



PONTIFICIA
UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DE CHILE



Corredores Biológicos
de **Montaña**
Proyecto GEF

INFORME FINAL

DETERMINACIÓN DEL SERVICIO ECOSISTÉMICO DE PURIFICACIÓN DEL AIRE EN EL ÁREA DEL PROYECTO GEF MONTAÑA

Desarrollado por:

Dr. Marcelo Miranda - Dr. Cynnamon Dobbs
Magdalena Olave - Pilar Olave

Departamento de Ecosistema y Medio Ambiente

Pontificia Universidad Católica de Chile
Av. Vicuña Mackenna 4860, Macul-Santiago.

Contrapartes

División de Recursos Naturales y Biodiversidad
Ministerio del Medio Ambiente

Equipo GEF Montaña (GEFSEC ID 5135)

Financiado por:

Proyecto GEFSEC ID 5135 “Protegiendo la Biodiversidad y Múltiples Servicios Ecosistémicos en Corredores Biológicos de Montaña, en el Ecosistema Mediterráneo de Chile”. Ministerio del Medio Ambiente - ONU Medio Ambiente (2016-2021).

Citar como:

MMA - ONU 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. Cynnamon Dobbs, Magdalena Olave & Pilar Olave*. Departamento de Ecosistema y Medio Ambiente, Pontificia Universidad Católica de Chile. Financiado en el marco del proyecto GEFSEC ID 5135 Ministerio del Medio Ambiente - ONU Medio Ambiente. Santiago, Chile. 60pp.





PONTIFICIA
UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DE CHILE



Corredores Biológicos
de **Montaña**
Proyecto GEF

INFORME FINAL

DETERMINACIÓN DEL SERVICIO ECOSISTÉMICO DE PURIFICACIÓN DEL AIRE EN EL ÁREA DEL PROYECTO GEF MONTAÑA

Desarrollado por:

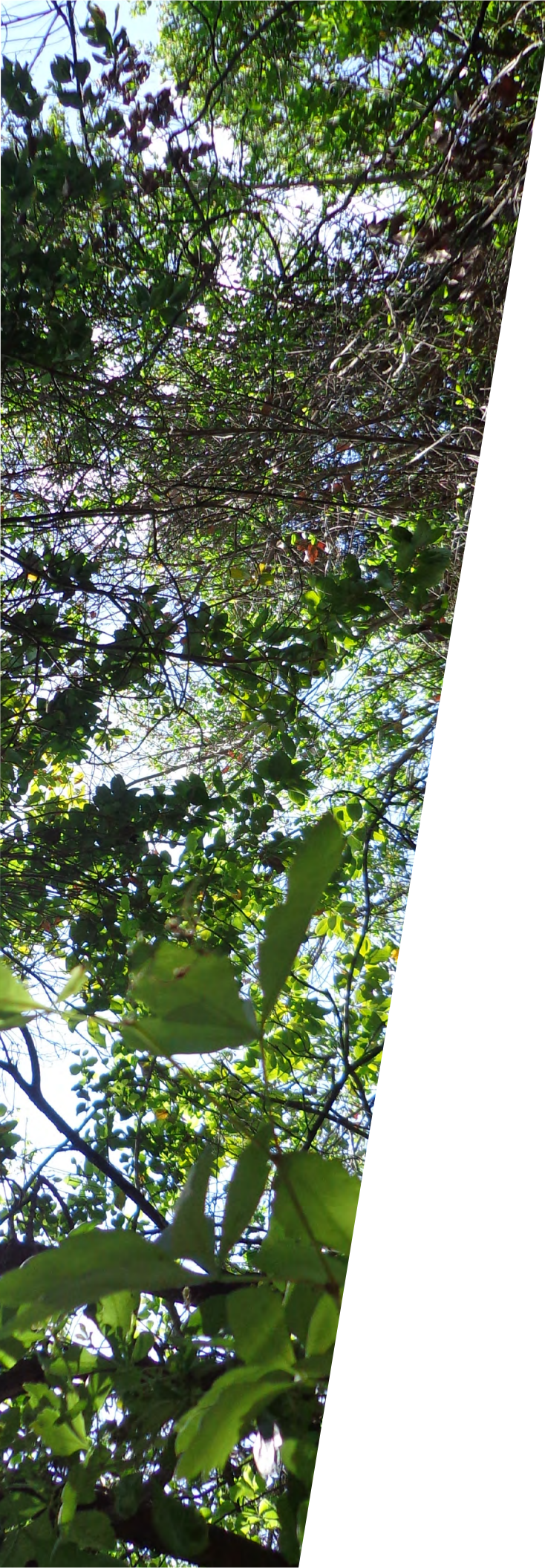
Dr. Marcelo Miranda - Dr. Cynnamon Dobbs

Magdalena Olave - Pilar Olave



Contenido

1. Introducción	6
2. Metodología	8
2.1. Área de estudio	10
2.2. Selección de parcelas de muestreo	11
2.3. Estimación del área foliar	13
2.4. Modelación de la depositación de contaminantes	14
2.5. Cuantificación espacial del potencial de remoción del bosque nativo	18
2.6. Cuantificación del potencial de depositación por especie	18
2.7. Modelo global de estimación del Índice de Área Foliar (LAI)	18
2.8. Programas	19
3. Resultados	20
3.1. Datos de terreno	22
3.2. Estructura y composición del bosque	25
3.2.1. Bosque Denso	26
3.2.2. Bosque Semi-Denso	27
3.2.3. Bosque Abierto	29
3.2.4. Bosque Muy Abierto	30
3.3. Depositación de PM ₁₀	32
3.3.1. Depositación de PM ₁₀ por el bosque a partir de los datos a nivel de parcela	32
3.3.2. Depositación de PM ₁₀ por formación vegetacional	32
3.3.3. Depositación de PM ₁₀ por especies	36
3.4. Depositación de PM _{2,5}	38
3.4.1. Depositación de PM _{2,5} por el bosque a partir de los datos a nivel de parcela	38
3.4.2. Depositación de PM _{2,5} por el bosque de acuerdo a formación vegetacional	38
3.4.3. Depositación de PM _{2,5} por especies	45
3.5. Modelo de estimación de LAI	46
3.5.1. Análisis estadístico exploratorio de las relaciones entre LAI y NDVI	46
3.5.2. Modelo lineal generalizado para LAI	47
4. Discusión	50
5. Limitaciones del modelo y recomendaciones	52
6. Anexo	54
7. Referencias	58



1

Introducción

Las ciudades son centros de producción de gases contaminantes que pueden causar varios problemas de salud para la población humana (Oakes *et al.* 2014). Las emisiones de material particulado se encuentran asociadas a enfermedades cardiovasculares y respiratorias con significativos efectos en la salud de la población. Las partículas del material en suspensión se clasifican según su tamaño. Las partículas cuyo tamaño son menores o iguales a $10\ \mu\text{m}$ (PM₁₀) son llamadas respirables porque tienen la capacidad de introducirse al sistema respiratorio.

Mientras menor sea el tamaño de estas partículas mayor su capacidad de ingresar al árbol respiratorio, tales como el PM_{2,5} que alcanza los bronquiolos y los alveolos, siendo capaces de atravesar hasta el torrente sanguíneo. Las pérdidas económicas en lo que incurre la sociedad chilena por concentraciones sobre la norma se ha estimado en US\$6.39 mil millones anuales, principalmente por concepto de mortalidad prematura y bronquitis crónica (Bazan *et al.* 2014).

Una de las formas en que la política pública ha abordado este problema es con la incorporación de medidas de mitigación para las emisiones atmosféricas dentro de sus Planes de Descontaminación Ambiental, en las cuales se incluyen la plantación de árboles con el propósito de promover dicha descontaminación.

Los bosques proveen variados servicios ecosistémicos que mantienen o mejoran el bienestar humano, dentro de estos se encuentra el servicio de purificación del aire (*Ninan y Inoue, 2013*). Por lo que los bosques dentro o aledaños a las ciudades ejercen un importante rol en la descontaminación del aire, con la ventaja de no solo generar soluciones en este ámbito sino también proveer para otros servicios tales como regulación de la temperatura, mitigación de la escorrentía, recreación, sentimiento de pertenencia, entre otros (*Dobbs et al. 2011*). Los bosques de la zona Mediterránea de Chile, donde se encuentra inserto el presente proyecto, están localizados en un hotspot de biodiversidad, destacando no solo su utilidad para la provisión de servicios ecosistémicos y el bienestar humano sino también para la conservación de la naturaleza.

Los bosques pueden reducir la contaminación ambiental a través de la depositación seca (*Hirabayashi et al. 2014, Nowak et al. 2013*) dado que las superficies foliares son capaces de actuar como filtros biológicos y por ende limpiar el aire (*Nowak et al. 2006*). Para el estudio de este servicio se han desarrollado distintos modelos dentro de los cuales el I-Tree Eco es el más utilizado (*Nowak and Crane, 2000*), el cual también se utiliza para ambientes peri-urbanos (*Baumgardner et al. 2012*). El modelo de depositación del I-Tree Eco (anteriormente UFORE) fue desarrollado por el Servicio Forestal de Estados Unidos y utiliza datos

meteorológicos, datos de concentración de contaminantes y de área foliar para estimar la purificación del aire por remoción de contaminantes. Para este tipo de estudios es de suma relevancia el incluir la variabilidad en índice de área foliar de distintos tipos de bosques o de especies (*Bottalico et al. 2017*).

Las mediciones de área foliar se pueden realizar por métodos directos que incluyen muestreos destructivos y métodos indirectos, tales como el uso de instrumentos que son capaces de capturar la cantidad de luz que pasa a través de las copas de los árboles, permitiendo obtener la variabilidad de área foliar por especie y a nivel de paisaje, al ligarlo con variables detectadas por teledetección. Esto permitiría estimar la remoción de material particulado para áreas no medidas y entender como esta varía en el espacio y tiempo.

En el marco del GEF 5135 “Protegiendo Biodiversidad y Múltiples Servicios Ecosistémicos en Corredores Biológicos de Montaña en Ecosistemas Mediterráneos de Chile” (GEF Montaña en su nombre corto), iniciativa del Ministerio del Medio Ambiente y la agencia implementadora ONU Medio Ambiente, se ha financiado este estudio.

El Proyecto GEF Montaña, tiene dentro de sus objetivos cuantificar servicios ecosistémicos que otorga el bosque esclerófilo mediterráneo. Uno de ellos corresponde al potencial de remoción de material particulado que tiene el bosque nativo de la Región Metropolitana y Valparaíso costa en la purificación del aire. El presente estudio recopila las fuentes de información relacionados a esta línea de investigación, aplica una metodología de cálculo del servicio de purificación por depositación, por parte de cinco especies nativas del bosque esclerófilo, y entrega los resultados obtenidos producto del modelamiento realizado.





METODOLOGÍA

2

2.1 | ÁREA DE ESTUDIO

El área de estudio del proyecto comprende los ecosistemas de montaña de los ecosistemas Mediterráneos de Chile, la cual se enmarca dentro del área del Proyecto GEF Montaña que comprende 30 comunas del área Metropolitana y seis comunas de la región de Valparaíso (Figura 1).

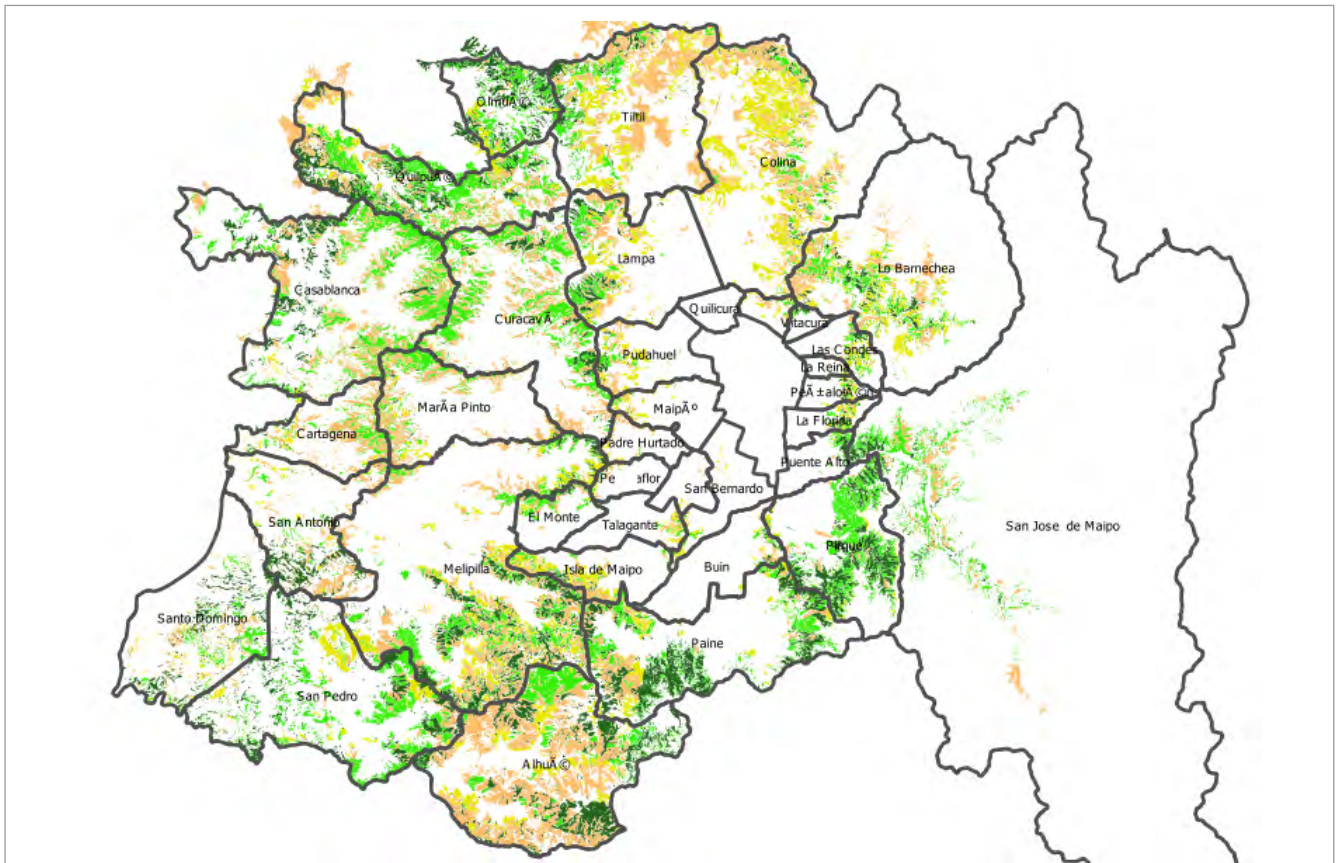


Figura 1 | Comunas consideradas en el área de estudio y bosque nativo de acuerdo a clases de cobertura.

■ Denso	■ Semidenso
■ Abierto	■ Muy Abierto

BOSQUE NATIVO					
Cobertura	Denso	Semidenso	Abierto	Muy abierto	Total General
Superficie (ha)	110,826	135,415	171,954	79,172	487,367
%	21	28	35	16	100

2.2 | SELECCIÓN DE PARCELAS DE MUESTREO

La selección de parcelas de muestreo se realizó en base a la información disponible en el “Proyecto Monitoreo de cambio, corrección cartográfica y actualización del Catastro de Bosque Nativo en las regiones de Valparaíso, Metropolitana y Libertador Bernardo O’Higgins” desarrollado por CIREN CONAF (2013).

En primer término, se han seleccionado los polígonos de vegetación que cumplen con la categoría de uso de suelo “Bosque Nativo”, situación que

se acordó al inicio de este proyecto. Dentro de este grupo, es posible identificar 4 categorías en función de la cobertura de la vegetación las cuales corresponden a: **Denso**, **Semidenso**, **Abierto** y **Muy Abierto**. La localización de estas categorías y sus superficies se presentan en la [Tabla 1](#).

En relación a las especies dominantes, en la [Tabla 1](#) y [Figura 2](#) se presenta un detalle de ellas para la categoría de cobertura de bosques estudiadas.

Especie dominante	Superficie (ha)	Superficie %
<i>Acacia caven</i>	75,654	15.52
<i>Austrocedrus chilensis</i>	76	0.02
<i>Baccharis linearis</i>	85	0.02
<i>Beilschmiedia miersii</i>	311	0.06
<i>Chusquea cumingii</i>	23,112	4.74
<i>Colliguaja odorifera</i>	25	0.01
<i>Cryptocarya alba</i>	78,631	16.13
<i>Escallonia myrtoidea</i>	25	0.01
<i>Jubaea chilensis</i>	12	0.00
<i>Kageneckia angustifolia</i>	5,213	1.07
<i>Kageneckia oblonga</i>	11,655	2.39
<i>Lithrea caustica</i>	80,451	16.51
<i>Nothofagus macrocarpa</i>	7,535	1.55
<i>Nothofagus obliqua</i>	758	0.16
<i>Peumus boldus</i>	60,184	12.35
<i>Quillaja saponaria</i>	123,527	25.35
<i>Schinus latifolius</i>	13,541	2.78
<i>Trevoa trinervis</i>	6,572	1.35
Total general	487,367	100.00

Tabla 1 | Especies dominantes y sus superficies representativa

En esta tabla destacan por su presencia dominante de acuerdo a su superficie *Acacia cavem*, *Cryptocarya alba*, *Lithrea caustica*, *Peumus boldus* y *Quillaja saponaria*. Su distribución en el área de estudio se presenta en la **Figura 2** donde destaca quillay por estar presente como especie dominante en el 25% de los polígonos con uso de suelo Bosque Nativo. A partir de esta información se seleccionaron 120 puntos para el estudio, las

cuales cumplirían con la condición de poseer un uso igual a “Bosque Nativo” con alguno de los 4 tipos de porcentaje de cobertura de suelo. Estos puntos fueron definidos en función de la disponibilidad de acceso a los predios de interés, lo cual fue gestionado directamente por personal del equipo GEF del Ministerio de Medio Ambiente. Finalmente, se realizaron 111 parcelas debido a la posibilidad de acceso a los predios donde se localizan las parcelas.

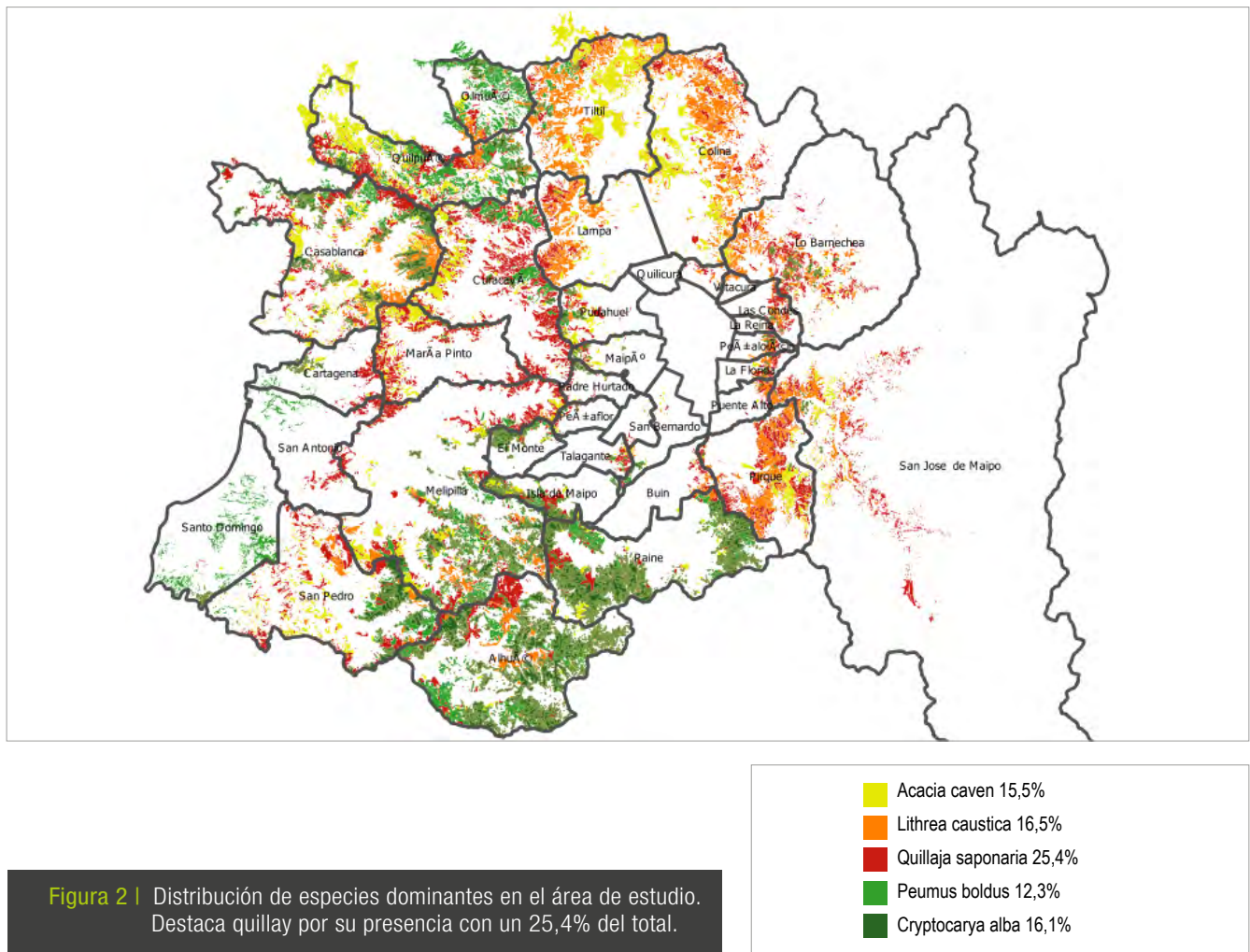


Figura 2 | Distribución de especies dominantes en el área de estudio. Destaca quillay por su presencia con un 25,4% del total.

2.3 | ESTIMACIÓN DEL ÁREA FOLIAR

La estimación del área foliar se realizó a dos escalas. A nivel de cobertura de bosque de acuerdo a las categorías de uso del “Proyecto Monitoreo de cambio, corrección cartográfica y actualización del Catastro de Bosque Nativo en las regiones de Valparaíso, Metropolitana y Libertador Bernardo O’Higgins” (CIREN CONAF 2013) y a nivel de especie considerando dentro de estas al quillay (*Quillaja saponaria*), litre (*Lithraea caustica*), espino (*Acacia caven*), peumo (*Cryptocarya alba*) y boldo (*Peumus boldus*). Todas ellas con alta representación en el bosque esclerófilo asociado al área de estudio.

Para la estimación a nivel cobertura de bosque se establecieron 111 parcelas de inventario forestal, de acuerdo a un muestreo estratificado al azar, siguiendo los protocolos definidos para el uso de la herramienta informática de medición forestal I-Tree Eco (Escobedo *et al.* 2008, <https://www.itree.org/eco/>). En vez de utilizar directamente esta herramienta informática, el presente estudio utilizó los modelos incluidos en el programa de manera de adaptar el modelo a la realidad de las especies locales a través de la estimación del índice de área foliar a nivel de parcelas y especies. El muestreo se estratificó de acuerdo a la cobertura de suelo y accesibilidad a este en terreno.

Se utilizaron parcelas circulares de 400 m², donde se registró las coordenadas en terreno del centro con GPS (sistema de coordenadas WGS 84, UTM 19S), obteniendo una precisión promedio de 3 m. Dentro de la parcela se midieron todos los árboles de las especies de interés mayores a 10 cm. de diámetro a la altura del pecho (DAP), establecien-

do además su estructura y composición. Como variables de estructura de cada parcela se incluyó: altura total de los árboles, DAP, diámetro de copa en direcciones N-S y E-O, altura de inicio de copa, condición copa (% de la copa cubierta por hojas) y número de estratos de vegetación de la parcela. Además, se registró la composición florística reconociendo las especies leñosas presentes en ella.

El índice de área foliar o LAI (Leaf Area Index por su sigla en inglés), se estimó utilizando un Ceptómetro “DECAGON ACCUPAR LP-80”. Este instrumento mide la radiación solar interceptada por el follaje la cual es transformada en valores de LAI (m² follaje/ m² superficie proyectada). La estimación del LAI se basa en medir la fracción debajo de la copa del árbol que no está tapada por hojas, estimando la probabilidad que un rayo de luz pase por la copa del árbol sin tocar algún elemento de la planta. Este instrumento aplica la ley de Beer-Lambert asumiendo que los elementos del follaje están distribuidos al azar y que el tamaño de la hoja es pequeño en comparación a la copa del árbol. Este tipo de instrumento es ampliamente utilizado para estimaciones de área foliar utilizando métodos no destructivos y efectivo para bosques con sotobosque.

Al llegar a cada una de las parcelas la primera medición que se realizó fue a campo abierto donde no existe cobertura de vegetación, de manera de tener una lectura que pudiese ser considerada como una lectura sobre la copa de los árboles. Después se realizaron lecturas independientes a nivel de parcela y para cada individuo presente y perteneciente a las cinco especies de interés.

En cada parcela se tomaron cinco mediciones:

a) 1 al centro y b) 4 a una distancia de 10 metros del centro en dirección cardinal Norte, Sur, Este, Oeste.

En todas las mediciones se siguió la metodología descrita por Bottalico *et al.* (2017). Todas las mediciones se ajustaron de acuerdo a la hora del día en que la medición fue realizada.

2.4 | MODELACIÓN DE LA DEPOSITACIÓN DE CONTAMINANTES

La depositación de material particulado se estimó siguiendo el protocolo utilizado en la herramienta UFORE (I-Tree Eco www.itreetools.org). El modelo UFORE calcula la remoción de material particulado basado en datos de temperatura, índice de área foliar y concentración de contaminantes. La depositación seca para PM₁₀ se calcula de acuerdo a las siguientes relaciones:

$$\begin{aligned}F &= V_d \times C \times 3600 \\F_{min} &= V_{d,min} \times C \times 3600 \\F_{max} &= V_{d,max} \times C \times 3600\end{aligned}$$

Donde:

F = Flujo de PM₁₀ ($\text{g m}^{-2} \text{h}^{-1}$)

V_d = Velocidad de depositación (m s^{-1})

C = Concentración del contaminante.

Los valores se llevaron al día multiplicando por 24 y se obtuvieron promedios mensuales, para los meses de invierno y verano.

Las concentraciones de los contaminantes se obtuvieron de las estaciones MACAM (<http://sinca.mma.gob.cl/>), para el periodo del 15 mayo del 2016 al 15 de mayo del 2017 para PM₁₀, y en el periodo de 1 de enero del 2016 al 31 de diciembre del 2016 para PM_{2,5}. Se incorporaron valores día de concentración de contaminantes y el modelo se corrió para la temporada de invierno

junio-agosto y la de verano diciembre-marzo. Se utilizó las estaciones más cercanas a las parcelas de muestreo para calcular el potencial de remoción del bosque nativo de la zona en estudio.

En la **Tabla 2** presenta la relación entre estaciones MACAM y sectores de localización de parcelas de muestreo.

Lugar de muestreo	Estación MACAM
Bosques Santiago	Independencia
Cerro El Roble	Pudahuel
El Monte	Talagante
El Panul	La Florida
Fundo San Luis de Pallocabe	Talagante
Laguna de Batuco	Pudahuel
Melipilla (Cementerio)	Talagante
Melipilla (Cuesta Ibacache)	Talagante
Melipilla (Culiprán)	Talagante
Melipilla (Popeta)	Talagante
Parque Natural Aguas de Ramón	Las Condes
Parque Natural Cantalao	La Florida
Parque Natural Farellones de Santa Elena	Independencia
Parque Natural Quebrada de Macul	La Florida
Parque Natural San Carlos de Apoquindo	Las Condes
Quebrada de la Plata	Cerrillos
Parque Nacional Río Clarillo	Puente Alto
San Juan de Piche	Talagante
Viña Tarapacá	Talagante
Viña Terramater	Talagante

Tabla 2 | Relación entre sectores de muestreo y estaciones MACAM utilizadas para el cálculo de PM₁₀ y PM_{2,5}.

Para el cálculo de la velocidad de depositación se siguió la metodología incluida en el UFORE que es detallada en Hibarayashi *et al.* (2014) la cual se describe a continuación:

$$V_d = V_{(d, PM_{10} \text{ avg})} \times \frac{LAI}{LAI_{PM_{10}}}$$

- $V_{d, PM_{10} \text{ avg}}$ = Velocidad de depositación promedio para PM_{10} (=0.0064 ms⁻¹) basada en Lovett 1994
 $V_{d, PM_{10} \text{ min}}$ = Velocidad de depositación mínima para PM_{10} (=0.0025 ms⁻¹) basada en Lovett 1994
 $V_{d, PM_{10} \text{ max}}$ = Velocidad de depositación máxima para PM_{10} (=0.01 ms⁻¹) basada en Lovett 1994
 $LAI_{PM_{10}}$ = Índice de área foliar para material particulado (El modelo asume un 6)
 LAI = Índice de área foliar de la especie o tipo forestal

Este procedimiento permite estimar la remoción del material particulado PM_{10} para cada una de las especies seleccionada y para el total de la parcela de muestreo. Se utiliza el índice de área foliar dado que este se encuentra relacionado con la depositación del material particulado, dado que determina la superficie disponible para la depositación (Grote *et al.* 2016).

El cálculo del material particulado $PM_{2,5}$ utiliza una aproximación similar, pero incorporando la re-suspensión del material debido a que el peso menor de las partículas es re-suspendido por el viento. Los valores de viento para el área de estudio se obtuvieron de la Dirección Meteorológica de Chile y del Aeropuerto Eulogio Sánchez (Aeropuerto Tobalaba). Esta estación contiene estadísticas de viento del año 2010, entregando velocidades promedio de viento que varían entre 1.5 y 2.5 m/s dependiendo de la época del año, durante los meses de invierno los valores son de 1.5 m/s

mientras que en temporada de primavera y verano los valores son de 2 m/s en promedio.

La velocidad de depositación del material particulado $PM_{2,5}$ se deriva de una recopilación de literatura donde se estiman las velocidades para 17 especies de árboles bajo velocidades de viento de 1, 3, 6, 8, 9 y 10 m/s, entregando valores de depositación por unidad de área foliar de acuerdo a la relación siguiente.

$$V_d = V_{(d, PM_{2,5})} \times LAI$$

El rango del potencial de depositación se calculó de acuerdo al error estándar que se obtuvo en estos estudios, bajo condiciones de viento de 3 m/s, de manera de evitar la subestimación de la remoción. Bajo este supuesto se ocupó velocidades de 0.152 m/s, donde el valor mínimo es de 0.018 m/s y el máximo de 0.442 m/s. Los cálculos de re-

suspensión de partículas derivan del trabajo realizado por Pulman (2009), de acuerdo a esto el porcentaje de re-suspensión del material equivale a 4.5% con variaciones en las velocidades de depositación que varían entre 0.00018 m/s a 0.0285 m/s, con un promedio de 0.015 m/s. Según todos los antecedentes antes descrito, el cálculo de $PM_{2,5}$ se realizó de la siguiente manera:

$$V_d = 0.152 \times LAI, \text{ para valores promedio}$$

$$V_{(d,min)} = 0.018 \times LAI, \text{ para establecer el límite mínimo}$$

$$V_{(d,max)} = 0.442 \times LAI, \text{ para establecer el límite máximo}$$

Para el cálculo del flujo es necesario incluir las tasas de re-suspensión de las partículas de acuerdo a los siguientes pasos:

Paso 1 durante periodos de no precipitación, los valores de flujo de $PM_{2,5}$ son acumulados en las hojas por hora con un porcentaje de estos re-suspendidos a la atmósfera de acuerdo al viento local

$$f_t = V_{(d,PM_{2,5,t})} \times C_t \times 3600$$

donde f_t es el flujo de $PM_{2,5}$ al tiempo t ($g/m^2/h$), $V_{(d,PM_{2,5,t})}$ proviene del cálculo anterior y para el caso del área de estudio como la variabilidad de viento es no significativa se mantendrá constante para todos los tiempos t (m/s), C_t es la concentración del contaminante en el tiempo t (g/m^3). Este cálculo se repite para las velocidades máximas y mínimas.

La cantidad de re-suspensión de $PM_{2,5}$ en el tiempo t se calcula como:

$$R_t = (A_{(t-1)} + f_t) \times \frac{rrt}{100}$$

donde R_t es el flujo de $PM_{2,5}$ re-suspendido a la atmósfera en el tiempo t ($g/m^2/h$), A_{t-1} él es $PM_{2,5}$ acumulado en las hojas en el tiempo t ($g/m^2/h$) que se calcula como $0.02 \times LAI$ (máxima capacidad de almacenamiento en las hojas, Hirabayashi 2012), rrt es la tasa de re-suspensión al tiempo t (%), para el caso del área de estudio este no varía. Este procedimiento se repite para los valores de flujo mínimos y máximos.

Finalmente, se recalcula el flujo de $PM_{2,5}$ de acuerdo a:

$$F_t = f_t - R_t$$

Este cálculo se realizó por hora, para el periodo de análisis ya descrito.

2.5 | CUANTIFICACIÓN DEL POTENCIAL DE DEPOSITACIÓN POR ESPECIE Y CUANTIFICACIÓN ESPACIAL DEL POTENCIAL DE REMOCIÓN DEL BOSQUE NATIVO

El cálculo de la capacidad de remoción de partículas PM₁₀ y PM_{2,5} se realizó para cada una de las coberturas de bosques presente en el área de estudio. Este se obtuvo a partir de los valores registrados en cada parcela, los cuales fueron imputados a cada polígono del catastro de vegetación, utilizando como criterios la cobertura de bosque y la mínima distancia euclidiana entre el centroide de cada polígono de vegetación y las parcelas de muestreo. Aproximaciones similares

se han realizado para la ciudad de Florencia (Italia, Bottalico *et al.* 2016) y Changchun (China, Ren *et al.* 2017). Para ambos casos se generaron mapas de salida a escala anual tanto para PM₁₀ como para PM_{2,5} (ver mapas anexos al informe).

Para definir la capacidad de depositación por especie se aplicó el procedimiento descrito en el punto anterior para cada uno de los individuos medidos en terreno, de manera de entender la variabilidad que existe a nivel de especie.

2.7 | MODELO GLOBAL DE ESTIMACIÓN DEL ÍNDICE DE ÁREA FOLIAR (LAI)

Por medio del uso del índice de vegetación de diferencias normalizadas (NDVI) obtenido a partir de una imagen satelital LANDSAT 8 y el valor de cobertura de la vegetación presente en la

cobertura del catastro de bosque nativo, se construyó un modelo de estimación del índice de área foliar (LAI) para el área de estudio de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$LAI = \beta_0 + \beta_1 NDVI_{pixel} + \beta_2 Cobertura + \varepsilon$$

Donde:

LAI	= Índice de Área Foliar a nivel de parcela como respuesta
NDVI _{pixel}	= Valor del índice de vegetación (NDVI) en un pixel de la imagen satelital LANDSAT
Cobertura	= Clase de cobertura para la vegetación según catastro nacional de bosque nativo
$\beta_0, \beta_1, \beta_2$	= Constantes a estimar para el modelo
ε	= Error

La construcción del modelo consideró un análisis estadístico exploratorio de los datos para analizar la estructura probabilística de la variable respuesta LAI y una aproximación de estimación de parámetros basada en modelos lineales generalizados (GLM).

Para medir la bondad del modelo se utilizó el criterio de información de Akaike (AIC), donde se buscó minimizar su valor de acuerdo a las variables de construcción del modelo. Además, como criterio alternativo se realizó un análisis visual de los residuales verificando que ellos presentaran una distribución homogénea en torno al valor cero en relación a los valores estimados de LAI.

Finalmente, utilizando los parámetros obtenidos para el modelo se generó una imagen en formato raster que representa la tendencia del LAI para toda el área de estudio.

2.8 | PROGRAMAS

La manipulación de datos y los cálculos fueron realizados utilizando los programas QGIS[®], R[®], RStudio[®] y Microsot Excel[®].







Resultados

3

3.1 | DATOS DE TERRENO

Se muestrearon 111 parcelas circulares de 400 m² y 234 individuos ubicadas dentro del área de estudio del proyecto bajo la cota 1.500 m. Estas se distribuyeron principalmente en parques privados de la Región Metropolitana. La distribución de las parcelas se detalla en la [Tabla 3](#) y en la [Figura 3](#).

Localización	Comuna	Número de Parcelas	Número de individuos	Arboles / ha
Parque Natural Aguas de Ramón	Las Condes/La Reina	6	14	595
Parque Natural San Carlos de Apoquindo	Las Condes	6	13	842
Parque Natural Cantalao	Peñalolén	6	16	950
El Panul	Peñalolén	6	14	517
Cerro El Roble	Tiltil	6	8	538
Comuna El Monte	El Monte	6	11	596
Parque Nacional Río Clarillo	Pirque	6	14	763
Parque Natural Quebrada de Macul	La Florida	6	19	771
Parque Natural Farellones de Santa Elena	Colina	7	18	361
Laguna de Batuco	Lampa	7	8	861
Viña Tarapacá	Isla de Maipo	7	16	686
Melipilla	Melipilla	8	11	413
Fundo San Luis de Pallocabe	María Pinto	7	17	600
Bosque Santiago	Huechuraba	7	9	225
Viña Terramater	Isla de Maipo	6	11	367
Fundo San Juan de Piche	Alhué	6	20	950
Quebrada de la Plata	Maipú	8	15	410

Tabla 3 | Sectores de muestreo considerados en el proyecto

COBERTURA DE BOSQUE Y LOCALIZACIÓN DE PARCELAS DE MUESTREO

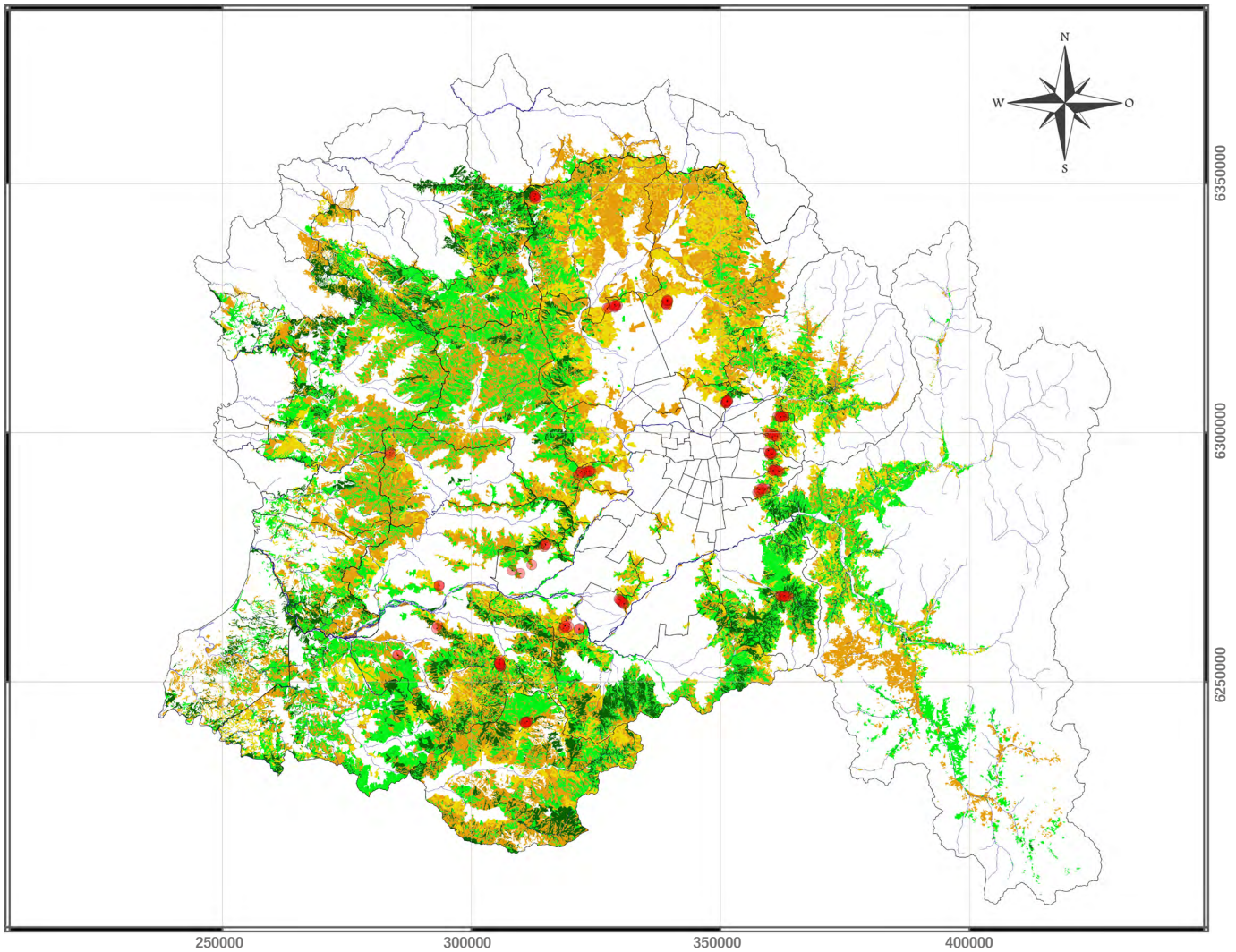


Figura 3 | Distribución de las parcelas de muestreo en el área de estudio de acuerdo a la cobertura de bosque.

<p>Simbología</p> <ul style="list-style-type: none"> ● Parcelas de muestreo — Drenajes □ Límites comunales 	<p>Coberturas (%)</p> <ul style="list-style-type: none"> ■ Muy Abierto ■ Abierto ■ Semidenso ■ Denso 	<p>Equipo de trabajo</p> <p>Marcelo Miranda Cynnamon Dobbs Magdalena Olave Ma del Pilar Olave</p>	<p>Datum WGS 84 19 Sur Escala 1: 410.000</p> <p>Fuente cartográfica Cobertura catastro de vegetación nativa CONAF</p>
---	---	--	---

La distribución de las parcelas de acuerdo a las coberturas distinguidas por el Catastro de la CONAF se detalla en la [Tabla 4](#).

Cobertura Catastro de Vegetación Nativa CONAF	Presencia en el área de estudio (%)	Número de parcelas
Abierto	35	36
Semi-denso	16	31
Denso	21	22
Muy Abierto	28	22

Tabla 4 | Parcelas de muestreo de acuerdo a la cobertura del catastro de bosque nativo de la CONAF.

Se muestreó un total de 234 individuos de las 5 especies dominantes en el área de estudio: *Acacia caven*, *Cryptocarya alba*, *Lithraea caustica*, *Peumus boldus* y *Quillaja saponaria*. El detalle de los individuos muestreados por especie se detalla en la [Tabla 5](#).

Especie	Presencia en el área de estudio (%)	Número de individuos
<i>Acacia caven</i>	15.5	66
<i>Cryptocarya alba</i>	16.1	41
<i>Lithraea caustica</i>	16.5	60
<i>Peumus boldus</i>	12.3	16
<i>Quillaja saponaria</i>	25.4	51

Tabla 5 | Individuos muestreados y su dominancia de acuerdo a la cobertura del Catastro de Bosque Nativo de la CONAF en el área de estudio.

De forma anexa se entregan los archivos en formato Excel con los detalles de los datos de terreno (*Datos individuos GEF Aire.xls* y *Datos parcela GEF Aire.xls*).

3.2.1 ESTRUCTURA Y COMPOSICIÓN DEL BOSQUE

Para efectos de la descripción del bosque en los puntos de muestreo se agruparon en 3 zonas que comparten características similares. Se clasificaron los puntos de acuerdo a su localización según unidades geomorfológicas definidas para Chile (Tabla 6). Se utilizaron estas unidades dado que tienen relación con las características de la vegetación presente en el área de estudio.

Localización	Comuna	Zonas
Parque Natural Aguas de Ramón	Las Condes/La Reina	Cordillera Andina
Parque Natural San Carlos de Apoquindo	Las Condes	Cordillera Andina
Parque Natural Cantalao	Peñalolén	Cuenca de Santiago
El Panul	Peñalolén	Cuenca de Santiago
Cerro El Roble	Tiltil	Cordillera de la Costa
Comuna El Monte	El Monte	Cordillera de la Costa
Parque Nacional Río Clarillo	Pirque	Cordillera Andina
Parque Natural Quebrada de Macul	La Florida	Cordillera Andina
Parque Natural Farellones de Santa Elena	Colina	Cuenca de Santiago
Laguna de Batuco	Lampa	Cuenca de Santiago
Viña Tarapacá	Isla de Maipo	Cuenca de Santiago
Melipilla	Melipilla	Cordillera de la Costa
Fundo San Luis de Pallocabe	María Pinto	Cordillera de la Costa
Bosque Santiago	Huechuraba	Cuenca de Santiago
Viña Terramater	Isla de Maipo	Cuenca de Santiago
Fundo San Juan de Piche	Alhué	Cordillera de la Costa
Quebrada de la Plata	Maipú	Cordillera de la Costa

Tabla 6 | Sectores de muestreo para análisis de estructura y composición del Bosque Esclerófilo.

3.2.1 | Bosque Denso

Se muestrearon 22 parcelas en bosque denso, las cuales presentaban las características de composición y estructura que se detallan en la [Tabla 7](#). De esta se puede desprender que la mayor cobertura arbórea se encontró en los sectores de la Cordillera de la Costa y la Cuenca de Santiago. La mayor densidad de árboles se encuentra en la Cuenca de Santiago y la menor densidad en la Cordillera de la Costa, indicando que es en este sector donde los árboles son de mayor tamaño. El índice de área foliar no es distinto entre las zonas de análisis, sin embargo, cabe destacar que la variación de este índice en la Cordillera de la Costa es mucho menor que en las otras zonas, nuevamente indicando que las condiciones del bosque en esta zona son más homogéneas.

En cuanto a la composición las parcelas de la Cordillera Andina el número de especies varían entre 2 y 5, donde las especies más frecuentes son:

Lithraea caustica, *Kageneckia oblonga*, *Quillaja saponaria* y *Cryptocarya alba* y en menor proporción *Acacia caven*. Las especies de arbustos presentes en esta cobertura boscosa son *Trevoa trinervis*, *Colliguaja odorífera*, *Baccharis linearis*, *Podanthus mitiqui*, *Escallonia pulverulenta*, *Trichocereus sp.*, *Cestrum palqui* y *Puya sp.* Cabe destacar que se encontró un individuo de *Porlieria chilensis*, especie en estado de conservación.

La Cuenca de Santiago tiene de 3 a 6 especies por parcela. Las especies de árboles más frecuentes incluyen *Lithraea caustica*, *Quillaja saponaria*, *Kageneckia oblonga* y *Acacia caven*. Además, se encontraron individuos de árboles en frecuencia de 1 correspondientes a: *Porlieria chilensis*, *Peumus boldus*, *Maytenus boaria* y *Cryptocarya alba*. En cuanto a los arbustos se encontraron *Trevoa trinervis*, *Colliguaja odorífera*, *Baccharis linearis*, *Podanthus mitiqui*, *Trichocereus chiloensis*, *Escallonia pulverulenta*, (en estado de conservación), y *Cestrum palqui*.

Zonas	Estratos	Cobertura (%)	Índice de Área Foliar	Número de árboles
Cordillera Andina	3	62.7 (±20.9)	2.8 (±1.5)	35
Cuenca de Santiago	3	73.6 (±15.7)	2.7 (±1.4)	43
Cordillera de la Costa	3	72.5 (±3.5)	2.5 (±0.4)	28

Tabla 7 | Caracterización de la estructura y composición de las parcelas de muestreo en Bosque Denso según ubicación en unidades geomorfológicas.

En la Cordillera de la Costa el número de especies por parcela varía entre 4 y 7. La especie más frecuente de árbol es *Lithraea caustica*, seguido por *Peumus boldus*, *Kageneckia oblonga* y *Quillaja saponaria*. Cabe destacar que la abundancia de árboles es mucho menor que para la Cordillera Andina. Las especies de arbustos presentes incluyen *Trevoa trinervis*, *Colliguaja odorifera*, *Baccharis linearis*, *Cestrum palqui* y *Escallonia pulverulenta*.

La [Tabla 8](#) muestra que los mayores DAP se observaron en las zonas de Cordillera Andina y Cuenca de Santiago; este valor en la Cordillera de la Costa es el menor y presenta menor variabilidad. Los mayores diámetros de copa se registraron en la Cordillera de la Costa y Cuenca de Santiago, indicando que los árboles con mayor biomasa disponible para depositación se encontrarían en este sector. Finalmente, las tres zonas presentan similares valores en altura de árbol, sanidad de la copa e índice de área de foliar.

3.2.2 | Bosque Semi-Denso

Se muestrearon 31 parcelas en la cobertura clasificada como bosque semi-denso, a continuación, se detallan las características de estructura y composición de acuerdo a su localización ([Tabla 9](#)). Similar a la cobertura anterior, el Índice de Área Foliar no es distinto entre las zonas para las parcelas, al igual que su variación disminuye al compararlo con las parcelas del bosque denso. La mayor densidad de árboles se presenta en la Cuenca de Santiago, mientras que la menor es para las parcelas de la Cordillera de la Costa, al presentar coberturas similares esto podría indicar que en la costa el tamaño de la copa de los individuos es mayor. La menor cobertura se presenta en la zona de la Cordillera Andina y la mayor variabilidad ocurre en la Cuenca de Santiago.

En cuanto a la composición las parcelas de la Cordillera Andina el número de especies varía entre 3 y 4, donde las especies más frecuentes son:

Zonas	DAP (cm)	Altura (m)	Diametro de copa (m)	Copa completa (%)	Índice de Área Foliar
Cordillera Andina	20.1 (±12.1)	10.2 (±4.6)	6.4 (±2.2)	51.8 (±15.7)	3.7 (±1.7)
Cuenca de Santiago	20.6 (±18.3)	8.8 (±2.8)	7.4 (±2.6)	59.7 (±16.4)	4 (±1.9)
Cordillera de la Costa	16.3 (±6.8)	9.8 (±4.4)	8 (±4.1)	52.5 (±24)	4.1 (±2)

Tabla 8 | Caracterización de las dimensiones de los individuos muestreados en bosque denso según su ubicación en unidades geomorfológicas.

Zonas	Estratos	Cobertura (%)	Índice de Área Foliar	Número de árboles
Cordillera Andina	3	44.2 (±20.4)	1.7 (±1.1)	32
Cuenca de Santiago	3	50.7 (±29.2)	1.8 (±1.4)	37
Cordillera de la Costa	3	48.9 (±22.3)	1.5 (±1.1)	25

Tabla 9 | Caracterización de la estructura y composición de las parcelas de muestreo en Bosque Semi-denso según ubicación en unidades geomorfológicas.

Lithraea caustica y *Quillaja saponaria*; y en menor proporción la *Kageneckia oblonga*, *Acacia caven* y *Cryptocarya alba*. Las especies de arbustos presentes en esta cobertura boscosa son *Colliguaja odorifera* y *Azara celastrina*.

La Cuenca de Santiago tiene de 1 a 5 especies por parcela. Las especies de árboles más frecuentes incluyen *Lithraea caustica*, *Quillaja saponaria* y *Acacia caven*. Además, se encontraron individuos de árboles en frecuencia de 1 correspondientes a: *Peumus boldus*, *Maytenus boaria* y *Kageneckia*

oblonga. En cuanto a los arbustos se encontraron *Trevoa trinervis*, *Colliguaja odorifera*, *Baccharis linearis* y *Cestrum palqui*.

En la Cordillera de la Costa el número de especies por parcela varía entre 3 y 10. Las especies más frecuentes de árboles son *Lithraea caustica*, *Quillaja saponaria* y *Acacia caven* y en menor frecuencia *Peumus boldus*, *Kageneckia oblonga* y *Cryptocarya alba*. Las especies de arbustos presentes incluyen *Trevoa trinervis*, *Baccharis linearis*, *Colliguaja odorifera*, *Trichocereus chiloensis*

Zonas	DAP (cm)	Altura (m)	Diametro de copa (m)	Copa completa (%)	Índice de Área Foliar
Cordillera Andina	22.7 (±15)	8.7 (±3.8)	7 (±1.5)	50.8 (±20)	2.8 (±1.6)
Cuenca de Santiago	16.3 (±7.4)	7.5 (±2.7)	7 (±2.1)	55.4 (±22.6)	3.6 (±1.6)
Cordillera de la Costa	16 (±5.6)	7.8 (±2.6)	6.6 (±2.1)	51.5 (±15.6)	2.8 (±1.1)

Tabla 10 | Caracterización de las dimensiones de los individuos muestreados en bosque semi-denso según su ubicación en unidades geomorfológicas.

(en estado de conservación), *Proustia pyrifolia*, *Podanthus nitiqui*, *Puya sp.*, *Lobelia tupa* y *Cestrum palqui*.

En la [Tabla 10](#) se observa que los árboles con mayores dimensiones fueron registrados en la Cordillera Andina. El tamaño de la copa es similar para las tres zonas. Los mayores valores para copa completa e índice de área foliar se presentaron en la Cuenca de Santiago.

3.2.3 | Bosque Abierto

Se muestrearon 36 parcelas en la cobertura clasificada como bosque abierto, a continuación, se detallan las características de estructura y composición de acuerdo a su localización. La Cordillera Andina presenta casi la mitad de la cobertura arbórea que las otras zonas y el menor valor para el índice de área foliar. Las densidades más altas de árboles ocurren en los bosques de la Cordillera de la Costa ([Tabla 11](#)). La composición las parcelas de la Cordillera Andina en el bosque

abierto varía entre 3 y 6 el número de especies. Las especies de árboles más frecuentes son: *Lithraea caustica* y *Acacia caven*, y en menor frecuencia *Kageneckia oblonga* y *Quillaja saponaria*. Las especies de arbustos presentes en esta cobertura son *Trevoa trinervis*, *Colliguaja odorifera*, *Baccharis linearis* y *Cestrum palqui*.

La Cuenca de Santiago tiene de 3 a 7 especies por parcela. Las especies de árboles más frecuentes incluyen *Lithraea caustica*, *Porlieria chilensis* (en estado de conservación) y *Acacia caven*. Además, se encontraron individuos de árboles en menor frecuencia: *Cryptocarya alba*, *Peumus boldus*, *Quillaja saponaria*, *Prosopis chilensis* (en estado de conservación) y *Kageneckia oblonga*. En cuanto a los arbustos se encontraron *Trevoa trinervis*, *Colliguaja odorifera*, *Proustia pyrifolia*, *Baccharis linearis*, *Podanthus mitiqui*, *Puya sp.*, *Trichocereus chiloensis* (en estado de conservación), *Trevoa quinquinervia*, *Baccharis sp.*

En la Cordillera de la Costa el número de especies por parcela varía entre 2 y 8. Las especies

Zonas	Estratos	Cobertura (%)	Índice de Área Foliar	Número de árboles
Cordillera Andina	3	22.5 (±11.9)	0.6 (±0.4)	15
Cuenca de Santiago	3	40.6 (±19.1)	0.8 (±0.7)	16
Cordillera de la Costa	3	40 (±21.7)	1 (±0.9)	21

Tabla 11 | Caracterización de la estructura y composición de las parcelas de muestreo en Bosque Abierto según ubicación en unidades geomorfológicas.

más frecuentes de árboles son *Lithraea caustica*, *Quillaja saponaria* y *Acacia caven* y en menor frecuencia *Cryptocarya alba*, *Kageneckia oblonga*, *Prosopis chilensis* (especie en estado de conservación) y *Persea lingue*. Las especies de arbustos presentes incluyen *Trevoa trinervis*, *Colliguaja odorifera*, *Baccharis linearis*, *Azara petiolaris*, *Eupatorium salvium*, *Trevoa quinquinervia*, *Trichocereus chiloensis* (En estado de conservación), *Schinus polygamus*, *Puya sp.*, *Podanthus mitiqui* y *Cestrum palqui*.

De acuerdo a la [Tabla 12](#) la Cordillera Andina presenta árboles de mayor diámetro que en las otras zonas, sin embargo, presentan la variabilidad mayor. En cuanto a la altura del árbol, la Cuenca de Santiago y Cordillera de la Costa son las que presentaron los valores más altos. Los diámetros de copa son similares para las tres zonas, al igual que los porcentajes de copa completa. Mayores diferencias se producen con el índice de área foliar, donde los individuos ubicados en la Cordillera de la Costa son los que presentan un valor mayor y una variabilidad menor.

3.2.4 | Bosque Muy Abierto

Se muestrearon 22 parcelas en la cobertura clasificada como bosque muy abierto, a continuación, se detallan las características de estructura y composición de acuerdo a su localización. La mayor cobertura se encuentra en las parcelas de la Cordillera de la Costa, siendo casi el doble que en las otras zonas. Similares resultados se obtienen para el índice de área foliar, donde el valor para la Cordillera Andina es mucho menor que las otras zonas. La densidad del bosque para las tres zonas de análisis es similar ([Tabla 13](#)).

La composición de la parcela de la cordillera andina en el bosque muy abierto es de 5 especies. El árbol más frecuente es *Lithraea caustica* y las especies de arbustos que lo acompañan son *Colliguaja odorifera*, *Baccharis linearis* y *Puya sp.* y *Podanthus mitiqui*.

La Cuenca de Santiago tiene de 1 a 8 especies por parcela. Las especies de árboles más frecuentes incluyen *Lithraea caustica*, *Acacia caven* y *Peumus boldus*. Además, se encontraron individuos de árboles en menor frecuencia: *Cryptocarya alba*,

Zonas	DAP (cm)	Altura (m)	Diametro de copa (m)	Copa completa (%)	Índice de Área Foliar
Cordillera Andina	20.3 (±12)	6.2 (±1.3)	7.1 (±1.4)	54.4 (±14.5)	1 (±0.7)
Cuenca de Santiago	14.8 (±5)	7 (±3.6)	6.7 (±2.4)	58 (±21.6)	2.8 (±1.9)
Cordillera de la Costa	15.4 (±7.4)	6.8 (±2.9)	6.2 (±2.3)	57.1 (±19.5)	3.5 (±1.5)

Tabla 12 | Caracterización de las dimensiones de los individuos muestreados en bosque abierto según su ubicación en unidades geomorfológicas.

Zonas	Estratos	Cobertura (%)	Índice de Área Foliar	Número de árboles
Cordillera Andina	3	20 (NA)	0.006 (NA)	12
Cuenca de Santiago	3	25.9 (\pm 13.6)	0.4 (\pm 0.4)	14
Cordillera de la Costa	3	40 (\pm 24.7)	1.4 (\pm 1.3)	17

Tabla 13 | Caracterización de la estructura y composición de las parcelas de muestreo en Bosque Muy Abierto según ubicación en unidades geomorfológicas.

Quillaja saponaria, *Porlieria chilensis* (en estado de conservación), y *Kageneckia oblonga*.

En cuanto a los arbustos se encontraron *Trevoa trinervis*, *Colliguaja odorifera*, *Proustia pyrifolia*, *Baccharis linearis*, *Podanthus mitiqui*, *Trichocereus chilensis* (en estado de conservación) y *Puya sp.*

En la Cordillera de la Costa el número de especies por parcela varía entre 4 y 7. La especie más frecuente de árboles son *Lithraea caustica* y *Quillaja saponaria* y en menor frecuencia *Cryptocarya alba*, *Kageneckia oblonga*, *Schinus latifolius* y *Acacia caven*. Las especies de arbustos

presentes incluyen *Trevoa trinervis*, *Puya sp.*, *Schinus polygamus*, *Colliguaja odorifera*, *Baccharis linearis*, *Azara petiolaris*, *Eupatorium salvium*, *Podanthus mitiqui* y *Cestrum palqui*.

En la **Tabla 14** se observa que los valores de DAP, altura, diámetro de copa, porcentaje de copa completa e índice de área foliar, son los mayores en los puntos muestreados de la Cordillera de la Costa, y son estos también los que presentan mayor variabilidad en las dimensiones de los árboles. Los menores valores para las variables descritas anteriormente corresponden a la zona de Cordillera Andina.

Zonas	DAP (cm)	Altura (m)	Diámetro de copa (m)	Copa completa (%)	Índice de Área Foliar
Cordillera Andina	14.4 (\pm 0.8)	4.6 (\pm 1.6)	5.4 (\pm 0.3)	32.5 (\pm 3.5)	0.9 (\pm 1)
Cuenca de Santiago	14.8 (\pm 4.5)	5.8 (\pm 2.8)	6.4 (\pm 2.1)	58.9 (\pm 17.7)	2.2 (\pm 1.3)
Cordillera de la Costa	21 (\pm 22.1)	8.8 (\pm 4.3)	7.2 (\pm 3.2)	62.5 (\pm 13.6)	3.8 (\pm 2.3)

Tabla 14 | Caracterización de las dimensiones de los individuos muestreados en bosque muy abierto según su ubicación en unidades geomorfológicas.

3.3 | DEPOSITACIÓN DE PM₁₀

3.3.1 | Depositación de PM₁₀ por el bosque a partir de los datos a nivel de parcela.

El cálculo de la depositación de material particulado PM₁₀ por parcela se realizó en base a los resultados obtenidos de área foliar. Esta área foliar se ingresó como dato alimentador del modelo I-Tree Eco. A continuación, se detallan los resultados y la estación MACAM que se utilizó para el lugar de muestreo de acuerdo a su cercanía con la estación. El periodo de análisis de acuerdo a la disponibilidad de registros validados para este contaminante es del 15 de mayo del 2016 al 15 de mayo del 2017. Se entrega un archivo con el detalle de los resultados por parcela (*PM₁₀ Parcelas.xls*). El mapa se obtuvo de la imputación directa del resultado de las parcelas de terreno según el método del vecino mas cercano, según tipo de bosque. Esto permite incluir la variabilidad encontrada dentro del área de estudio. Se construyeron dos mapas, el primero (Figura 4) incluyó todo el área del proyecto GEF Corredores de montaña y el segundo pone un límite de 20 km desde cada punto de muestreo dada la movilidad del material particulado (Figura 5).

De acuerdo a los resultados, los valores más altos de la depositación se encuentran en el área de la Cordillera Andina y la Cordillera de la Costa. Las áreas ubicadas hacia los valles presentan menor nivel de depositación (Tabla 15, Figuras 4, 5).

3.3.2 | Depositación de PM₁₀ por formación vegetacional

La Tabla 16 muestra la depositación de PM₁₀ por tipo de formación vegetacional y su LAI asociado. Se puede observar que el LAI varía de forma decreciente desde la formación densa a muy abierta. La formación vegetacional muy abierta presenta los mismos valores que la formación abierta, sin embargo, la variabilidad entre sectores es mucho mayor. Los valores más altos se encuentran hacia el lado este y sur. Dentro de la formación abierta el LAI mayor se encuentra en las parcelas de la zona sur, mientras que el menor en el sector norte. La mayor variabilidad en el LAI de esta formación es en el sector sur. La formación semidenso presenta un mayor LAI en la zona norte, probablemente influenciado por el valor encontrado en el Cerro El Roble, mientras que para los otros sectores tanto el LAI promedio como la variabilidad es similar. En el caso del bosque denso, no se pudo incluir esta formación en el sector oeste, dada la restricción de permisos. El mayor LAI promedio está en la zona norte, determinada por los valores del Cerro El Roble, mientras que el este y sur tienen valores similares, aunque el este presenta mayor variabilidad en el LAI.

En cuanto a la depositación de PM₁₀, las tendencias son similares al LAI. El bosque muy abierto, presenta las mayores depositaciones en las secciones este y sur de la región, con más del doble de la depositación de los otros sectores, y la zona oeste es la que presenta la menor variabilidad en cuanto a las parcelas muestreadas. La cobertura de bosque abierto presenta los mayores valores

Lugar de muestreo	Índice de área foliar promedio por parcela	Depositación anual promedio por parcela (g)	Depositación anual promedio (g/ m ²)
Bosques Santiago	0.435 (±0.5)	384.47	0.96
Cerro El Roble	0.743 (±0.4)	627.67	1.56
El Monte	1.397 (±0.8)	957.54	2.40
El Panul	1.588 (±1.5)	986.21	2.47
Fundo San Luis de Pallocabe	2.242 (±0.9)	1662.65	4.16
Laguna de Batuco	1.696 (±2)	1499.28	3.75
Melipilla (Cementerio)	0.491 (±0.05)	336.54	0.84
Melipilla (Cuesta Ibacache)	0.665 (±0.02)	455.81	1.14
Melipilla (Culiprán)	0.477 (±0.1)	326.94	0.82
Melipilla (Popeta)	0.384 (±0.2)	263.21	0.66
Parque Natural Aguas de Ramón	1.665 (±1.9)	1034.03	2.59
Parque Natural Cantalao	1.122 (±0.9)	696.87	1.74
Parque Natural Farellones de Santa Elena	0.412 (±0.4)	364.78	0.91
Parque Natural Quebrada de Macul	2.172 (±1.5)	1349.04	3.37
Parque Natural San Carlos de Apoquindo	1.704 (±1.3)	1058.03	2.65
Quebrada de la Plata	1.0835 (±1.1)	915.32	2.28
Parque Nacional Río Clarillo	2.606 (±1.7)	2042.37	5.60
San Juan de Piche	2.512 (±0.9)	1721.79	4.30
Viña Tarapacá	1.503 (±1.1)	1030.49	2.58
Viña Terramater	1.034 (±0.9)	709.19	1.77

Tabla 15 | Depositación promedio anual de PM₁₀ por parcela y su índice de área foliar promedio de acuerdo al sector de muestreo y la estación utilizada para el cálculo.

de depositación en la sección oeste y sur, siendo también las de mayor variabilidad. El bosque semidenso presenta más del doble de potencial de depositación que las anteriores formaciones, similar entre todos los sectores, y el doble del

valor en la zona norte, también por efecto de las parcelas hechas en el Cerro El Roble.

El bosque denso presenta valores similares al semidenso, con valores de más del doble para la zona norte.

DEPOSITACIÓN PM₁₀ EN LA VEGETACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO SEGÚN COBERTURA

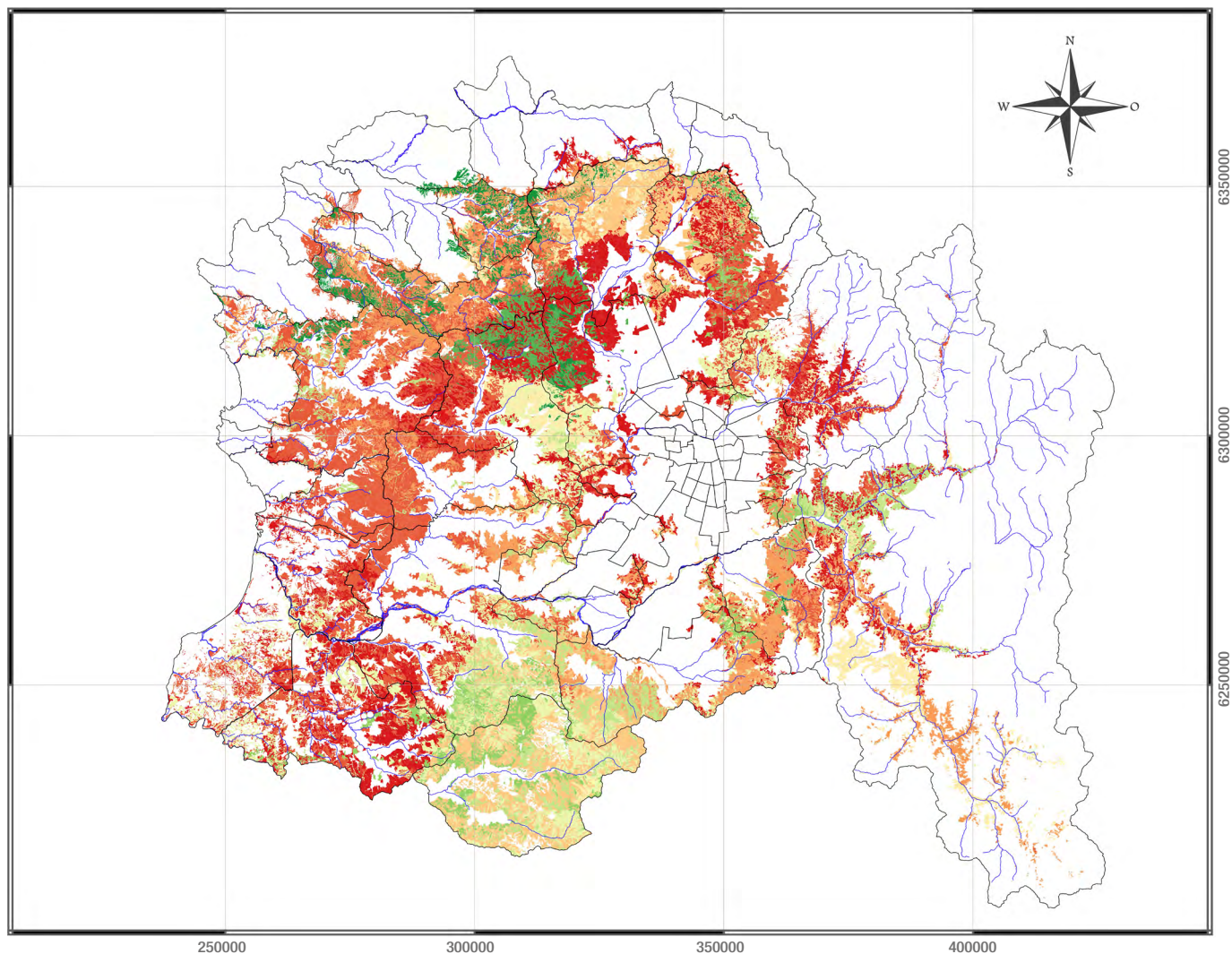


Figura 4 | Deposición PM₁₀ en la vegetación del área de estudio según cobertura de acuerdo las coberturas de bosque del Catastro de Vegetación de bosque Nativo CIREN CONAF 2013.



DEPOSITACIÓN PM₁₀ EN LA VEGETACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO SEGÚN COBERTURA, ENCONTRADA A MENOS DE 20KM DE LAS PARCELAS DE MUESTREO

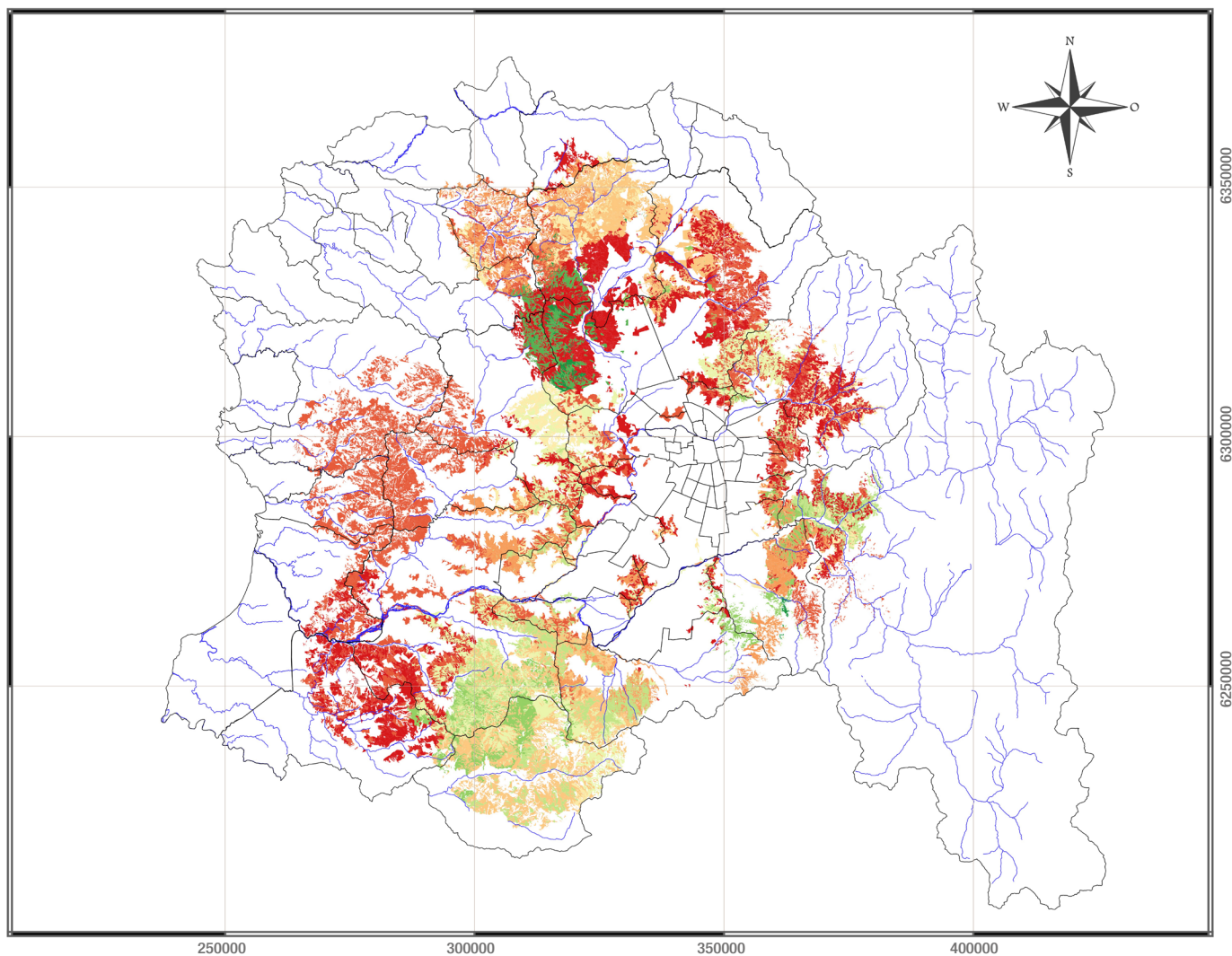


Figura 5 | Deposición de PM₁₀ en la vegetación en el área de estudio para coberturas del Catastro de Vegetación de bosque Nativo CIREN CONAF 2013 encontradas a menos de 20 km de las parcelas de muestreo.



Cobertura/Sector	LAI Promedio	Desv.Std. LAI	Deposición anual PM ₁₀ promedio (g/año/ha)	Desv. Std. Deposición anual PM ₁₀ (g/año/ha)
Abierto	0.8	0.8	1511.9	1344.8
Este	0.5	0.4	833.3	558.3
Norte	0.4	0.3	955.1	754.0
Oeste	0.8	0.8	1675.1	1729.7
Sur	1.3	0.9	2188.1	1602.9
Denso	2.4	1.5	4243.3	2876.5
Este	2.3	1.6	3874.5	2835.7
Norte	4.5	0	10037.3	0
Sur	2.6	0.4	4525.0	631.2
Muy abierto	0.8	0.9	1557.0	1631.3
Este	1.4	1.0	2151.5	1577.4
Norte	0.4	0.6	951.9	1229.2
Oeste	0.5	0.2	975.4	268.4
Sur	1.2	1.2	2363.0	2240.5
Semidenso	1.8	1.3	3142.1	2350.0
Este	1.8	1.4	2776.2	2229.0
Norte	2.5	1.6	5597.3	3537.1
Oeste	1.3	1.3	2721.9	2833.9
Sur	1.8	1.1	3001.2	1928.3

Tabla 16 | Deposición promedio anual de PM₁₀ por formación vegetal, de acuerdo a los datos de las parcelas muestreadas por sector de estudio y su índice de área foliar promedio de acuerdo al sector de muestreo y la estación utilizada para el cálculo.

3.3.3 | Deposición de PM₁₀ por especies

De la misma manera se realizó el análisis de depositación de PM₁₀ a nivel de especie. Para esto, se realizaron 4 mediciones de área foliar por

individuo y se calculó los valores del I-Tree Eco para este tipo de partícula. Las **Tablas 17 y 18** presentan la depositación por especie a escala de m² y de individuo.

Especie	N°	Depositación promedio por m ² (g/año)	Desv. std. depositación por m ² (g/año)	Máximo depositación por m ² (g/año)	Mínimo depositación por m ² (g/año)
<i>Acacia caven</i>	54	3.8	2.3	10.8	0.24
<i>Cryptocarya alba</i>	41	7.2	2.2	12.2	2.9
<i>Lithraea caustica</i>	55	5.6	2.9	11.3	0.2
<i>Peumus boldus</i>	16	8.7	3.1	14.5	3
<i>Quillaja saponaria</i>	50	5.4	3.3	15.5	0.1

Tabla 17 | Depositación PM₁₀ por metro cuadrado de individuo de cada especie.

Especie	N°	Depositación promedio por árbol (g/año)	Desv. std. depositación por árbol (g/año)	Máximo depositación por árbol (g/año)	Mínimo depositación por árbol (g/año)
<i>Acacia caven</i>	54	129.7	111.8	521.2	4.5
<i>Cryptocarya alba</i>	41	324.3	263.7	1008	46.2
<i>Lithraea caustica</i>	55	340.9	313.7	1920	9.7
<i>Peumus boldus</i>	16	524.1	487.4	2107.8	80.2
<i>Quillaja saponaria</i>	50	401.2	576.6	3042	5.3

Tabla 18 | Depositación PM₁₀ por individuo total de cada especie.

Cabe destacar que las especies de ambientes más xerofitos presentan depositaciones menores que las especies de ambientes higrófilos. Es así como el peumo y el boldo son los que presentan mayores tasas de depositación por metro cuadrado. Las máximas tasas de depositación ocurren

para el boldo y el quillay (Tabla 17). En cuanto a la depositación por árbol los resultados varían, siendo las tasas de depositación mayores para el boldo y quillay, pudiendo ser un reflejo que estos árboles alcanzan mayores tamaños y por ende más superficie foliar (Tabla 18).

3.4 | DEPOSITACIÓN DE PM 2,5

3.4.1 | Depositación de PM_{2,5} por el bosque a partir de los datos a nivel de parcela.

El periodo de análisis para el PM_{2,5}, de acuerdo a la disponibilidad de registros validados para este contaminante, fue desde el 1 enero del 2016 al 31 de diciembre del 2016. Para el cálculo de la depositación es necesario incorporar la variable de magnitud de la velocidad del viento de manera de incluir las perturbaciones por re-suspensión de las partículas. Para este informe el cálculo se realizó en base a los datos de viento obtenidos de las estaciones MACAM. A continuación, se detallan las estadísticas de base para el viento en cada una de las estaciones de análisis (Tabla 19).

El flujo para el PM_{2,5} se calcula como la diferencia entre el flujo basado en la concentración de contaminantes menos el flujo que es re-suspendido. Si este flujo da negativo al ser la re-suspensión mayor al flujo depositado basado en la concentración del contaminante entonces la depositación neta se asume con valor cero. Al realizar este cálculo resultaron 21 parcelas con valor cero para la situación con ventilación (Tabla 20 y Figuras 6,7,8,9).

3.4.2 | Depositación de PM_{2,5} por el bosque de acuerdo a formación vegetacional.

De acuerdo con los resultados de la Tabla 21 se observa que el bosque denso es el de mayor potencial de remoción y siguen en un gradiente descendente de cobertura para las otras

Estación	Mediana diaria de viento (m/s)	Mínimo diario de viento (m/s)	Máximo diario de viento (m/s)	Desviación estándar (m/s)	Re-suspensión basado en viento máximo (%) *
Las Condes	4.1	0	20	2.5	23
La Florida	0.48	0	4	0.7	6
Puente Alto	1.1	0	7	1.3	10
Talagante	0.55	0	4	0.8	6
Independencia	0.49	0	3	0.6	4.5
Pudahuel	0.97	0	5	1.1	7.5

Tabla 19 | Estadísticas base para la velocidad del viento diaria de las estaciones MACAM utilizadas para el presente estudio.

*De acuerdo a protocolo de cálculo de I-Tree Eco (Hirabayashi et al. 2014).

Lugar de muestreo	Índice de Área Foliar	Depositación anual por parcela con ventilación (g)	Depositación anual por parcela sin ventilación (g)	Depositación anual con ventilación (g/m ²)
Bosques Santiago	0.435 (±0.5)	160.8	238.8	0.40
Cerro El Roble	0.743 (±0.4)	318.9	451.4	0.79
El Monte	1.397 (±0.8)	520.5	648.6	1.30
El Panul	1.588 (±1.5)	737.6	880.6	1.84
Fundo San Luis de Pallocabe	2.242 (±0.9)	857.9	1126.3	2.14
Laguna de Batuco	1.696 (±2)	805.9	931.5	2.01
Melipilla (Cementerio)	0.491 (±0.05)	116.5	227.9	0.29
Melipilla (Cuesta Ibacache)	0.665 (±0.02)	133.6	308.8	0.33
Melipilla (Culiprán)	0.477 (±0.1)	50.8	221.5	0.13
Melipilla (Popeta)	0.384 (±0.2)	30.9	178.3	0.07
Parque Natural Aguas de Ramón	1.665 (±1.9)	438.7	823.5	1.09
Parque Natural Cantalao	1.122 (±0.9)	319.1	622.3	0.79
Parque Natural Farellones de Santa Elena	0.412 (±0.4)	173.3	226.6	0.43
Parque Natural Quebrada de Macul	2.172 (±1.5)	1021.9	1204.6	2.55
Parque Natural San Carlos de Apoquindo	1.704 (±1.3)	345.2	842.6	0.86
Quebrada de la Plata	1.0835 (±1.1)	518.4	658.3	1.30
Parque Nacional Río Clarillo	2.606 (±1.7)	1020.2	1280.1	2.56
San Juan de Piche	2.512 (±0.9)	957.6	1166.3	2.39
Viña Tarapacá	1.503 (±1.1)	487.5	698	1.22
Viña Terramater	1.034 (±0.9)	347.1	480.4	0.87

Tabla 20 | Depositación promedio anual de PM_{2,5} y su índice de área foliar promedio de acuerdo al sector de muestreo, para la situación con ventilación (viento) y sin ventilación.

formaciones. El bosque muy abierto presenta la mayor depositación en la sección norte y sur, mientras que el bosque abierto el sur y oeste son los con mayor potencial de depositación. El bosque semidenso presenta mayor depositación en la zona norte, mientras las otras áreas presentan valores similares. Similar patrón sigue el bosque

denso donde la zona norte deposita el doble que las otras zonas. A partir de estos datos se construyo un mapa de depositación de PM_{2,5} según formación vegetacional utilizando la misma metodología de imputación directa descrita para PM₁₀, tanto para la situación sin ventilación (Figura 6 y 8) como con ventilación (Figura 7 y 9).

Cobertura / Sector	LAI Promedio	Desv.Std. LAI	Depositación anual PM _{2,5} promedio (g/año/ha) con viento	Desv. Std. Depositación anual PM _{2,5} (g/año/ha) con viento	Depositación anual PM _{2,5} promedio (g/año/ha) sin viento
Abierto	0.8	0.8	646.2	805.2	1037.6
Este	0.5	0.4	213.3	234.1	674.8
Norte	0.4	0.3	379.4	461.7	629.3
Oeste	0.8	0.8	743.9	1094.6	1189.2
Sur	1.3	0.9	1002.2	990.1	1482.2
Denso	2.4	1.5	2278.3	1717.4	3077.9
Este	2.3	1.6	2052.3	1697	2904.7
Norte	4.5	0	5659.9	0	6236.2
Sur	2.6	0.4	2506.7	484.3	3065.1
Muy abierto	0.8	0.9	726.4	944.1	1103.4
Este	1.4	1.0	1094.9	878.8	1776.6
Norte	0.4	0.6	474.6	717.7	620.9
Oeste	0.5	0.2	218.5	309	677.2
Sur	1.2	1.2	1069.6	1361.6	1600.7
Semidenso	1.8	1.3	1811.2	1625.5	2286.6
Este	1.8	1.4	1761.6	1952.5	2448.9
Norte	2.5	1.6	3132.2	1976.2	3531.2
Oeste	1.3	1.3	1673.3	1912	1957.7
Sur	1.8	1.1	1609.1	1253	2031.9

Tabla 21 | Depositación promedio anual de PM_{2,5} por formación vegetacional, de acuerdo a los datos de las parcelas muestreadas por sector de estudio y su índice de área foliar promedio de acuerdo al sector de muestreo y la estación utilizada para el cálculo.

DEPOSITACIÓN PM_{2,5} EN LA VEGETACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO SEGÚN COBERTURA, PARA SITUACIÓN SIN VENTILACIÓN

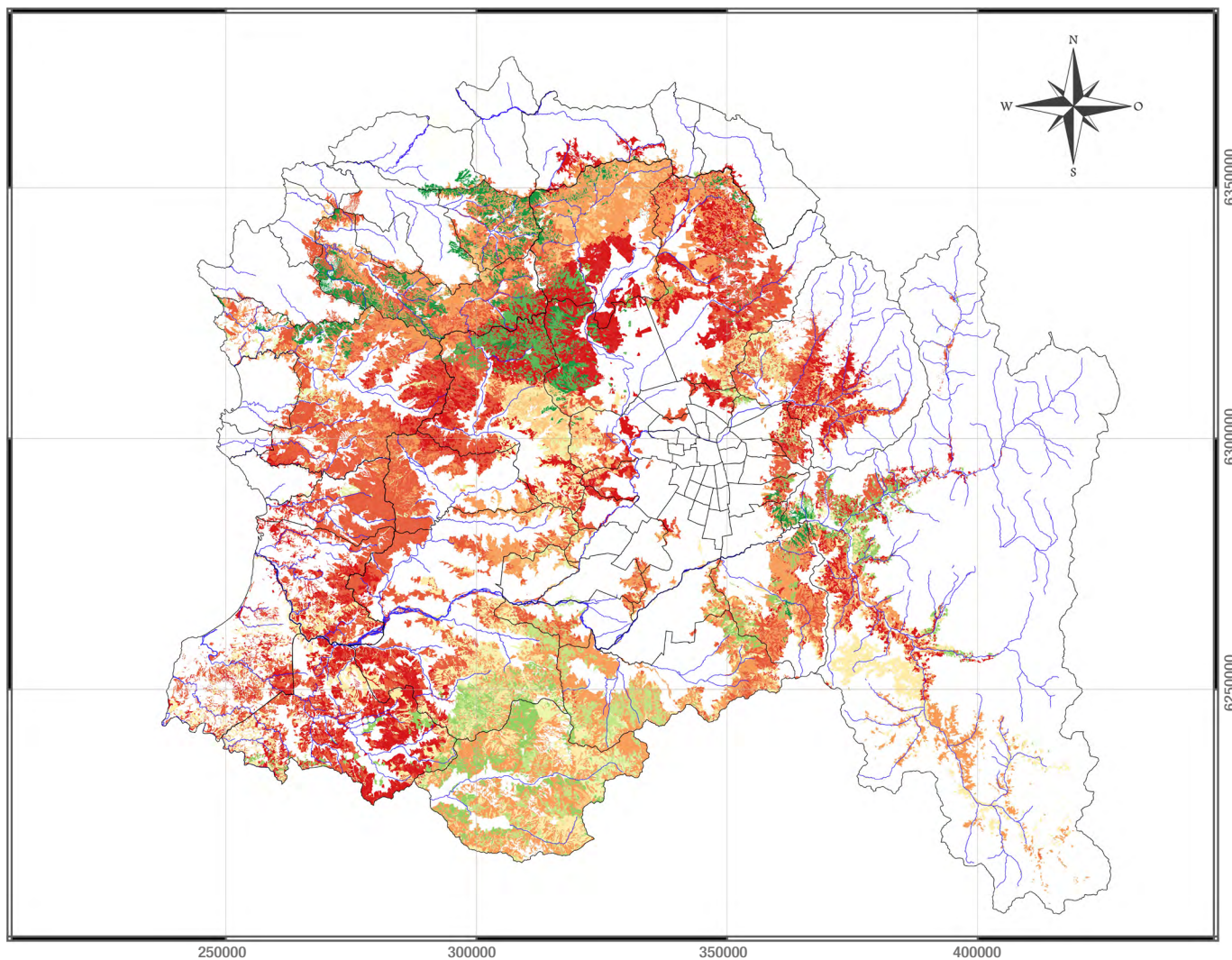
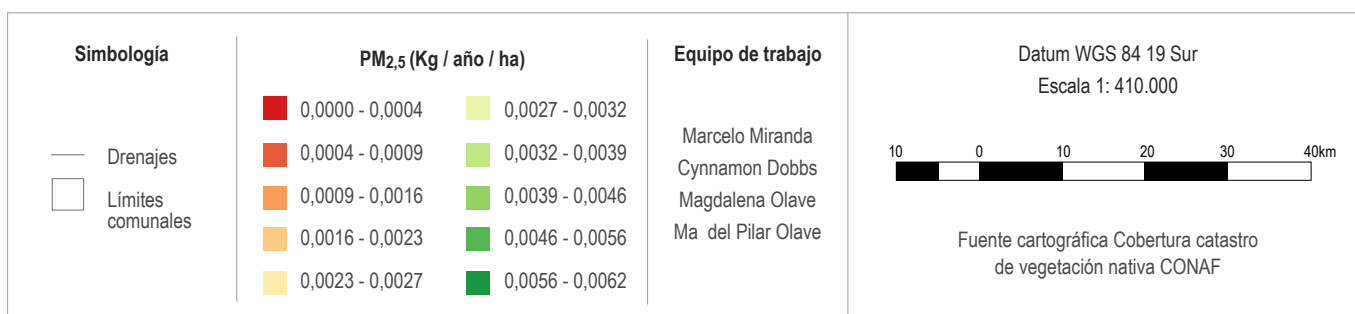


Figura 6 | Depositación PM_{2,5} en la vegetación del área de estudio según cobertura del catastro de vegetación de bosque nativo CIREN CONAF 2013 para situación sin ventilación.



DEPOSITACIÓN PM_{2,5} EN LA VEGETACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO SEGÚN COBERTURA, PARA SITUACIÓN CON VENTILACIÓN

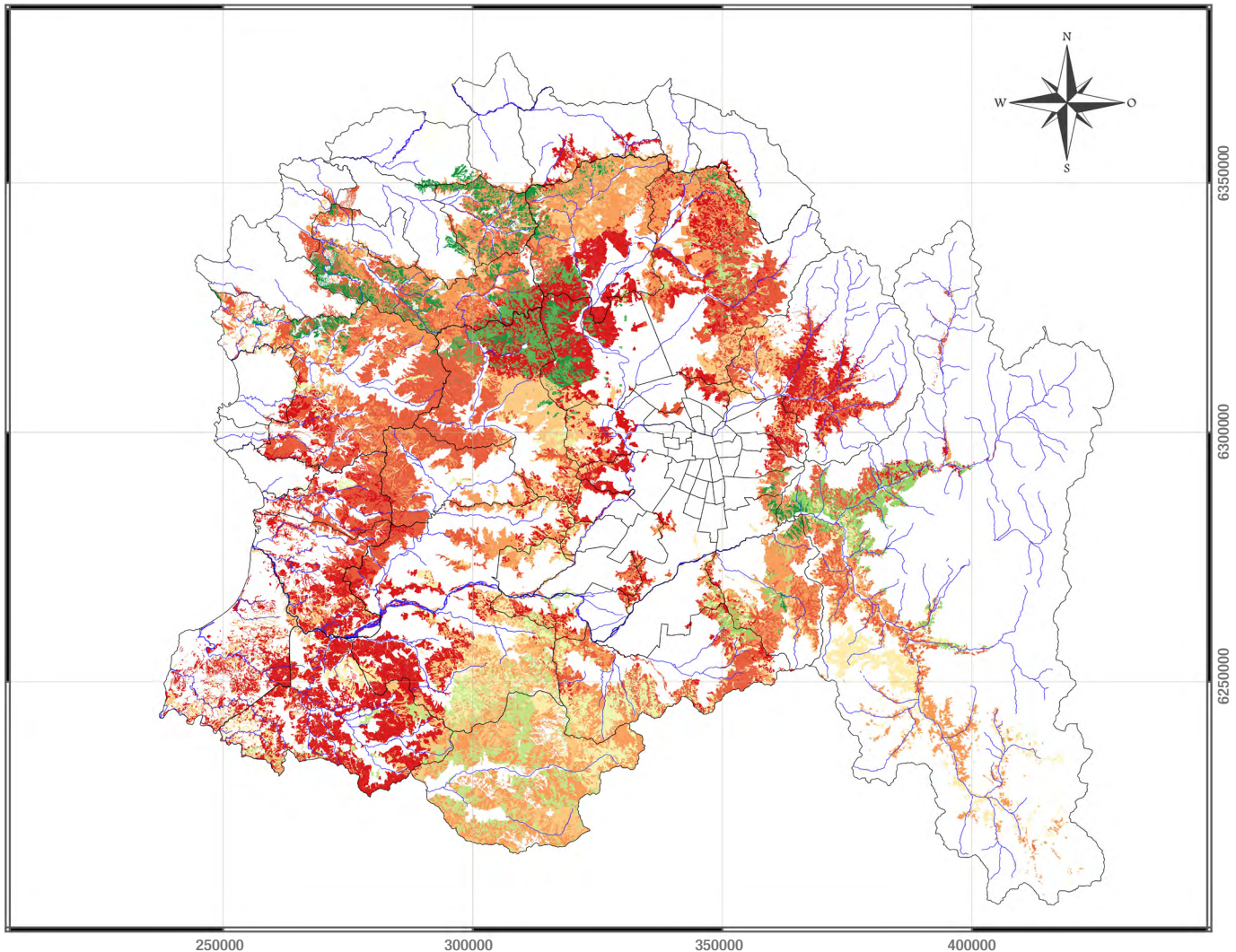
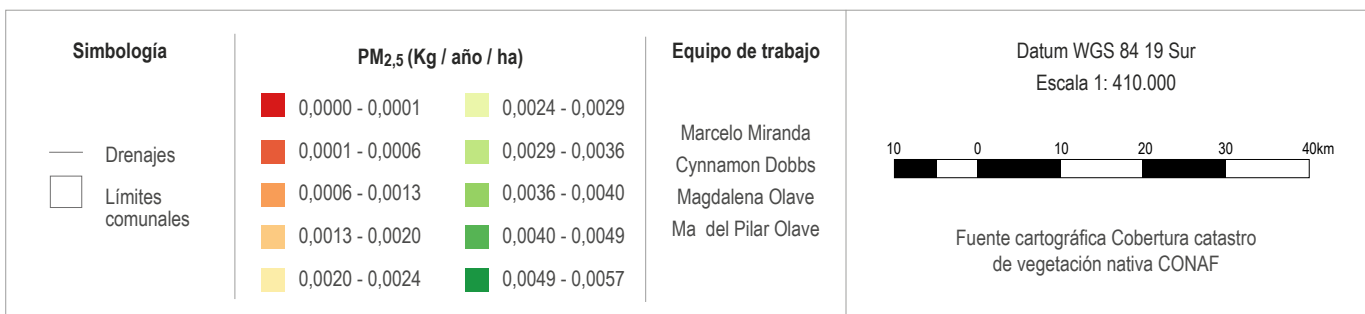


Figura 7 | Depositación PM_{2,5} en la vegetación del área de estudio según cobertura del Catastro de Vegetación de Bosque Nativo CIREN CONAF (2013) para situación con ventilación.



DEPOSITACIÓN PM_{2,5} EN LA VEGETACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO SEGÚN COBERTURA, PARA SITUACIÓN SIN VENTILACIÓN, ENCONTRADA A MENOS DE 20KM DE LAS PARCELAS DE MUESTREO

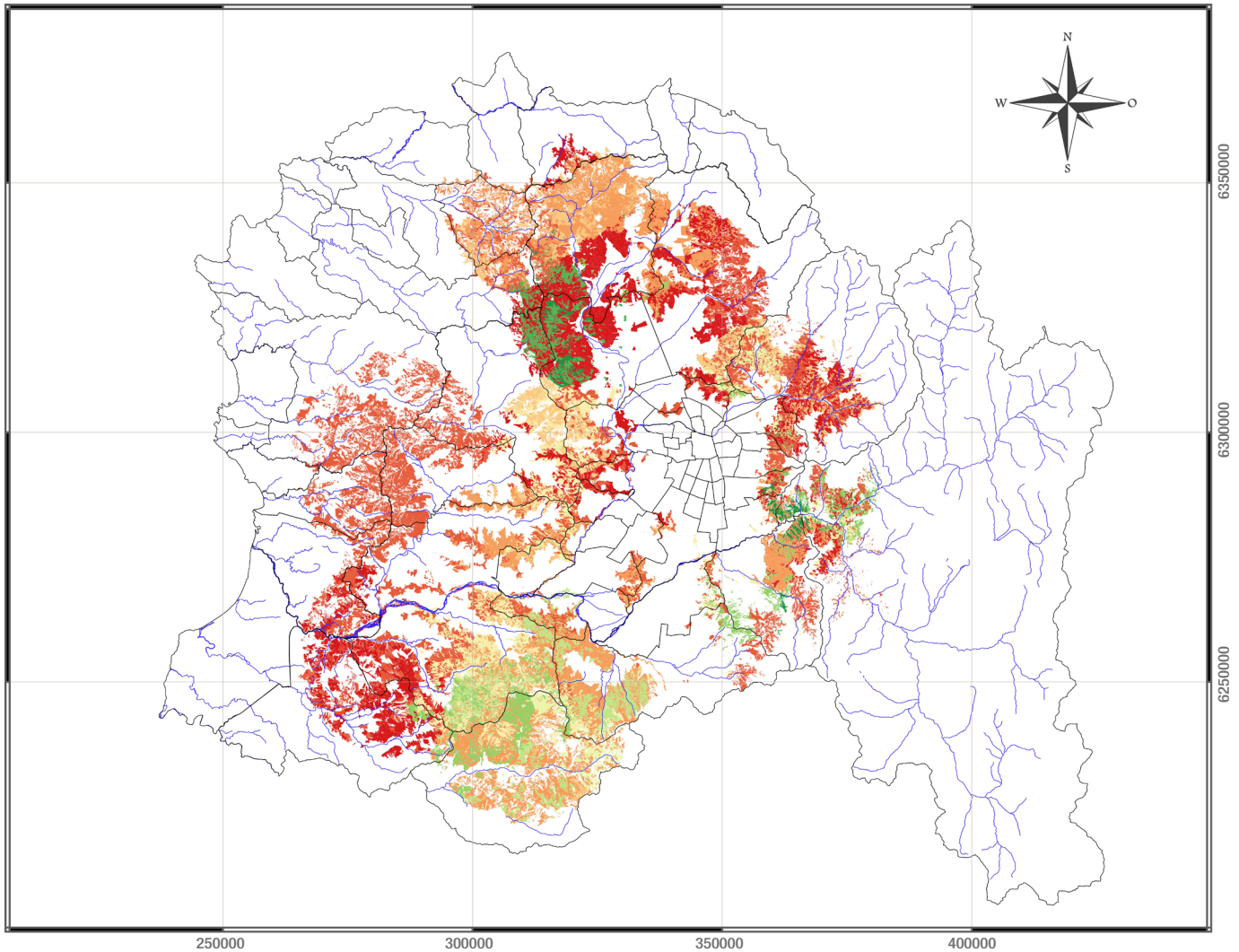
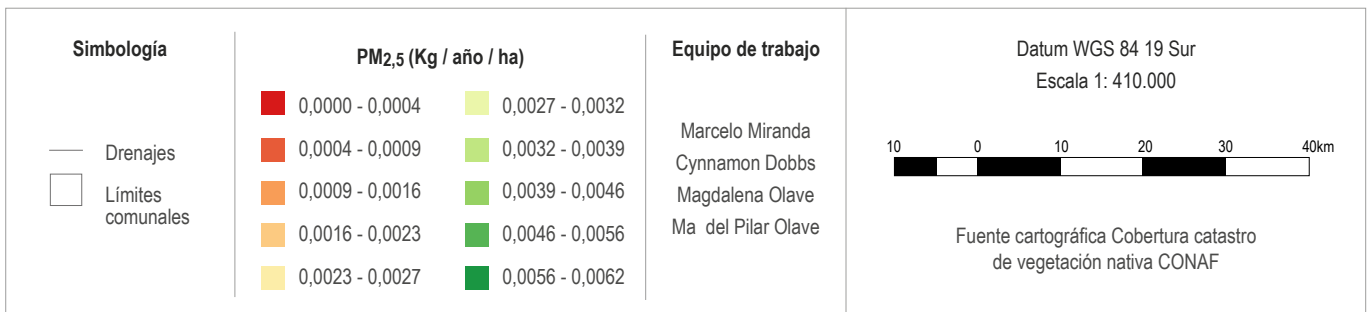


Figura 8 | Depositación PM_{2,5} en la vegetación del área de estudio según cobertura del Catastro de Vegetación de Bosque Nativo CIREN CONAF (2013) encontradas a menos de 20 km de las parcelas de muestreo sin ventilación.



DEPOSITACIÓN PM_{2,5} EN LA VEGETACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO SEGÚN COBERTURA, PARA SITUACIÓN CON VENTILACIÓN, ENCONTRADA A MENOS DE 20KM DE LAS PARCELAS DE MUESTREO

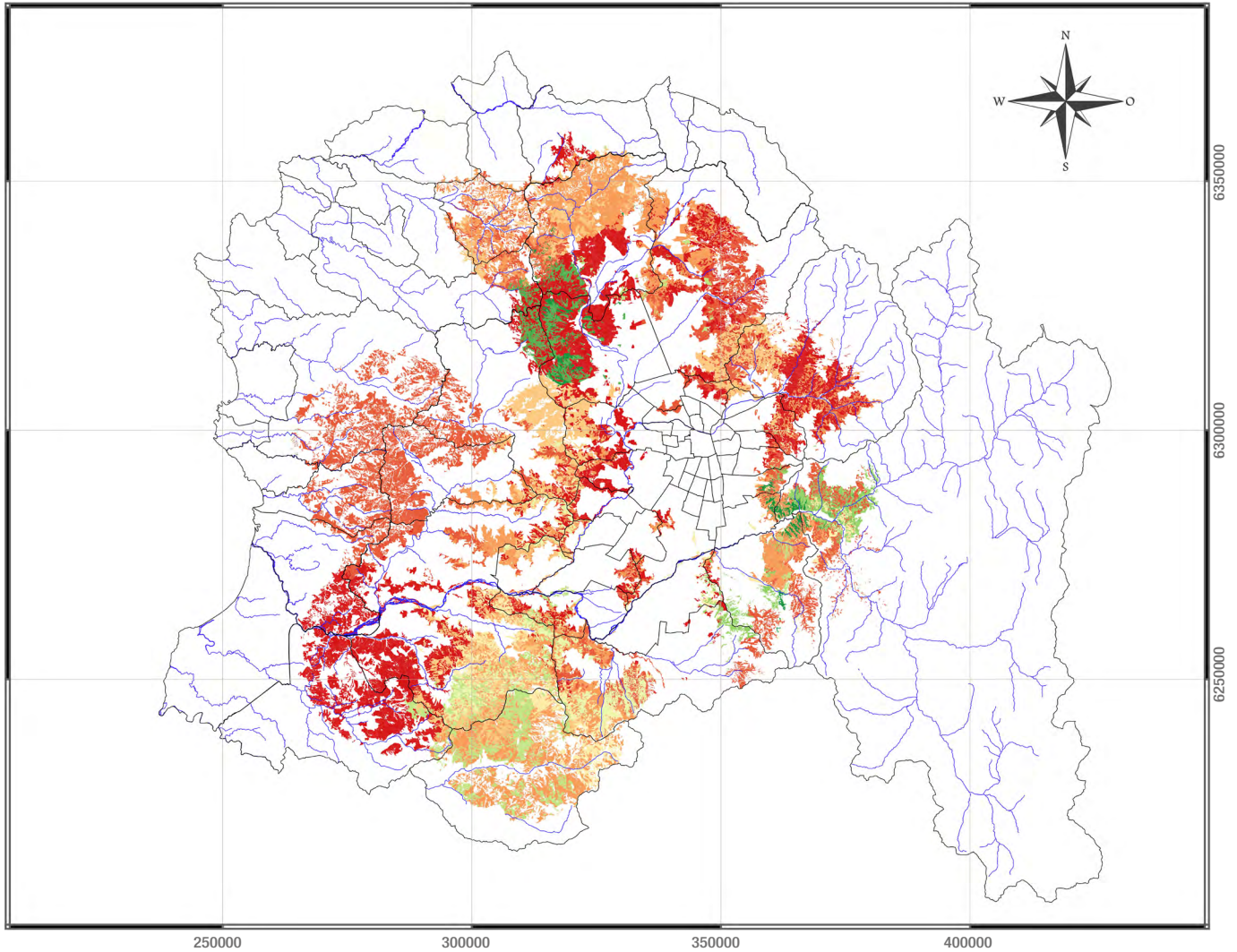
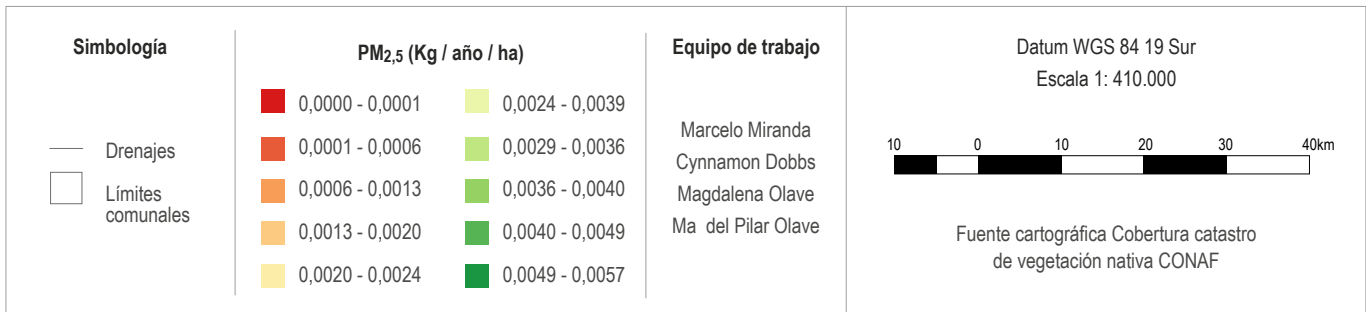


Figura 9 | Deposición PM_{2,5} en la vegetación del área de estudio según cobertura del Catastro de Vegetación de Bosque Nativo CIREN CONAF (2013) encontradas a menos de 20 km de las parcelas de muestreo con ventilación.



3.4.3 | Depositación de PM_{2,5} por especies.

De la misma manera, se realizó el análisis de depositación de PM_{2,5} por especie para las especies seleccionadas señaladas en la sección me-

todológica. Para esto, se realizaron 4 mediciones de área foliar para individuos de cada una de las especies en toda el área de muestreo y se calculó los valores del I-Tree Eco para esta partícula, en un escenario de con y sin ventilación (Tablas 22 y 23).

Especie	Depositación con ventilación				Depositación sin ventilación			
	Promedio (g/m ² /año)	Desv. std. (g/m ² /año)	Máx. (g/m ² /año)	Mín. (g/m ² /año)	Promedio (g/m ² /año)	Desv. std. (g/m ² /año)	Máx. (g/m ² /año)	Mín. (g/m ² /año)
<i>Acacia caven</i>	20	15.5	63.8	0.3	33.2	23.9	103	1.7
<i>Cryptocarya alba</i>	45.7	21.4	96.6	3.6	43	24.3	111.5	8.3
<i>Lithraea caustica</i>	30	21	70.6	0.4	44.7	18.7	90	7.4
<i>Peumus boldus</i>	55.5	19.9	92.5	19.1	33.8	9.8	53.6	16.5
<i>Quillaja saponaria</i>	32.8	23.7	103	0.4	45.5	20.1	98.6	8.4

Tabla 22 | Depositación PM_{2,5} por metro cuadrado con y sin ventilación.

Especie	Depositación con ventilación				Depositación sin ventilación			
	Promedio (g/m ² /año)	Desv. std. (g/m ² /año)	Máx. (g/m ² /año)	Mín. (g/m ² /año)	Promedio (g/m ² /año)	Desv. std. (g/m ² /año)	Máx. (g/m ² /año)	Mín. (g/m ² /año)
<i>Acacia caven</i>	735.6	752.1	3315	8.2	1163	1052	4420	32.6
<i>Cryptocarya alba</i>	2054	1881	6654	71.8	1702	1515	6251	155
<i>Lithraea caustica</i>	1831	1919	11385	9.5	2537	1619	7749	188
<i>Peumus boldus</i>	3333	3100	13407	509	2025	2104	9498	525
<i>Quillaja saponaria</i>	2563	3936	20219	10.1	2903	2604	11367	185

Tabla 23 | Depositación PM_{2,5} por individuo de especie con y sin ventilación.

3.5 | MODELO DE ESTIMACIÓN DE LAI

3.5.1 | Análisis estadístico exploratorio de las relaciones entre LAI y NDVI.

La **Tabla 24** presenta las estadísticas básicas que describen las variables LAI y NDVIpixel. En ellas, se puede observar que los rangos de LAI fluctúan entre valores cercanos a 0 y 4,96 m² de hojas/m² de suelo, siendo el valor de la mediana y media 0,99 y 1,41 respectivamente. Aquí es posible destacar que los rangos obtenidos son

Variable	Mínimo	1er Q	Mediana	Media	3er Q	Máximo
LAI	0.00001	0.376	0.990	1.405	2.221	4.956
NDVIpixel	0.1309	0.2087	0.2553	0.2528	0.2830	0.3659

Tabla 24 | Estadísticas básicas para LAI y NDVIpixel.

adecuados para estos tipos de formaciones mediterráneas en las cuales dominan árboles pequeños con follaje esclerófilo, pero en este caso particular con un gran sesgo positivo.

En el caso de NDVIpixel los rangos fluctúan entre valores de 0,13 y 0,37, destacando valores de mediana y de media muy semejantes (0,25). En general, estos valores son bajos al ser comparados con datos de bosques debido a que estos últimos podrían alcanzar valores superiores a 0,6. La causa de un NDVI bajo se asocia a la cobertura de la vegetación fotosintéticamente activa, la cual en esta zona puede ser menor a 50% en épocas de sequía. La **Tabla 3** muestra además que, el número de árboles por ha en las parcelas estudiadas fluctuó entre 225 y 950 árboles/ha, siendo la clase dominante 500 árboles/ha, lo que puede ayudar a comprender la baja cobertura y valores de NDVIpixel.

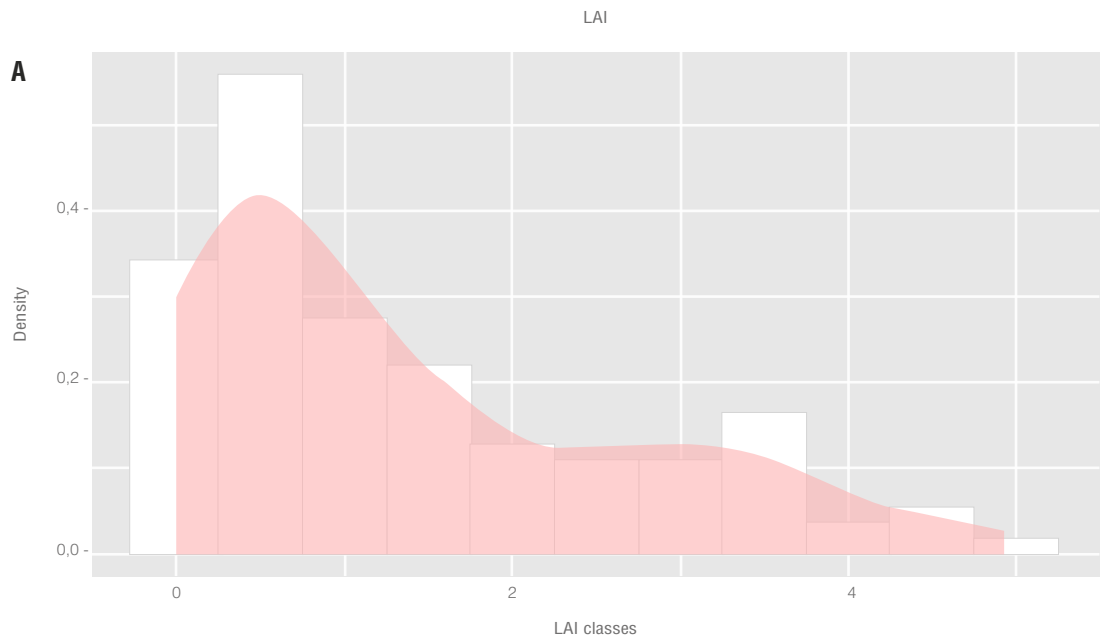


Figura 10 | Histograma de densidad para las variables: a) LAI y b) NDVIpixel.

Al aplicar el Test Shapiro-Wilk para comprobar la normalidad de los datos de las variables LAI y NDVIpixel se encuentra que solo la segunda de ellas (NDVIpixel) presenta una distribución normal (LAI = $W = 0.87048$, $p\text{-value} = 2.106e-08$, NDVIpixel = $W = 0.98018$, $p\text{-value} = 0.09777$). Este dato es muy relevante al momento de escoger la estructura de modelo a estimar. La [Figura 10](#) muestra el histograma de densidad para cada variable descrita donde LAI muestra su acentuado sesgo positivo invocando una distribución del tipo Gamma.

Al analizar la correlación entre las variables LAI y NDVI este valor alcanza a $r=0.47$ lo que en un principio muestra la presencia de una tendencia positiva pero débil entre estas dos variables.

3.5.2 | Modelo Lineal Generalizado para LAI.

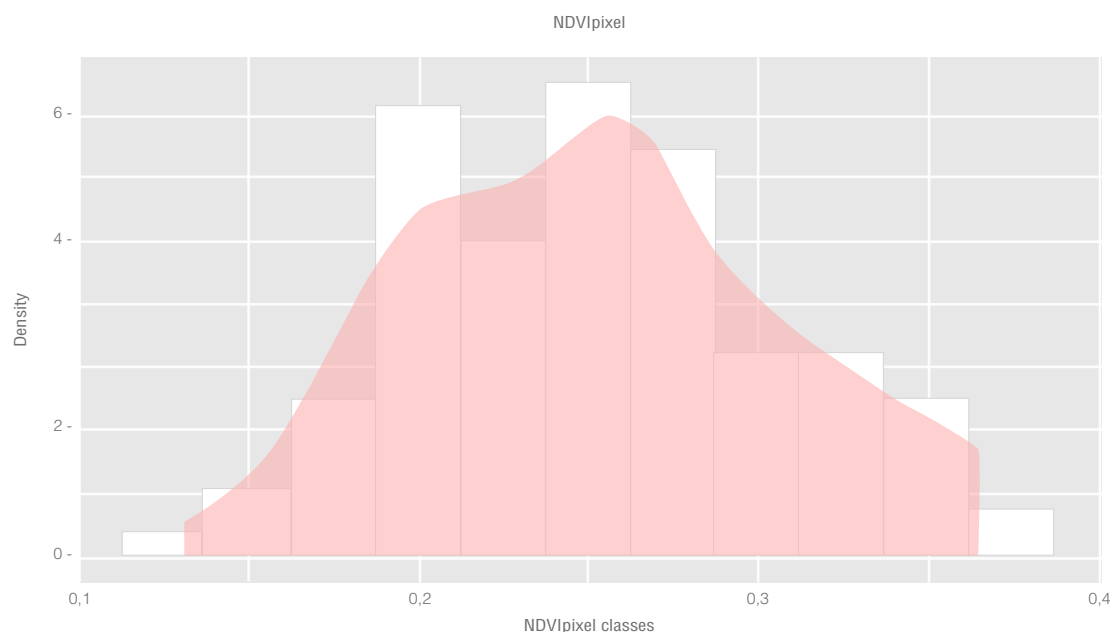
Utilizando el paquete para modelos lineales

generalizados (glm) de R se estimó los parámetros para el modelo propuesto en la metodología sección 2.7.

```
glm (formula = datos$LAI ~ datos$NDVIpixel +
datos$Cobertura, family = Gamma(link = "log"))
```

Como la respuesta no es normal se asumió una distribución del tipo Gamma con una función de unión logarítmica.

En la [Tabla 25](#) se presentan los coeficientes estimados, su error estándar el valor de probabilidad para una distribución del tipo t y su grado de significancia. En ella, es posible observar que la variable NDVIpixel y las clases Denso y Semidenso de la variable Cobertura son muy significativas para el modelo. Esto indica que mayores valores de LAI están asociados a mayores valores de NDVI y coberturas más densas de la vegetación.



	Estimado	Error estandar	Valor t	Pr(> t)	
Intercepto	-2,3052	0.4059	-5.680	1.19e-07	***
NDVipixel	8,2220	1.5511	5.301	1.19e-07	***
Cobertura : Densa	1,1089	0.2330	4.759	6.17e-06	***
Cobertura : Semidensa	0,5548	0,2656	2,656	0,00912	**
Cobertura : Muy abierta	-0,1072	0.2301	-0.466	0.64230	

Tabla 25 | Resultados de modelo GLM.

Códigos de interpretación de significancia: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Null deviance: 144.274 con 110 grados de libertad

Residual deviance: 96.794 con 106 grados de libertad

AIC: 258.88

Dado el modelo construido su forma para realizar estimaciones sería la siguiente:

$$LAI = -2.3052 + 8.222 * NDVipixel + 1.1089 * Cob: Densa + 0.5548 * Cob: Sd - 0.1072 * Cob: M$$

Donde:

LAI = área foliar

NDVipixel = valor de NDVI para un pixel obtenido de imagen Landsat

Cob:Densa = variable dummy con valores 1 para cobertura Densa

Cob:Sd = variable dummy con valores 1 para cobertura Semidensa

Cob:Ma = variable dummy con valores 1 para cobertura Muy Abierta

En la [Figura 11a](#) se muestra la relación entre los valores de LAI medidos en terreno y los estimados por el modelo los que alcanzan un valor de correlación $r = 0.61$. En la [Figura 11b](#) se muestra la distribución de los residuales, los cuales presentan una estructura aleatoria frente al valor 0.

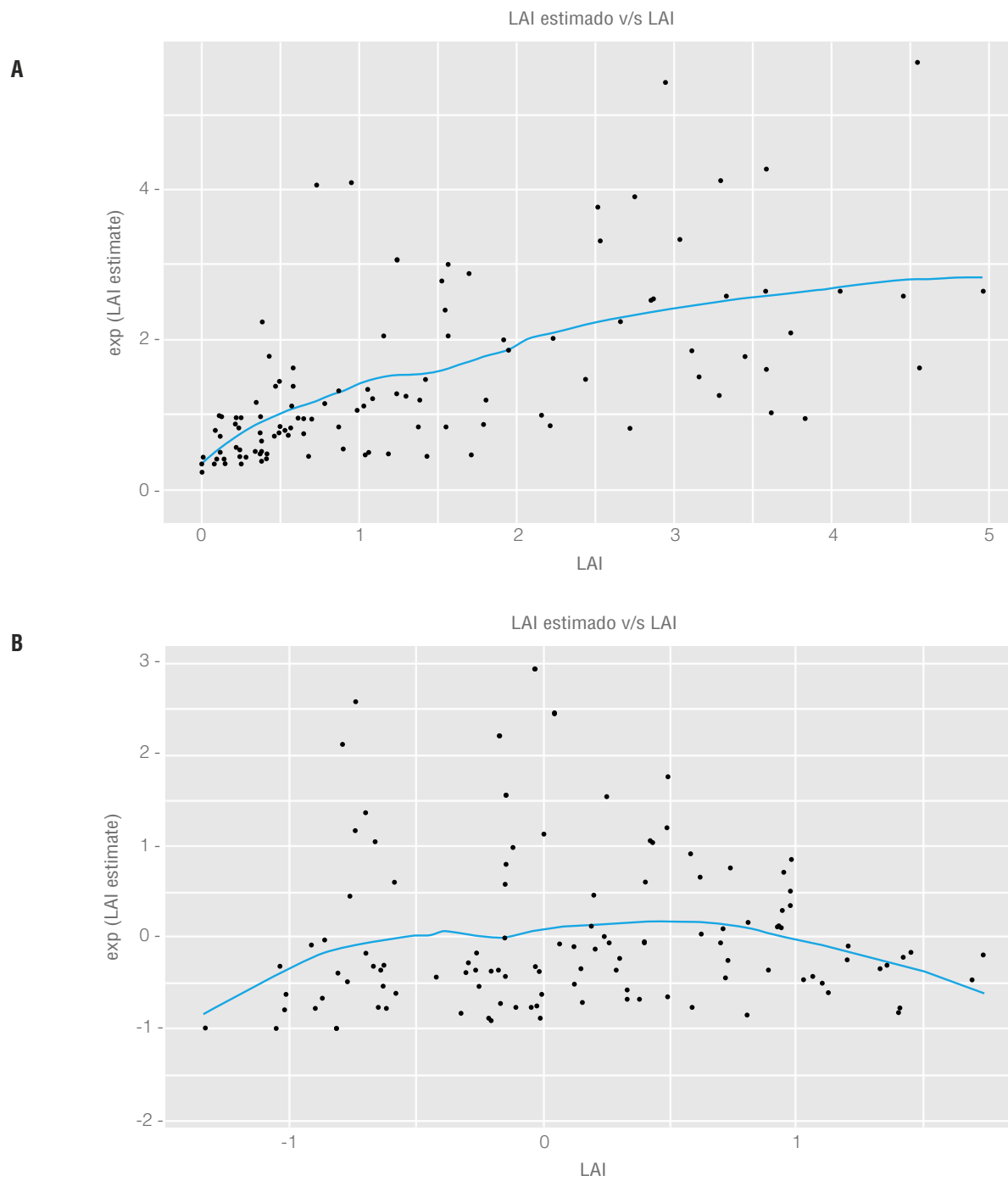


Figura 11 | a) Valores estimados de LAI vs valores reales, b) distribución de residuales.



Discusión



4 | DISCUSIÓN

De acuerdo a los resultados queda demostrado que existe potencial para la descontaminación por parte de la vegetación nativa aledaña a ciudades con problemas de contaminación. Dada la metodología utilizada para el cálculo, ésta en gran parte depende de la biomasa foliar, específicamente del área foliar de los árboles y de su cercanía a las fuentes de contaminación. El área foliar a su vez depende de la especie y de las condiciones en que se encuentre el árbol. Es decir, el área foliar máxima para una especie se presentará en individuos que se encuentran en pleno crecimiento, sin afectaciones sanitarias o de estructura, en un bosque sano.

Las mediciones de área foliar realizadas pueden considerarse cercanas a las obtenidas en el trabajo de Escobedo y Nowak (2009). Estos obtuvieron valores promedio de 3 para la región (Gran Santiago), mientras este estudio obtuvo valores promedio de 2.4. La cobertura del bosque, sin embargo, es mucho mayor para el caso de este estudio con un promedio de 28.6% en contraste con el estudio de Escobedo y Nowak (2009) que alcanza solo el 17%. La diferencia puede deberse a que el estudio de Escobedo y Nowak (2009) incluye especies no nativas que presentan área foliar mayores, tales como coníferas y la presencia de nativas en la ciudad a la fecha del muestreo (2001) era solo de un 4% (Hernández y Villaseñor, 2018).

En cuanto a la depositación del PM₁₀, los valores del presente estudio muestran resultados que van desde promedios de 0.66 g/m² para el bosque

muy abierto en la zona de Melipilla hasta 5.6 g/m² para el bosque denso de la Parque Nacional de Río Clarillo. Los valores del estudio de Escobedo y Nowak (2009) son un poco más altos variando desde 2.5 a 11.7 g/m². Cabe recordar que estos últimos valores corresponden a un bosque urbano de área foliar mayor por la presencia de algunas especies exóticas y a concentraciones de contaminantes al año 2001 mayores que las concentraciones al año 2017.

Al hacer la comparación con estudios de otras ciudades con coberturas arbóreas similares, los rangos de depositación para el PM_{2,5} dan mayores, especialmente para los sectores donde el bosque tiene mayor cobertura. El promedio para el área de estudio es de 1.1 g/m²/año, mientras que para ciudades de Estados Unidos como San Francisco, Syracuse, Baltimore y Boston este valor es cercano a 0.3 g/m²/año con menores niveles de contaminación y coberturas cercanas al 27% (Nowak *et al.* 2013). Ciudades dentro del mismo ámbito climático en EEUU tal como Los Ángeles, Albuquerque, Sacramento y Tucson presentan depositaciones de PM₁₀ similares a las calculadas para el área de estudio. Las depositaciones promedio de PM₁₀ para el área de estudio son de 2.3 g/m²/año, con un rango que varía de 0.66 a 4.30 g/m²/año. Tucson y Sacramento presentan depositaciones promedio de 2.6 g/m²/año con valores entre 1.5 – 6 g/m²/año; Albuquerque tiene valores de 2.6 g/m²/año con rango de 1-4.1 g/m²/año. Mientras Phoenix y Los Ángeles presentan promedios cercanos a 7.5 g/m²/año variando de 2.8 – 12.6 g/m²/año (Nowak *et al.* 2006).



5

Limitaciones
Recomendaciones

5 | LIMITACIONES DEL MODELO Y RECOMENDACIONES

Dentro de las limitaciones que presenta el estudio realizado destacan:

- Sesgo del instrumento en cuanto a la medición del área foliar, por nubosidad y ángulo solar o intercepción de otras formas vegetales tales como arbustos o parásitas que estén afectando la medición.
- Modelo construido en base a especies arbóreas templadas del norte de Estados Unidos, por lo que los coeficientes pueden ser inexactos para especies del Bosque Esclerófilo del área de estudio.
- Exactitud de la cartografía de la vegetación empleada en el estudio y su forma de imputación.
- No incluir la variación espacial de la concentración de contaminantes ni viento a nivel continuo, dado que se obtuvieron estos datos de las estaciones MACAM.

Para mejorar la robustez y la exactitud de los resultados se recomienda lo siguiente:

- Mediciones de la concentración de contaminantes en los lugares donde existe la vegetación de interés. Estas mediciones deberían hacerse por sobre la copa de los árboles o bosque de interés, similar a las estaciones de Edycovarianza (https://es.licor.com/env/products/eddy_covariance/science.html) para medir carbono.
- Muestreo de hojas en temporada de invierno cuando ha habido más de cinco días de altos niveles de contaminación, y más de una semana sin lluvia. Las hojas pueden ser llevadas a laboratorio y examinadas por el método de lavado que permite extraer las partículas depositadas en la hoja.

- El tamaño muestral por especie parece indicar que el número es el adecuado dado por la baja variación en el área foliar medida para los individuos de una misma especie.

Producto del trabajo realizado a continuación se proponen las siguientes recomendaciones generales para mejorar en el futuro los resultados obtenidos.

- Que las compensaciones por contaminación de material particulado no solo se dirijan a aumentar la masa boscosa o la cobertura, sino también a mejorar las condiciones del bosque a través de medidas para la restauración.
- Que las compensaciones se realicen cercanas a las áreas contaminadas donde la depositación es más efectiva, dado que el material particulado no se moviliza grandes distancias.
- Realizar muestreos in-situ y análisis de lavado de hojas que permitan adaptar el modelo I-Tree Eco a las condiciones locales.
- Para maximizar la remoción se recomienda la maximización del área foliar, la que se puede hacer a través de uso de especies de área foliar mayor o a través de la maximización de cobertura de copa.
- En cuanto al manejo, se recomienda la mantención de la arquitectura de copa natural del árbol que mantener el máximo de depositación de material particulado
- Se recomienda incluir los otros servicios ecosistémicos provistos por los árboles de manera de relevar su valor (y aumentarlo en términos monetarios del beneficio) de forma de hacerlo más competitivo ante otras formas de compensación por contaminación atmosférica.



Anexo

Elaborado por equipo GEF Montaña

6

6 | ANALISIS DE CAPTURA DE MATERIAL PARTICULADO PM₁₀ POR DEPOSITACIÓN POR COMUNA

Si analizamos los resultados obtenidos por comuna, se tiene que de las 36 que conforman el área del proyecto del GEF Montaña, aproximadamente para la mitad (15) se pudo gestionar un permiso de ingreso para realizar este estudio (Tabla 26).

Comunas	Nº de Parcelas
Alhué	6
Colina	7
El Monte	6
Huechuraba	7
Isla de Maipo	7
La Florida	6
La Reina	6
Las Condes	6
Lampa	7
Maipú	8
Melipilla	15
Peñalolén	12
Pirque	6
San Bernardo	6
Tiltil	6

Tabla 26 | Comunas estudiadas con el número de parcelas levantadas en cada una (Total = 111).

De estas 15 comunas, Pirque, Alhué, Lampa y Peñalolén, presentan las parcelas con mayor potencial de purificación del aire, es decir, promedio anual de depositación de material particulado PM₁₀ por superficie foliar. Es importante destacar que, el potencial de depositación de material particulado se calculó a partir de datos tomados directamente en terreno (111 parcelas), en donde se describen los atributos de los bosques nativos presentes, y las mediciones de las concentraciones de contaminantes de las estaciones MACAM¹ más cercanas a cada parcela. En la medida que se aumente la red de estaciones MACAM, el valor de potencial de purificación irá ajustándose cada vez mejor a la realidad, dado que el potencial purificador está directamente correlacionado con la concentración de material particulado. De la misma forma, en la medida que se aumente el número de parcelas de estudio, de forma tal que sean representativas de todos los tipos de bosques presentes en cada comuna, se podrá dar cuenta del potencial de purificación de aire a nivel comunal. No obstante, los resultados obtenidos a la fecha ya permiten valorar el rol de los bosques en su servicio ecosistémico de purificación de aire de cada comuna muestreada.

Al analizar este beneficio en función de la cobertura de bosque se identifica que las coberturas de bosque denso pueden llegar a capturar más del doble que las coberturas de bosque abiertas o

1) Red de Monitoreo de la Calidad de Aire de Santiago.

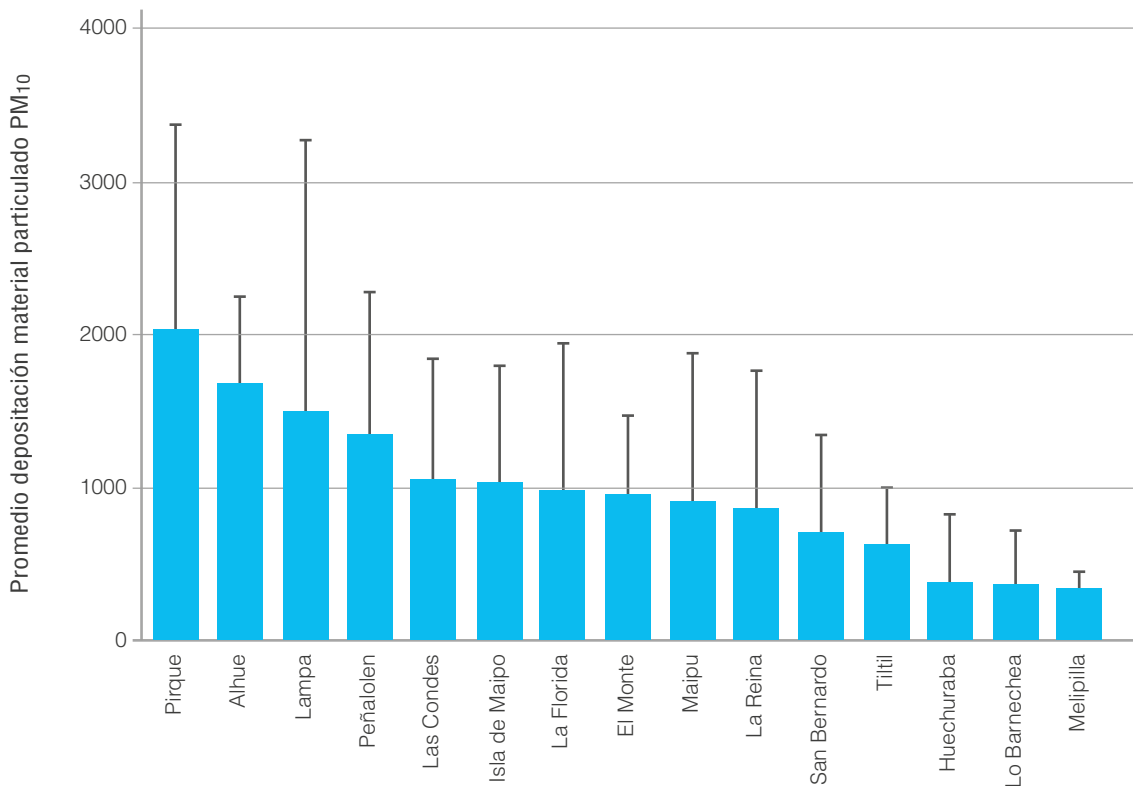


Figura 12 | Promedio de captura de material particulado PM10 por depositación por comuna.

muy abiertas. Es así como, las dos comunas que presentan mayor potencial de depositación de PM10 (Pirque y Alhue) son también aquellas donde las parcelas se ubicaron predominantemente en sectores de bosques densos o semidensos (Figura 12). De la misma forma destaca Lampa, la tercera comuna con mayor potencial de depositación, en la cual se muestrearon parcelas en

las cuatro categorías de cobertura de bosque, y donde además se encuentra la parcela con mayor potencial de depositación registrada en todo el estudio (100 kg/año/ha). En este caso se da que no solo esta parcela corresponde a cobertura de bosque denso, sino que además la comuna de Lampa es cercana al casco urbano, y por tanto a las fuentes contaminantes de PM10. Esto resalta

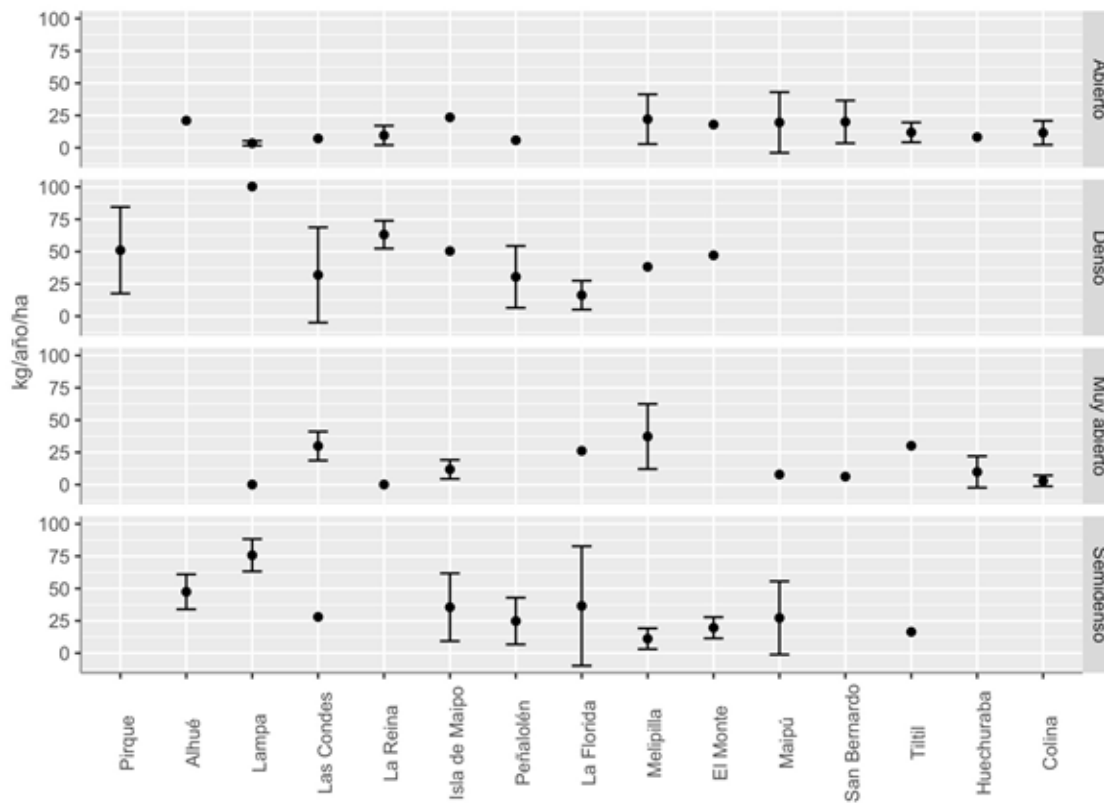


Figura 13 | Depositación anual promedio de PM₁₀, según el tipo de cobertura de bosque por parcelas muestreadas en las comunas. Se muestra barra de error estándar en los casos donde hay más de una parcela de muestreo.

la importancia de recuperar los sectores circundantes a la gran urbe con bosques de cobertura semidensa y densa, reforestando con especies nativas.

Dada la importancia de los resultados obtenidos a partir de estas 111 parcelas, se revela el valor que tendría el aumentar el número de parcelas dentro

de las comunas ya estudiadas, así como de las comunas que no se han estudiado aún. Esto permitiría tener un panorama más extenso y cercano a la realidad del rol que cumplen los ecosistemas de bosques mediterráneos que rodean la cuenca de Santiago en la purificación del aire.



Referencias

- Bazan J, Valenzuela H, Vallejos B. 2014. Estimando los costos en salud de la contaminación por material particulado en Chile. *Eco-FEN*, Facultad de Economía y Negocios. Universidad de Chile 37 p.
- Baumgardner D., Varela S., Escobedo F.J., Chacalo A., Ochoa C. 2012. The role of a peri-urban foresto air quality improvement in the Mexico City megalópolis. *Environmental Pollution* 163, 174-183.
- Bottalico F, Travaglini D, Chirici G, Garfi V, Giannetti F, De Marco A, Fares S, Marchetti M, Nocentini S, Paoletti E, Salbitano F, 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 & Urban Greening* 27, 221-234.
- 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. *Agriculture and Agricultural Science Procedia* 8, 243-251.
- CIREN/CONAF 2013. Informe tecnico final y cobertura digital. Proyecto Monitoreo de cambio, correccion cartografica y actualizacion del Catastro de Bosque Nativo en las regiones de Valaparaíso, Metropolitana y Libertador Bernarndo O'Higgins. CIREN CONAF 131 p.
- Dobbs C, Escobedo F, Zipperer W. 2011. A framework for developing urban forest ecosystem services and goods. *Landscape and Urban Planning* 99(3-4), 196-206.
- Escobedo F.J., Wagner J.E., Nowak D.J., de la Maza C.L., Rodriguez M., Crane D.E. 2008. Analyzing the cost effectiveness of Santiago, Chile's policy of using urban forest to improve air quality. *Journal of Environmental Management* 86, 148-157.
- Escobedo F, Nowak D.J. 2009. Spatial heterogeneity and air pollution removal by an urban forest. *Landscape and Urban Planning* 90, 102-110.
- Grote R., Samson R., Alonso R., Amorim J.H., Cariñanos P., Churkina G., Fares S., Le Thiec D., Niinemets U., Mikkelsen T.N., Paoletti E., Tiwary A., Calfapietra C. 2016. Functional traits of urban trees: air pollution mitigation potential. *Frontiers in Ecology and the Environment* 14(10), 543-550.
- Hernandez H.J., Villaseñor N. 2018. Twelve-year change in tree diversity and spatial; segregation in the Mediterranean city of Santiago, Chile. *Urban Forestry & Urban Greening* 29, 10-18.
- Hirabayashi S, Kroll CN, Nowak DJ. 2014. I-Tree Eco dry deposition model descriptions. www.itreetools.org.
- Hirabayashi, S. 2012. i-Tree Eco precipitation interception model descriptions. www.itreetools.org.
- Ninan KN, Inoue M. 2013. Valuing forest ecosystem services: what we know and what we don't. *Ecological Economics* 93, 137-149.
- Lovett G.M., 1994. Atmospheric deposition of nutrients and pollutants in North America: an ecological perspective. *Ecological Applications* 4, 629-650.
- Ninan K.N., Inoue M. 2013. Valuing forest ecosystem services: what we know and what we don't. *Ecological Economics* 93, 137-149.
- Nowak, David J.; Crane, Daniel 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 urban trees and shrubs in the United States. *Urban For. Urban Green.* 4, 115-123.
- Nowak, D.J., Hirabayashi, S., Bodine, A., Hoehn, R., 2013. Modeled PM_{2.5} removal by trees in ten US cities and associated health effects. *Environ. Pollut.* 178, 395-402.
- Oakes M.M., Baxter L.K., Duvall R.M., Madden M., Xie M., Hanigan M.P., Peel J.L., Pachon J.E., Balachandran S., Russell A., Long T.C. 2014. Comparing multipollutant emissions-based mobile source indicators to other single pollutant and multipollutant indicators in different urban areas. *Int. J. Environ. Res. Public Health* 11, 11727-11752.
- Pullman M. 2009. Conifer PM_{2.5} deposition and re-suspension in wind and raine vents. Master's thesis. Cornell University. 51 p.
- Ren Z, Du Y, He X, Pu R, Zheng H, Hu H. 2017. Spatiotemporal pattern of urban forest leaf area index in response to rapid urbanization and urban greening. *Journal of Forest Research*. In Press.



PONTIFICIA
UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DE CHILE



Corredores Biológicos
de **Montaña**
Proyecto GEF