. *Atmos. Environ.* 166, 362–373.
- Glade, F. E., Miranda, M. D., Meza, F. J., y van Leeuwen, W. J. (2016). Productivity and phenological responses of natural vegetation to present and future inter-annual climate variability across semi-arid river basins in Chile. *Environmental monitoring and assessment*, 188(12), 676.
- González, M. V., Hormazábal, D., y Salinas, R. (2017). Efecto de técnicas de establecimiento sobre el desarrollo inicial de plantaciones de Algarrobo (*Prosopis chilensis* (Mol.) Stuntz) en la zona central de Chile.
- Gower, C.J. Kucharik, J.M. Norman (1999). Direct and indirect estimation of leaf area index, f(APAR), and net primary production of terrestrial ecosystems. *Remote Sens. Environ.*, 70, pp. 29-51

- Grote, R., Samson, R., Alonso, R., Amorim, J. H., Cariñanos, P., Churkina, G., y Paoletti, E. (2016). Functional traits of urban trees: air pollution mitigation potential. *Frontiers in Ecology and the Environment*. 14(10):543-550.
- Guerreiro, C. B., Foltescu, V., y De Leeuw, F. (2014). Air quality status and trends in Europe. *Atmospheric environment*. 98:376-384.
- Guerrero-Leiva, N., Castro, S. A., Rubio, M. A., y Ortiz-Calderón, C. (2016). Retention of atmospheric particulate by three Woody ornamental species in Santiago, Chile. *Water, Air, & Soil Pollution*,. 227(12):435.
- Gunawardena, K. R., Wells, M. J., y Kershaw, T. (2017). Utilising green and bluespace to mitigate urban heat island intensity. *Science of the Total Environment*. 584:1040-1055.
- Guo, R.G.(2012). Maghirang Numerical simulation of airflow and particle collection by vegetative barriers. *Eng. Appl. Comput. Fluid Mech.*, 6 (1), pp. 110-112.
- Habermann, M. Billger, M. Haeger-Eugensson. (2015). Land use regression as method to model air pollution. Previous results for Gothenburg/Sweden. *Procedia Eng.*, 115, pp. 21-28.
- Hajat, A., Hsia, C., y O'Neill, M. S. (2015). Socioeconomic disparities and air pollution exposure: a global review. *Current environmental health reports*, 2(4), 440-450.
- Hartanto, H., Prabhu, R., Widayat, A. S., y Asdak, C. (2003). Factors affecting runoff and soil erosion: plot-level soil loss monitoring for assessing sustainability of forest management. *Forest ecology and management*, 180(1-3), 361-374.
- Hartig, T., y Kahn, P. (2016). Living in cities, naturally. *Science*. 352(6288):938-940.
- Hernández, H., y Villaseñor, R. (2018). Twelve-year change in tree diversity and spatial segregation in the Mediterranean city of Santiago, Chile. *Urban Forestry & Urban Greening*. 29:10-18.
- Hewitt, C. N., Ashworth, K., y MacKenzie, A. R. (2020). Using green infrastructure to improve urban air quality (GI4AQ). *Ambio*, 49(1), 62-73.
- Hirabayashi S., Kroll C.N., y Nowak D.J. (2014). I-Tree Eco dry deposition model descriptions. www.itreetools.org.
- Hirons, A., y Sjöman, H. (2019). Tree species selection for green infrastructure: a guide for specifiers. *Trees & Design Action Group*.
- Huete, A., Didan, K., Miura, T., Rodriguez, E. P., Gao, X., y Ferreira, L. G. (2002). Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices. *Remote sensing of environment*, 83(1-2), 195-213.
- Infraestructura de Datos Geoespaciales (IDE). (2016) Zonificación Plan Regulador Metropolitano de Santiago (PRMS). Archivo shapefile.

- Instituto Nacional de Estadística (INE). (2016). Precenso de Áreas verdes Región Metropolitana. Archivo shapefile.
- Janhäll, S. (2015). Review on urban vegetation and particle air pollution—Deposition and dispersion. *Atmospheric environment*. 105:130-137.
- Janssen, S., Dumont, G., Fierens, F., y Mensink, C. (2008). Spatial interpolation of air pollution measurements using CORINE land cover data. *Atmospheric Environment*, 42(20), 4884-4903.
- Jeanjean, A. P., Monks, P. S., y Leigh, R. J. (2016). Modelling the effectiveness of urban trees and grass on PM_{2.5} reduction via dispersion and deposition at a city scale. *Atmospheric environment*. 147:1-10.
- Jeanjean, A.P.R., Buccolieri, R., Eddy, J., Monks, P.S., Leigh, R.J., (2017). Air quality affected by trees in real street canyons: the case of Marylebone neighbourhood in central London. *Urban For. Urban Green*. 22, 41–53.
- Jeanjean, A.P.R., Hinchliffe, G., McMullan, W.A., Monks, P.S., Leigh, R.J., (2015). A CFD study on the effectiveness of trees to disperse road traffic emissions at a city scale. *Atmos. Environ*. 120, 1–14.
- Jennings, S., Nussbaum, R., Judd, N., Evans, T., Iacobelli, T., Jarvie, J., y Chunquan, Z. (2003). The high conservation value forest toolkit. Edition I, ProForest, Oxford OX, 12, 1-62.
- Jim, C. Y. (1998). Physical and chemical properties of a Hong Kong roadside soil in relation to urban tree growth. *Urban Ecosystems*, 2(2-3), 171-181.
- Jim, C. Y., y Chen, W. Y. (2008). Assessing the ecosystem service of air pollutant removal by urban trees in Guangzhou (China). *Journal of Environmental Management*. 88(4):665-676.
- Kariyeva, J., van Leeuwen, W. J., y Woodhouse, C. A. (2012). Impacts of climate gradients on the vegetation phenology of major land use types in Central Asia (1981–2008). *Frontiers of Earth Science*, 6(2), 206-225.
- Keenan, T. F., Gray, J., Friedl, M. A., Toomey, M., Bohrer, G., Hollinger, D. Y., y Yang, B. (2014). Net carbon uptake has increased through warming-induced changes in temperate forest phenology. *Nature Climate Change*, 4(7), 598-604.
- Kim, S. Y., Yi, S. J., Eum, Y. S., Choi, H. J., Shin, H., Ryou, H. G., y Kim, H. (2014). Ordinary kriging approach to predicting long-term particulate matter concentrations in seven major Korean cities. *Environmental health and toxicology*, 29.
- Kleine Deters, R. Zalakeviciute, M. Gonzalez, Y. Rybarczyk. (2017). Modeling PM 2.5 Urban Pollution Using Machine Learning and Selected Meteorological Parameters. *J. Electr. Comput. Eng.*, pp. 1-14.

- Kozłowski, T. T. (1999). Soil compaction and growth of woody plants. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 14(6), 596-619.
- Kroeger, T., McDonald, R. I., Boucher, T., Zhang, P., y Wang, L. (2018). Where the people are: Current trends and future potential targeted investments in urban trees for PM10 and temperature mitigation in 27 US cities. *Landscape and urban planning*. 177:227-240.
- Kurt, O.K., Zhang, J., Pinkerton, K., E. 2016 . Pulmonary health effects of air pollution. *Current opinion in pulmonary medicine*, 22(2):138.
- Langenheim, N., White, M., Tapper, N., Livesley, S. J., y Ramirez-Lovering, D. (2020). Right tree, right place, right time: A visual-functional design approach to select and place trees for optimal shade benefit to commuting pedestrians. *Sustainable Cities and Society*, 52, 101816.
- Lerner, D. N. y Holt, A. (2012). How should we manage urban river corridors?. *Procedia Environmental Sciences*, 13, 721-729.
- Ley N° 20.283. Ley sobre recuperación del bosque nativo y fomento forestal. Santiago, Chile, 2008.
- Li, X. B., Lu, Q. C., Lu, S. J., He, H. D., Peng, Z. R., Gao, Y., y Wang, Z. Y. (2016). The impacts of roadside vegetation barriers on the dispersion of gaseous traffic pollution in urban street canyons. *Urban forestry & urban greening*. 17:80-91.
- Liang, L., Schwartz, M. D., y Fei, S. (2011). Validating satellite phenology through intensive ground observation and landscape scaling in a mixed seasonal forest. *Remote Sensing of Environment*, 115(1), 143-157.
- Liao, D., Peuquet, D. J., Duan, Y., Whitsel, E. A., Dou, J., Smith, R. L, Lin, H., Chen, J., y Heiss, G. (2006). GIS approaches for the estimation of residential-level ambient PM concentrations. *Environmental health perspectives*, 114(9), 1374-1380.
- Liu J., Mo L., Zhu L., Yang Y., Liu J., Qiu D., Zhang Z., Liu J. (2015). Removal efficiency of particulate matter at different underlying surfaces in Beijing. *Environment Science Pollution Research*.
- Livesley, S. J., McPherson, G. M., y Calfapietra, C. (2016). The urban forest and ecosystem services: Impacts on urban water, heat, and pollution cycles at the tree, street, and city scale. *Journal of Environ Quality*. 45: 119–124.
- Locatelli, B., Homberger, J. M., Ochoa-Tocachi, B., Bonnesoeur, V., Román, F., Drenkhan, F., y Buytaert, W. (2020). Impactos de las zanjas de infiltración en el agua y los suelos:¿ Qué sabemos? (Doctoral dissertation, Infraestructura Natural para la Seguridad Hídrica, Forest Trends, Lima, Peru).
- Lovett, G. M. (1994). Atmospheric deposition of nutrients and pollutants in North America: an ecological perspective. *Ecological Applications*. 4(4):629-650.

- Luebert, F., y Pliscoff, P. (2006). Sinopsis bioclimática y vegetacional de Chile. Editorial Universitaria.
- Lund University. (2018). A software package to analyse time-series of satellite sensor data. Recuperado en <http://web.nateko.lu.se/timesat/timesat.asp>
- Maestre, F. T., Bautista, S., Cortina, J., Bladé, C., Bellot, J., y Vallejo, R. (2003). Bases ecológicas para la restauración de los espartales semiáridos degradados. *Revista Ecosistemas*, 12(1).
- Mallet, B. Sportisse. (2008). Air quality modeling: from deterministic to stochastic approaches. *Comput. Math. with Appl.*, 55, pp. 2329-2337.
- Manes, F., Marando, F., Capotorti, G., Blasi, C., Salvatori, E., Fusaro, L., y Munafò, M. (2016). Regulating ecosystem services of forests in ten Italian metropolitan cities: air quality improvement by PM10 and O3 removal. *Ecological indicators*, 67, 425-440.
- Marando, F., Salvatori, E., Fusaro, L., y Manes, F. (2016). Removal of PM10 by forests as a nature-based solution for air quality improvement in the Metropolitan city of Rome. *Forests*, 7(7), 150.
- Martin, N.A., Chappelka, A.H., Somers, G., Loewenstein, E.F., Keever, G.J., (2013). Evaluation of sampling protocol for i-Tree Eco: a case study in predicting ecosystem services at Auburn University. *Arboric. Urban For.* 39, 56–61.
- Martínez, B. (2013). Guía básica de buenas prácticas para plantaciones forestales de pequeños y medianos propietarios. Santiago de Chile, Chile. Recuperado de <http://www.conaf.cl/wp-content/files/mf/1386687876guiabuenaspracticaspf.pdf>.
- McDonald A.G. (2007). Quantifying the effect of urban tree planting on concentrations and depositions of PM10 in two UK conurbations. *Atmospheric Environment* 41, 8435-8467
- Melaas, E. K., Sulla-Menashe, D., Gray, J. M., Black, T. A., Morin, T. H., Richardson, A. D., y Friedl, M. A. (2016). Multisite analysis of land surface phenology in North American temperate and boreal deciduous forests from Landsat. *Remote Sensing of Environment*, 186, 452-464.
- Ministerio del Medio Ambiente (2016) Guía de calidad del aire y educación ambiental.
- Ministerio del Medio Ambiente (2016). Reporte de Calidad del Aire. 2013-2015.
- Ministerio del Medio Ambiente (2018). Determinación del Servicio ecosistémico de purificación del aire en el área del proyecto GeF Montaña. estudio encargado a: Dr. Marcelo Miranda, Dr. Cynamon Dobbs, Magdalena Olave y Pilar Olave. Departamento de ecosistema y Medio ambiente, pontificia Universidad católica de Chile. Financiado por: proyecto
- Ministerio del Medio Ambiente. (2016). Guía de Calidad de Aire y Educación Ambiental. División de educación ambiental y participación ciudadana.

- Ministerio del Medio Ambiente. (2018). Cuarto Reporte del Estado del Medio Ambiente.
- Miranda, A., Lara, A., Altamirano, A., Di Bella, C., González, M. E., y Camarero, J. J. (2020). Forest browning trends in response to drought in a highly threatened mediterranean landscape of South America. *Ecological Indicators*, 115, 106401.
- Mitchell, M. G., Suarez-Castro, A. F., Martinez-Harms, M., Maron, M., McAlpine, C., Gaston, K. J., y Rhodes, J. R. (2015). Reframing landscape fragmentation's effects on ecosystem services. *Trends in ecology & evolution*. 30(4): 190-198.
- Mo, L., Ma, Z., Xu, Y., Sun, F., Lun, X., Liu, X., Chen, J., y Yu, X. (2015). Assessing the capacity of plant species to accumulate particulate matter in Beijing, China. *PLoS one*. 10(10).
- Moote A, Savage M, Abrams J, Derr T, Krasilovsky E, y Schumann M. (2010). Multiparty monitoring and assessment of collaborative forest restoration projects—short guide for grant recipients. Ecological Restoration Institute and New Mexico Forest and Watershed Restoration Institute, Las Vegas, New Mexico. Disponible en http://www.fs.usda.gov/Internet/FSE_DOCUMENTS/stelprdb5274477.pdf
- Mori, J., Fini, A., Galimberti, M., Ginepro, M., Burchi, G., Massa, D., y Ferrini, F. (2018). Air pollution deposition on a roadside vegetation barrier in a Mediterranean environment: Combined effect of evergreen shrub species and planting density. *Science of the total environment*. 643:725-737.
- Morales, N. S., Becerra, P. I., Arellano, E. C., y Gilabert, H. B. (2015). Effect of large and small herbivores on seed and seedling survival of *Beilschmiedia miersii* in central Chile.
- Mostafavi, M. A., Beni, L. H., y Mallet, K. H. (2010). Geosimulation of geographic dynamics based on voronoi diagram. In *Transactions on computational science IX* (pp. 183-201). Springer, Berlin, Heidelberg.
- Muñoz, D., Aguilar, B., Fuentealba, R., y Préndez, M. (2017). Environmental studies in two communes of Santiago de Chile by the analysis of magnetic properties of particulate matter deposited on leaves of roadside trees. *Atmospheric environment*. 152:617-627.
- Nagai, S., Nasahara, K. N., Muraoka, H., Akiyama, T., y Tsuchida, S. (2010). Field experiments to test the use of the normalized-difference vegetation index for phenology detection. *Agricultural and Forest Meteorology*, 150(2), 152-160.
- Nguyen, T., Yu, X., Zhang, Z., Liu, M., y Liu, X. (2015). Relationship between types of urban forest and PM_{2.5} capture at three growth stages of leaves. *Journal of Environmental Sciences*. 27: 33-41.
- Nitta, H., Yamazaki, S., Omori, T., y Sato, T. (2010). An introduction to epidemiologic and statistical methods useful in environmental epidemiology. *Journal of epidemiology*, 1004160162-1004160162.
- Nowak D.J., Crane D.E. (2000). The Urban Forest Effects (UFORE) model: quantifying urban forest structure and functions. In: Hansen, Mark; Burk, Tom, eds. *Integrated tools for*

- natural resources inventories in the 21st century. Gen. Tech. Rep. NC-212. St. Paul, MN: U.S. Dept. of Agriculture, Forest Service, North Central Forest Experiment Station. 714-720.
- Nowak D.J., Crane D.E., Stevens J.C. (2006). Air pollution removal by trees and shrubs in the United States. *Urban Forestry & Urban Greening* 4, 115-123
- Nowak, D. J., Hirabayashi, S., Bodine, A., y Greenfield, E. (2014). Tree and forest effects on air quality and human health in the United States. *Environmental Pollution*. 193: 119–129.
- Nowak, D.J., (1994). Air Pollution Removal by Chicago's Urban Forest, in: Chicago's. Urban Forest Ecosystem: Results of the Chicago Urban Forest Climate Project.PA. pp. 63–81.
- Nowak, D.J., Crane, D.E., y Stevens, J.C. (2006). Air pollution removal by urban trees and shrubs in the United States. *Urban Forestry y Urban Greening* 4(3-4), 115-123.
- Nowak, D.J., Hoehn, R.E., Bodine, A.R., Greenfield, E.J., O'Neil-Dunne, J., Nowak, D.J., Hoehn, R.E., Greenfield, E.J., Bodine, A.R., O'Neil-Dunne, J.,(2013). Urban forest structure, ecosystem services and change in Syracuse, NY. *Urban Ecosyst* 19, 1455–1477.
- OECD. (2013). OECD Urban Policy Reviews, Chile 2013. OECD Publishing. <http://dx.doi.org/10.1787/9789264191808-en>
- OECD. (2019), Urban population by city size (indicator). doi: 10.1787/b4332f92
- Ojeda, A. J. A., Becchi, F. G. G., y Cartes, S. D. (2014). Manual de plantación de árboles en áreas urbanas. CONAF.
- Ostro, B., Sanchez, J.M., Aranda C., Eskeland, G. S. 1996. Air pollution and mortality: results from a study of Santiago, Chile. *Journal of Exposure Analysis and Environmental Epidemiology*, 6(1):97–114.
- Ottel , M.; van Bohemen, H.D.; Fraaij, A.L.A. (2010). Quantifying the deposition of particulate matter on climber vegetation on living walls. *Ecol. Eng.*, 36, 154–162.
- Papaioannou, I. *Vegetated Facades as Environmental Control Systems Filtering Fine Particulate Matter (PM2.5) for Improving Indoor Air Quality*; University of Southern California: Los Angeles, CA, USA, 2013.
- Park, N. W. (2016). Time-series mapping of PM10 concentration using multi-gaussian space-time kriging: a case study in the Seoul metropolitan area, Korea. *Advances in Meteorology*, 2016.
- Pataki, D. E., Carreiro, M. M., Cherrier, J., Grulke, N. E., Jennings, V., Pincetl, S., Pouyat, R.V., Whitlow, T.H., y Zipperer, W. C. (2011). Coupling biogeochemical cycles in urban environments: ecosystem services, green solutions, and misconceptions. *Frontiers in Ecology and the Environment*. 9(1):27-36.

- Pereira, J. S., y Pallardy, S. (1989). Water stress limitations to tree productivity. In *Biomass production by fast-growing trees* (pp. 37-56). Springer, Dordrecht.
- Pohl, N. (2014). Invasiones de los usurpadores de hábitat, La amenaza de las especies invasoras.
- Pokojski, W., y Pokojska, P. (2018). Voronoi diagrams—inventor, method, applications. *Polish Cartographical Review*, 50(3), 141-150.
- Popek, R., Przybysz, A., Gawrońska, H., Klamkowski, K., y Gawroński, S. W. (2018). Impact of particulate matter accumulation on the photosynthetic apparatus of roadside woody plants growing in the urban conditions. *Ecotoxicology and environmental safety*. 163: 56-62.
- Préndez, M., Araya, M., Criollo, C., Egas, C., Farías, I., Fuentealba, R., y González, E. (2019). Urban Trees and Their Relationship with Air Pollution by Particulate Matter and Ozone in Santiago, Chile. In *Urban Climates in Latin America* (pp. 167-206). Springer, Cham.
- Prieto, M. J., Mancilla, P., Astudillo, P., Reyes, Á., y Román, O. (2007). Exceso de morbilidad respiratoria en niños y adultos mayores en una comuna de Santiago con alta contaminación atmosférica por partículas. *Revista médica de Chile*. 135(2):221-228.
- Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo. (2016). Guía Práctica Campesina Manejo Sustentable del Bosque Nativo. Recuperado en https://www.cl.undp.org/content/chile/es/home/library/environment_energy/guias-campesinas/manejo-sustentable-del-bosque-nativo.html en agosto del año 2020.
- Przybysz, A.; Saebo, A.; Hanslin, H.M.; Gawronski, S.W.(2014). Accumulation of particulate matter and trace elements on vegetation as affected by pollution level, rainfall and the passage of time. *Sci. Total Environ.*, 481, 360–369.
- Qin, H., Hong, B., Jiang, R., Yan, S., y Zhou, Y. (2019). The Effect of Vegetation Enhancement on Particulate Pollution Reduction: CFD Simulations in an Urban Park. *Forests*. 10(5): 373.
- Qiu, L., Liu, F., Zhang, X., y Gao, T. (2018). The reducing effect of green spaces with different vegetation structure on atmospheric particulate matter concentration in Baoji city, China. *Atmosphere*. 9(9):332.
- Rai, A., Kulshreshtha, K., Srivastava, P. K. y Mohanty, C. S. (2010). Leaf surface structure alterations due to particulate pollution in some common plants. *The Environmentalist*, 30(1), 18-23.
- Rao, L.A. George, V. Shandas, T.N. Rosenstiel. (2017).Assessing the potential of land use modification to mitigate ambient NO2 and its consequences for respiratory health. *Int. J. Environ. Res. Public Health*, 14 p. 750.
- Ren Z, Du Y, He X, Pu R, Zheng H y Hu H. (2017). Spatiotemporal pattern of urban forest leaf área index in response to rapid urbanization and urban greening. *Journal of Forest Research*. 29, pages785–796.

- Reubens, B., Poesen, J., Nyssen, J., Leduc, Y., Abraha, A. Z., Tewoldeberhan, S., Bauer, H., Gebrehiwot, K., Deckers, J., y Muys, B. (2009). Establishment and management of woody seedlings in gullies in a semi-arid environment (Tigray, Ethiopia). *Plant and Soil*, 324(1-2), 131.
- Reyes-Päcke, S., y Figueroa Aldunce, I. M. (2010). Distribución, superficie y accesibilidad de las áreas verdes en Santiago de Chile. *EURE (Santiago)*, 36(109): 89-110.
- Riojas-Rodríguez, H., da Silva, A. S., Texcalac-Sangrador, J. L., y Moreno-Banda, G. L. (2016). Air pollution management and control in Latin America and the Caribbean: implications for climate change. *Revista Panamericana de Salud Pública*. 40:150-159.
- Rückerl, R., Schneider A., Breitner S., Cyrus J., y Peters A. (2011). Health effects of particulate air pollution: a review of epidemiological evidence. *Inhalation Toxicology*. 23(10): 555-592.
- Ryu, J., Kim, J. J., Byeon, H., Go, T., y Lee, S. J. (2019). Removal of fine particulate matter (PM_{2.5}) via atmospheric humidity caused by evapotranspiration. *Environmental pollution*. 245: 253-259.
- Sæbø, A., Popek, R., Nawrot, B., Hanslin, H. M., Gawronska, H. y Gawronski, S. W. (2012). Plant species differences in particulate matter accumulation on leaf surfaces. *Science of the Total Environment*, 427, 347-354.
- Sæbo, A., Popek, R., Nawrot, B., Hanslin, H. M., Gawronska, H., y Gawronski, S. W. (2012). Plant species differences in particulate matter accumulation on leaf surfaces. *Science of the Total Environment*. 427: 347-354.
- Salbitano, F., Borelli, S., Conigliaro, M., y Yujuan, C. (2016). Guidelines on urban and peri-urban forestry. FAO.
- Santilli, L., Castro, S. A., Figueroa, J. A., Guerrero, N., Ray, C., Romero-Mieres, M., ... y Lavandero, N. (2018). Exotic species predominates in the urban woody flora of central Chile. *Gayana. Botanica*. 75(2):568-588.
- Scapini, V., Carrasco, C., y Vergara, C. (2018). Efectos de la contaminación del aire en atenciones de urgencia de la Región Metropolitana. *INGENIERÍA DE SISTEMAS*. 55.
- SEA (Servicio de Evaluación Ambiental). (2012). Guía para el Uso de Modelos de Calidad del Aire en el SEIA.
- Selmi, W., Weber, C., Rivière, E., Blond, N., Mehdi, L., Nowak, D., (2016). Air pollution removal by trees in public green spaces in Strasbourg city, France. *Urban For. Urban Green*. 17, 192–201.
- Servicio Agrícola y Ganadero. (2020). Viveros y depósitos de plantas. Visitado en <https://www.sag.gob.cl/ambitos-de-accion/viveros-y-depositos-de-plantas>.

- Silli, V., Salvatori, E., y Manes, F. (2015). Removal of airborne particulate matter by vegetation in an urban park in the city of Rome (Italy): An Ecosystem Services Perspective. *Annali di Botanica*, 5,53-62.
- Sioutas, C., Delfino, R. J., y Singh, M. (2005). Exposure assessment for atmospheric ultrafine particles (UFPs) and implications in epidemiologic research. *Environmental health perspectives*, 113(8), 947-955.
- Soto, C. (2012). Vegetación en el Área Metropolitana de Santiago. Hacia un balance general en base a estadísticas oficiales. Comisión de estudios MINVU, Documento N°2. Recuperado en <https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&ved=2ahUKEwiW4J2dk67mAhWpH7kGHdz7CR0QFjAAegQIBRAC&url=http%3A%2F%2F2010-2014.gob.cl%2Fmedia%2F2013%2F10%2F2012-10-25-DT-N%25C2%25BA2-Vegetaci%25C3%25B3n-urbana-f.pdf&usg=AOvVaw3YdvP4xE1hYZGeTSD367Jx>
- Soto, D. P., Donoso, P. J., Salas, C., y Puettmann, K. J. (2015). Light availability and soil compaction influence the growth of underplanted following partial shelterwood harvest and soil scarification. *Canadian Journal of Forest Research*, 45(8).
- Speak, A.F.; Rothwell, J.J.; Lindley, S.J.; Smith, C.L.(2012). Urban particulate pollution reduction by four species of green roof vegetation in a UK city. *Atmos. Environ.* , 61, 283–293.
- Stapleton, E.; Ruiz-Rudolph, P. (2016).The potential for indoor ultrafine particle reduction using vegetation under laboratory conditions. *Indoor Built Environ.*, 27, 70–83
- Steffens, Y.J. Wang, K.M. Zhang.(2012).Exploration of effects of a vegetation barrier on particle size distributions in a near-road environment. *Atmos. Environ.*, 50 pp. 120-128.
- Superintendencia del Medio Ambiente (SMA) Gobierno de Chile. (2014). Evaluación del Instrumento de Emisiones Región Metropolitana. División de Gestión e Innovación 2014.
- Tan, P.T.; Sia, A.(2005). A Pilot Green Roof Research Project in Singapore. In *Third Annual Greening Rooftops for Sustainable Communities Conference; Green Roofs for Healthy Cities: Toronto, ON, Canada*, p. 9.
- The Nature Conservancy. 2018. Nature in the urban century: a global assessment of where and how to conserve nature for biodiversity and human wellbeing. www.nature.org
- Tiwari, A., Kumar, P., Baldauf, R., Zhang, K. M., Pilla, F., Di Sabatino, S., Brattich, E., y Pulvirenti, B. (2019). Considerations for evaluating green infrastructure impacts in microscale and macroscale air pollution dispersion models. *Science of The Total Environment*, 672, 410-426.
- Toribio, M. M., Martinez, C., Ceccon, E., y Guariguata, M. R. (2017). Planes actuales de restauración ecológica en Latinoamérica: Avances y omisiones. *Revista de Ciencias Ambientales*, 51(2), 1-30.

- Toro, R., Campos, C., Molina, C., y Leiva-Guzmán, M. A. (2015). Accuracy and reliability of Chile's National Air Quality Information System for measuring particulate matter: Beta attenuation monitoring issue. *Environment international*. 82:101-109.
- USDA. (2019). National Agroforestry Center. Visitado en https://www.fs.usda.gov/nac/buffers/guidelines/6_aesthetics/3.html
- Van den Berg, M., van Poppel, M., van Kamp, I., Andrusaityte, S., Balseviciene, B., Cirach, M., y Smith, G. (2016). Visiting green space is associated with mental health and vitality: A cross-sectional study in four european cities. *Health & place*. 38:8-15.
- Van den Bosch, M. A., y Depledge, M. H. (2015). Healthy people with nature in mind. *BMC public health*. 15(1):1232.
- Van Leeuwen, W. J., Hartfield, K., Miranda, M., y Meza, F. J. (2013). Trends and ENSO/AAO driven variability in NDVI derived productivity and phenology alongside the Andes Mountains. *Remote Sensing*, 5(3), 1177-1203.
- Van Veenhuizen, R., y Prieto-Celi, M. (2000). Manual de captación y aprovechamiento del agua de lluvia, experiencias en América Latina. Serie: zonas áridas y semiáridas. Oficina regional de la FAO (Food and Agriculture Organization) para América Latina y el Caribe Santiago, Chile.
- Vargas, M. A., y Balmaceda, N. (2011). Forestación urbana mediante compensación ambiental. *Revista Centro de políticas públicas UC*, 6.
- Vásquez, A. E. (2016). Infraestructura verde, servicios ecosistémicos y sus aportes para enfrentar el cambio climático en ciudades: el caso del corredor ribereño del río Mapocho en Santiago de Chile. *Revista de Geografía Norte Grande*, (63), 63-86.
- Viecco, M., Vera, S., Jorquera, H., Bustamante, W., Gironás, J., Dobbs, C., y Leiva, E. (2018). Potential of Particle Matter Dry Deposition on Green Roofs and Living Walls Vegetation for Mitigating Urban Atmospheric Pollution in Semiarid Climates. *Sustainability*. 10(7):2431.
- Vieira, J., Matos, P., Mexia, T., Silva, P., Lopes, N., Freitas, C., y Pinho, P. (2018). Green spaces are not all the same for the provision of air purification and climate regulation services: The case of urban parks. *Environmental Research*, 160, 306-313.
- Vos, P. E., Maiheu, B., Vankerkom, J., y Janssen, S. (2013). Improving local air quality in cities: to tree or not to tree?. *Environmental pollution*. 183:113-122.
- Vranckx, S., Vos, P., Maiheu, B., Janssen, S., (2015). Impact of trees on pollutant dispersion instreet canyons: a numerical study of the annual average effects in Antwerp, Belgium. *Sci. Total Environ*. 532, 474–483.
- Wang, N., Jiao, J. Y., Lei, D., Chen, Y., y Wang, D. L. (2014). Effect of rainfall erosion: seedling damage and establishment problems. *Land Degradation & Development*, 25(6), 565-572.

- Weber C. (2013). Ecosystem services provided by urban vegetation: a literature review. In: Rauch S., Morrison G., Norra S et al. (Eds) Urban environment. Dordrecht, The Netherlands, Springer.
- Wheeler, B., Lovell, R., Higgins, S., White, M., Alcock, I., Osborne, N. J. y Depledge, M. H. (2015). Beyond greenspace: an ecological study of population general health and indicators of natural environment type and quality. *International journal of health geographics*. 14(1):17.
- Willis, K. J., y Petrokofsky, G. (2017). The natural capital of city trees. *Science*. 356(6336): 374-376.
- World Health Organization. (2005). WHO Air quality guidelines for particulate matter, ozone. Global update: Nitrogen dioxide and sulphur dioxide.
- World Health Organization. (2018). Air pollution. Disponible Online: [https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/ambient-\(outdoor\)-air-quality-and-health](https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/ambient-(outdoor)-air-quality-and-health)
- World Health Organization. 2018. World Health Statistics 2018: Monitoring health for the SDGs. World Health Organization.
- Xing, Y. y Brimblecombe, P. (2019). Role of vegetation in deposition and dispersion of air pollution in urban parks. *Atmospheric Environment*, 201, 73-83.
- Yang J., McBride J., Zhou J., Sun Z., (2005). The urban forest in Beijing and its role in air pollution reduction. *Urban forestry & Urban Greening* 3, 65-78.
- Yang, H., Yang, X., Heskell, M., Sun, S., y Tang, J. (2017). Seasonal variations of leaf and canopy properties tracked by ground-based NDVI imagery in a temperate forest. *Scientific reports*, 7(1), 1-10.
- Yang, J., McBride, J., Zhou, J., Sun, Z., (2004). The urban forest in Beijing and its role in air pollution reduction. *Urban For. Urban Green*. 3, 65–78.
- Yang, J., Yu, Q., Gong, P., (2008). Quantifying air pollution removal by green roofs in Chicago. *Atmos. Environ*. 42, 7266–7273.
- Yang, X., Jiang, L., Zhao, W., Xiong, Q., Zhao, W., y Yan, X. (2018). Comparison of ground-based PM_{2.5} and PM₁₀ concentrations in China, India, and the US. *International journal of environmental research and public health*. 15(7):1382.
- Yin, S., Shen, Z., Zhou, P., Zou, X., Che, S., Wang, W.,(2011). Quantifying air pollution attenuation within urban parks: an experimental approach in Shanghai, China. *Environ. Pollut*. 159, 2155–2163.
- Zelikoff JT, Chen LC, Cohen MD, Fang K, Gordon T, Li Y, Nadziejko C, Schlesinger RB. (2003). Effects of inhaled ambient particulate matter on pulmonary antimicrobial immune defense. *Inhalation Toxicology*. 15:131–150.

- Zha, Y., Shi, Y., Tang, J., Liu, X., Feng, C., y Zhang, Y. (2018). Spatial-Temporal Variability and Dust-Capture Capability of 8 Plants in Urban China. *Polish Journal of Environmental Studies*. 28(1): 453-462.
- Zhang, Z., y Li, Y. (2008). Application of GIS combining with limits of voronoi diagram in socioeconomic factor of agricultural land grading. In *International Conference on Computer and Computing Technologies in Agriculture* (pp. 423-430). Springer, Boston, MA.
- Zellmer, A. J., Claisse, J. T., Williams, C. M., Schwab, S., y Pondella, D. J. (2019). Predicting Optimal Sites for Ecosystem Restoration Using Stacked-Species Distribution Modeling. *Frontiers in Marine Science*, 6, 3.