



UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS QUÍMICAS Y FARMACÉUTICAS
DEPARTAMENTO DE QUÍMICA ORGÁNICA Y FISICOQUÍMICA
LABORATORIO DE QUÍMICA DE LA ATMÓSFERA

**EFFECTOS DEL MATERIAL PARTICULADO Y GASES EMITIDOS POR
VEHÍCULOS DIÉSEL SOBRE EL RENDIMIENTO FOTOSINTÉTICO DE
QUILLAJA SAPONARIA MOL. A DOS NIVELES HÍDRICOS**

EDGARDO FELIPE GONZÁLEZ PICHUNLAF

Memoria para optar al Título Profesional de Químico

PROFESORA GUÍA: DRA. MARGARITA PRÉNDEZ BOLÍVAR
PROFESORA GUÍA: INGENIERO FORESTAL, DRA. KAREN PEÑA-ROJAS

SANTIAGO, CHILE

2019



UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS QUÍMICAS Y FARMACÉUTICAS
DEPARTAMENTO DE QUÍMICA ORGÁNICA Y FISICOQUÍMICA
LABORATORIO DE QUÍMICA DE LA ATMÓSFERA

**EFFECTOS DEL MATERIAL PARTICULADO Y GASES EMITIDOS POR
VEHÍCULOS DIÉSEL SOBRE EL RENDIMIENTO FOTOSINTÉTICO DE
QUILLAJA SAPONARIA MOL. A DOS NIVELES HÍDRICOS**

EDGARDO FELIPE GONZÁLEZ PICHUNLAF

Memoria para optar al Título Profesional de Químico

Directoras de Memoria:

Dra. Margarita Préndez _____

Dra. Karen Peña-Rojas _____

Comisión de Evaluación:

Dr. Claudio Pastenes Villarreal _____

Dra. Daniela Seelenfreud Hirsch _____

AGRADECIMIENTOS

A mis compañeros de la promoción 2010, amigos que a lo largo de la carrera fueron un apoyo tanto en lo académico como en lo emocional: Jenny, Gustavo, Chi, Kamila, Ahirton, Dani, Monroy, Vale, Cata. Muchas gracias por estar siempre ahí.

A mis amigos Sebastián e Iván, los cuales no solamente mostraban su pasión por la Química, sino que también por los videojuegos. El ñoñerismo es parte de nuestra esencia y ustedes siempre estuvieron en ello, además son personas que valoro mucho y espero que nuestra amistad siga por muchos años más.

A mis tíos Carlos y Claudia, de los cuales estoy agradecido enormemente porque no solo han sido personas cercanas, sino que también unos verdaderos padres para mí.

A mi papá, Gustavo, por siempre estar conmigo apoyándome, por aguantarme, por quererme y por ser quien eres. Eres un pilar fundamental en mi vida.

A mi madre, Carmen Gloria, por tu sacrificio, por tus enseñanzas, por siempre estar dispuesta para mí. Por quererme y preocuparte de criarme, por entregar tu vida a la mía. Gracias.

A mi hermana, Aline, por ser quien eres, por apasionarnos por la música. Somos como uña y mugre. Te amo.

A Marielena, mi pareja y compañera, no hay persona con quien sienta más afinidad que contigo. Eres mi persona favorita.

Al laboratorio de Química de la Atmósfera por siempre apoyarme y darme ánimos. Al laboratorio de Geomática y Ecología del Paisaje y sobre todo al profesor Jaime, por incluirme en su proyecto FONDECYT.

A Miguel y Rodrigo, por apoyarme en mi memoria, por su buena disponibilidad y trabajo en conjunto.

A la profesora Karen por tener interés en mi trabajo y ser parte del mismo. Por sus buenas vibras y apoyo. Por mostrarme un mundo nuevo referente a las plantas y la fotosíntesis.

Por último, a mi profesora Margarita. Gracias por aceptarme en su laboratorio, por enseñarme parte de su gran conocimiento, por escucharme siempre, por motivarme y por incluirme en sus trabajos que sin duda son un aporte para la sociedad. La quiero un montón.

ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN	13
2. HIPÓTESIS Y OBJETIVOS	15
2.1. Hipótesis	15
2.2. Objetivo general	15
2.3. Objetivos específicos	16
3. MARCO TEÓRICO	16
3.1. Características del material particulado	16
3.1.1. Características del material particulado diésel (MPD)	18
3.1.2. Muestreadores de material particulado	21
3.2. Arbolado urbano	22
3.3. Fundamentos de la fluorescencia de las clorofilas y el estrés hídrico	25
3.3.1. Fluorescencia de las clorofilas	25
3.3.2. Estrés hídrico	26
4. MATERIALES Y MÉTODOS	29
4.1. Materiales y reactivos	29
4.2. Equipos y software	29
4.5. Método de cuantificación de gases	35
4.6. Método de obtención del potencial hídrico (Ψ)	37
4.7. Método de obtención del rendimiento cuántico del fotosistema II (Fv/Fm)	38
4.8. Procedimiento de muestreo y mediciones fisiológicas	39
4.9. Análisis estadístico	40
5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	42

5.1. Análisis gravimétrico del material particulado	42
5.2. Medición de las concentraciones de los gases CO, CO₂ y O₃	44
5.3. Análisis de potencial hídrico y rendimiento cuántico máximo del PSII	46
5.3.1. Efecto de los contaminantes en el rendimiento cuántico máximo del PSII	48
5.3.1.1. Efecto en plantas con riego	48
5.3.1.2. Efecto en plantas sin riego	54
6. CONCLUSIONES	57
7. CONSIDERACIONES FINALES Y PROYECCIONES	58
8. BIBLIOGRAFÍA	60

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura N°1. División del material particulado diésel en tres fracciones básicas	20
Figura N°2. Esquema de la reacción de formación de ozono a partir de compuestos orgánicos volátiles y el sistema NO-NO ₂ -O ₃ . Fuente: Atkinson, 2000.....	23
Figura N°3. Follaje y estructuras florales de Quillaja saponaria. a) quillay joven; b) quillay adulto. Fuente: Conaf, 2014.....	24
Figura N°4. Lugar de muestreo. a) Cámara de crecimiento, Campus Sur, Universidad de Chile; b) muestreador, colector de MP SFU (Stacked Filter Unit).	31
Figura N°5. Partes específicas del equipo Aeroqual AQ-200 utilizado para el muestreo de los gases CO ₂ , CO y O ₃ . Fuente: Aeroqual.com.....	36
Figura N°6. Cámara de presión Sholander modelo PMS 1000. Fuente: Ambimet.com.....	38
Figura N°7. Fluorímetro modulado portátil Mini-PAM Photosynthesis Yield Analyser. Fuente: Walz.com.	39
Figura N°8. Secuencia del procedimiento utilizado en cada ciclo de medición.	41
Figura N°9. Filtros con material particulado depositado. A) Material particulado depositado en filtros de teflón; B) material particulado depositado en filtros de policarbonato. Muestreador SFU.....	43
Figura N°10. Correlación entre concentración de CO y O ₃ con una significancia de Pearson de $p < 0,01$ ($r = 0,962$) para los valores obtenidos en los 10 ciclos de medición (N=17).	46
Figura N°11. Variación de F_v/F_{mPD} vs la concentración de CO ₂ para plantas de quillay con riego. Correlación de Pearson significativa para $p \leq 0,01$ ($r = -0,618$) con N=37.	49
Figura N°12. Variación de F_v/F_{mPD} vs la concentración de CO. Correlación de Pearson significativa para $p < 0,01$ ($r = -0,742$; N=37).	50

Figura N°13. Variación de $F_v/F_{m_{PD}}$ vs la concentración de O_3 para plantas de quillay con riego. Correlación de Pearson significativa para $p < 0,01$ ($r = -0,684$; $N = 37$).....	51
Figura N°14. a) Quillaja saponaria Mol. regada, antes de exponerse a los contaminantes emitidos por el vehículo diésel; b) Quillaja saponaria Mol. regada, después de la exposición a los contaminantes emitidos por el vehículo diésel.	52
Figura N°15. Variación de $F_v/F_{m_{PD}}$ vs la concentración de $MP_{2,0}$ para plantas de quillay con riego. Correlación significativa de Pearson para $p < 0,01$ ($r = -0,692$; $N = 37$).....	52
Figura N°16. Variación de $F_v/F_{m_{PD}}$ vs la concentración de $MP_{2,0-10}$ para plantas de quillay con riego. Correlación de Pearson estadísticamente significativa para $p < 0,01$ con $r = -0,431$ para $N = 37$	53
Figura N°17. Variación de $F_v/F_{m_{PD}}$ vs la concentración de CO_2 para plantas de quillay sin riego. Correlación de Pearson significativa ($r = -0,378$; $p < 0,05$) para $N = 38$	54
Figura N°18. Concentración de CO vs $F_v/F_{m_{PD}}$ para plantas de quillay sin riego Correlación de Pearson significativa para $p < 0,05$ ($r = -0,388$; $N = 38$). ..	54
Figura N°19. Variación de $F_v/F_{m_{PD}}$ vs la concentración de O_3 para plantas de quillay sin riego. Correlación de Pearson significativa para $p < 0,01$ ($r = -0,444$; $N = 38$).....	55
Figura N°20. Variación de $F_v/F_{m_{PD}}$ vs la concentración de $MP_{2,0}$ para plantas de quillay sin riego. Correlación de Pearson significativa para $p < 0,01$ ($r = -0,517$; $N = 38$).....	55

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro N°1. Especificaciones de cada sensor (cabezal) utilizado para la cuantificación de cada gas.....	36
Cuadro N°2. Concentraciones y error estándar propagado de material particulado fino y grueso, expresadas en $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ emitidas desde un vehículo diésel y colectadas durante 24 horas. Muestreador SFU.	42
Cuadro N°3. Concentraciones de CO , CO_2 y O_3 , expresadas en mg/m^3 , antes y después de la aplicación de las emisiones del tubo de escape de un vehículo diésel en cada ciclo de medición.	44
Cuadro N°4. Valores medios \pm desviación estándar del potencial hídrico (Ψ_{PD}) a pre-alba para plantas con riego, CR, (N=40) y sin riego, SR (N=40), con (CC).y sin (SC) exposición al contaminante. Plantas de Quillaja saponaria Mol.	47
Cuadro N°5. Valores medios \pm desviación estándar del rendimiento cuántico máximo del fotosistema II ($F_v/F_{m\text{PD}}$) a pre-alba para plantas con riego, CR, (N=40) y sin riego, SR (N=40), con (CC) y sin (SC) exposición al contaminante. Plantas de Quillaja saponaria Mol.....	48

RESUMEN

La ciudad de Santiago de Chile tiene frecuentes episodios críticos de contaminación atmosférica durante la época de invierno. La normativa vigente asociada a esta situación se basa, entre otros factores, en las concentraciones de material particulado fino ($MP_{2,5}$). Los vehículos diésel tienen una importante contribución a las emisiones de material particulado fino a la atmósfera y constituyen uno de los contaminantes críticos que afectan a la salud humana. El número de vehículos diésel ha ido en constante aumento en la ciudad de Santiago.

A nivel internacional la vegetación ha sido clave como herramienta de mitigación de la contaminación; en Chile hay menos información. La especie de hojas persistentes quillay (*Quillaja saponaria* Mol.) es una de las especies nativas más utilizadas en el arbolado urbano de Santiago, de ahí el interés en saber cómo y cuánto afectan las emisiones de los vehículos a la fisiología de dicha especie arbórea.

El objetivo de este trabajo es analizar el efecto de las emisiones de un vehículo diésel sobre el rendimiento cuántico máximo (F_v/F_{mPD}) del fotosistema II (PSII) de las plantas de quillay sometidas a dos niveles de riego.

A partir de un método de muestreo en una cámara de crecimiento, se estudiaron los efectos de algunos gases contaminantes y del MP emitido por un vehículo diésel sobre el F_v/F_{mPD} , según nivel de riego, en plantas jóvenes de quillay. Los resultados mostraron que la concentración de contaminantes

afecta negativamente el F_v/F_{mPD} . El efecto es mayor (con significancia estadística) sobre plantas regadas, que presentan potenciales hídricos (Ψ_{PD}) promedio de -0,5 MPa, que sobre las plantas con restricción hídrica moderada (Ψ_{PD} promedio de -2 MPa).

El CO es el gas contaminante que tiene un mayor efecto sobre el F_v/F_{mPD} de plantas regadas. El MP y O₃, los principales contaminantes en Santiago, son responsables de la reducción de F_v/F_{mPD} , en las temporadas de otoño-invierno y primavera-verano, respectivamente, en las plantas jóvenes de quillay con restricción hídrica moderada.

Basado en los resultados de este estudio, es posible proponer el uso de quillay en el arbolado urbano utilizando un sistema de ciclo de riego que ayude a mitigar el efecto de la contaminación, sin generar efectos negativos en su desarrollo, por lo que se requieren mayores estudios en esta temática.

Effects of particulate matter and gases emitted by diesel vehicles on the photosynthetic yield of *Quillaja saponaria* Mol. under two irrigation levels

SUMMARY

The city of Santiago, Chile, has frequent critical episodes of atmospheric pollution during the winter season. The current associated Chilean regulations are based on levels of fine particulate matter (PM_{2.5}), among other factors. Diesel vehicles are important contributors to the emissions of fine particulate matter into the atmosphere and constitute one of the most critical pollutants to human health. The number of diesel vehicles has increased steadily in Santiago.

Plants are key as tools for pollution mitigation. The native species of persistent leaves quillay (*Quillaja saponaria* Mol.), is one of the native species most frequently used as urban trees in Santiago, hence the interest in knowing how and to what extent vehicle emissions affect its physiology.

The aim of this work is to analyze the effect of emissions of a diesel vehicle on the maximum quantum yield (Fv/Fm_{PD}) of the photosystem II (PSII) of quillay plants under two irrigation levels.

The effects of some polluting gases and of PM emitted by a diesel vehicle on the Fv/Fm_{PD} on these young quillay plants were studied, using a sampling method in a growth chamber.

Results of the study showed that the concentration of contaminants negatively affects the F_v/F_{mPD} . The effect is greater and statistically significant on irrigated plants, which have water potential (Ψ_{PD}) averages of -0.5 MPa, than on plants with moderate water restriction (Ψ_{PD} average of -2 MPa).

CO is the polluting gas which has a greater effect on the F_v/F_{mPD} of irrigated plants. PM and O₃, the main pollutants in Santiago during the fall-winter and spring-summer seasons, respectively, are responsible for the reduction of F_v/F_{mPD} , in young quillay plants with moderate water restriction.

Based on the results of this study, we propose the use of quillay subjected to moderate water to help mitigate the effect of pollution, without affecting its development, as an appropriate species for urban tree planning. More studies about this subject are needed.

1. INTRODUCCIÓN

Santiago de Chile es una de las capitales con mayor contaminación atmosférica del mundo. A pesar del establecimiento de acciones y estrategias conducentes a disminuir los índices de contaminación, éstos continúan por sobre las normas chilenas y por cierto por sobre las recomendaciones de la Organización Mundial de la Salud (WHO, 2018). En ello inciden las características meteorológicas y geográficas naturales de la cuenca en que se ubica la ciudad, así como también la actividad antropogénica desarrollada en ella (Morales, 2006).

Las emisiones de fuentes móviles en particular, han sido tema de preocupación debido al gran incremento del parque vehicular. Para el año 2016-2017 la tasa de crecimiento fue del 4,63% (INE, 2019), mientras que para el año 2018 el número de vehículos alcanzó a 5.498.895, representando un 5,94% de incremento respecto al 2017 (INE, 2019). En consecuencia, existe un crecimiento continuo de las emisiones, a pesar de que las emisiones individuales de los vehículos nuevos son menores, lo que acentúa la necesidad de sugerir acciones que puedan ayudar a combatir esta presión creciente sobre la atmósfera. Los vehículos diésel son importantes emisores de NOx y de material particulado MP2,5. En la Región Metropolitana los vehículos emiten ~23.000 toneladas de NOx por año; junto con los compuestos orgánicos volátiles (COVs), los NOx son precursores del ozono troposférico, cuyas concentraciones en primavera-verano superan varios días su norma primaria en la comuna de Las Condes, por ejemplo (SINIA, 2017).

El material particulado (MP), emitido por los motores diésel (DPM por su sigla en inglés), ha sido de especial preocupación en los últimos años, porque contiene compuestos químicos tóxicos, incluidos, por ejemplo, los hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAP). Algunos de estos HAP son considerados cancerígenos o mutagénicos, causando daños al material genético humano (Peter *et al*, 2003). La evidencia disponible indica que existen además otros efectos adversos para la salud asociados a la exposición a DPM, incluido síntomas cardiorrespiratorios y enfermedades cardiovasculares, relacionados con la misma exposición (Steiner *et al.*, 2016; Pope y Dockery, 2006).

Los árboles pueden generar una serie de beneficios ambientales. En el contexto de la contaminación atmosférica, los árboles son un fuerte aliado para la descontaminación y pueden contribuir a mejorar la calidad del aire por la vía de la absorción y captura de MP y gases (Escobedo, 2008). Como función primaria, las especies arbóreas fijan carbono mediante el proceso de fotosíntesis. Los estomas de las hojas son las estructuras responsables del intercambio gaseoso CO₂, O₂ y vapor de agua (Dhir, 2016).

Para cuantificar los efectos del medio ambiente urbano en el crecimiento de las plantas es necesario medir y monitorear la fotosíntesis y su comportamiento bajo diferentes concentraciones de contaminantes. Para ello, se seleccionó la especie quillay (*Quillaja saponaria* Mol.), ya que es una de las especies nativas que mayor densidad arbórea presente en el arbolado urbano de Santiago de Chile (Hernández y Villaseñor, 2018). Además, es de

hojas persistentes, es decir, que renueva sus hojas constantemente durante su ciclo de vida.

El objetivo de este estudio es investigar el efecto de las emisiones del tubo de escape de un vehículo diésel sobre el rendimiento cuántico máximo del fotosistema II (F_v/F_{mPD}) en plantas de *Quillaja saponaria* Mol., sometidas a dos niveles de riego.

2. HIPÓTESIS Y OBJETIVOS

2.1. Hipótesis

Las especies arbóreas tienden a saturar su superficie foliar de material particulado, en algunos casos incluso dificultando el intercambio gaseoso foliar a través de sus estomas; también es posible que ciertos gases emitidos por un vehículo motorizado perjudiquen el sistema fotosintético de la planta. Las altas concentraciones de contaminante aportadas por un vehículo diésel sumada a una baja disponibilidad hídrica, debiesen ser más perjudiciales que en una planta sin restricción hídrica.

2.2. Objetivo general

Cuantificar las concentraciones de material particulado grueso y fino ($MP_{2,0-10}$ y $MP_{2,0}$), y algunos gases emitidos y formados desde un vehículo diésel (CO_2 , CO y O_3), con el fin de evaluar sus efectos sobre el rendimiento cuántico máximo del fotosistema II (F_v/F_{mPD}) en plantas jóvenes de *Quillaja saponaria* Mol., sometidas a dos niveles de riego (sin y con restricción hídrica).

2.3. Objetivos específicos

- 1.- Cuantificar el material particulado MP_{2,0-10}, MP_{2,0}, CO y CO₂ emitidos por el tubo de escape de un vehículo diésel para evaluar su efecto en las plantas.

- 2.- Cuantificar el O₃ formado en el proceso químico que involucra al CO y NO_x provenientes de las emisiones del tubo de escape del vehículo diésel en presencia de luz con el fin de evaluar su efecto en las plantas.

- 3.- Analizar el efecto de la concentración de los contaminantes generados por el tubo de escape de un vehículo diésel, sobre el rendimiento cuántico máximo del fotosistema II (F_v/F_{mPD}) a pre-alba, en plantas jóvenes de *Quillaja saponaria* Mol., con y sin restricción hídrica.

3. MARCO TEÓRICO

3.1. Características del material particulado

El material particulado o aerosol atmosférico, es un contaminante de naturaleza compleja, pues tiene diversas características físicas (masa, tamaño, densidad) y variada composición química (contiene compuestos orgánicos e inorgánicos); dichas características son importantes para determinar el tipo y magnitud de sus fuentes de emisión y de sus efectos sobre la salud humana (Préndez *et al.*, 2007).

El material particulado puede ser biogénico o antropogénico, primario o secundario. El MP primario corresponde a la emisión directa del contaminante a la atmósfera, mientras que el secundario se forma por reacciones químicas homogéneas o heterogéneas en la atmósfera, como por ejemplo los ácidos y sales formados a partir de SO_x y NO_x. Su formación es posible, por una parte, por la condensación de gases enfriados después de su emisión, los cuales se añaden a partículas ya existentes y se combinan entre sí, aglomerándose y formando partículas de mayor tamaño. Por otra parte, también es posible la formación de MP secundario en las nubes o en la neblina, en los cuales los gases condensados sirven de núcleo de condensación (MMA, 2015).

El suelo, es una fuente natural importante de MP. La composición química de estas partículas puede variar según la geología de la zona, pero en general los suelos naturales se componen de silicatos (cuarzo, SiO₂), kaolinitas (Al₂Si₂O₅(OH)₄), halitas (K(Al,Mg)₃SiAl₁₀(OH)), feldespatos (KAlSi₃O₈, (Na o Ca)(AlSi)₄O₈), calcitas (CaCO₃), dolomitas (Ca o Mg)(CO₃)₂ y cantidades menores de sulfato de calcio hidratado (CaSO₄·2H₂O) y óxidos de hierro (FeO, Fe₂O₃). Otra fuente natural de MP son los aerosoles marinos, los cuales están constituidos principalmente por NaCl y sulfatos, principalmente Na₂SO₄, MgSO₄ y K₂SO₄. Otras emisiones de mineral primario provienen de fenómenos volcánicos (Morales, 2006).

Las partículas antropogénicas están asociadas, por lo general, a zonas urbanas e industriales. El MP primario proviene de la erosión y abrasión del transporte vehicular, como también de actividades domésticas, de servicios

agrícolas e industriales, construcción, minería, etc. El MP antropogénico secundario está constituido principalmente por sulfatos, nitratos y compuestos orgánicos que provienen de reacciones químicas generadas en la atmósfera sobre los gases precursores de estas especies, SO₂, NO_x y los compuestos orgánicos volátiles, los cuales provienen, mayoritariamente de procesos de combustión (Morales, 2006).

Para clasificar el MP se necesita definir ciertas características, entre ellas su tamaño; para ello se define su diámetro aerodinámico como el diámetro de una esfera de densidad 1gcm⁻³ que tiene la misma velocidad de sedimentación gravitacional que la partícula en cuestión (Kulkarni, 2011).

Desde el punto de vista de la salud humana, el tamaño de los aerosoles se divide en una fracción gruesa, de diámetro aerodinámico entre 10 y 2,5 µm, y una fracción fina, de diámetro aerodinámico igual o menor a 2,5 µm, denominadas MP_{2,5-10} y MP_{2,5}, respectivamente. La fracción respirable o inhalable corresponde a la suma de las fracciones fina y gruesa (Préndez *et al.*, 2007).

3.1.1. Características del material particulado diésel (MPD)

Un tipo importante de MP antropogénico primario es el MPD. El motor diésel es un motor de combustión interna desarrollado por el Dr. Rudolf Diesel. Este motor usa cilindros convencionales y arreglos de pistones comunes a otros motores de combustión interna como el motor a gasolina, con el cual hay una gran similitud entre sus componentes.

En teoría, los motores diésel tienden a funcionar con más eficiencia de combustible que los motores a gasolina debido a relaciones de compresión mucho más altas y a una mayor duración de la combustión, lo que significa que la temperatura aumenta gradual y lentamente, permitiendo que más calor se convierta en trabajo mecánico.

El diésel es una mezcla de hidrocarburos que en su combustión idealmente debería producir sólo CO_2 y vapor de agua. La realidad es que produce una combustión incompleta, donde reaccionan mezclas de compuestos a altas temperaturas y presión, combustión de aceite lubricante en el motor y aditivos del aceite. Entre estos subproductos se encuentran: MP, NO_x , HC, CO, hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAPs), fracción orgánica soluble (FOS), aldehídos, SO_2 y óxidos metálicos (Figura N°1). La composición del MP emitido por un motor diésel corresponde a carbón elemental, cenizas y componentes volátiles derivados de la no quema y/o quema parcial de combustible, aceite lubricante y sulfatos (Soto, 2008); se forman en la cámara de combustión donde los componentes volátiles se transforman de fase gaseosa a partículas expulsadas eventualmente por el tubo de escape hacia la atmósfera.

La fracción sólida de MP está compuesta principalmente de carbono elemental, dispersado como carbono negro u hollín. Esta fracción de MP resulta de la combustión heterogénea en motores diésel, donde las partículas sólidas son precursoras. Otro componente de la fracción sólida es la ceniza o ceniza metálica, la cual es generalmente una mezcla de sulfatos, fosfatos y

óxidos de Ca, Zn y Mg. También incluye impurezas como óxidos metálicos por acción del aceite lubricante tales como óxidos de Fe, Cu, Cr y Al, entre otros (Soto, 2008).

La fracción orgánica soluble (FOS), corresponde a hidrocarburos absorbidos/adsorbidos en las partículas de carbono y presentes en forma de gotas en fracciones orgánicas solubles de partículas diésel. La proporción de FOS en el MP total podría ser significativo dependiendo del motor. Las partículas con bajo contenido de FOS se llaman partículas secas. En cambio, cuando tiene un alto contenido de FOS, se denominan partículas húmedas (Soto, 2008).

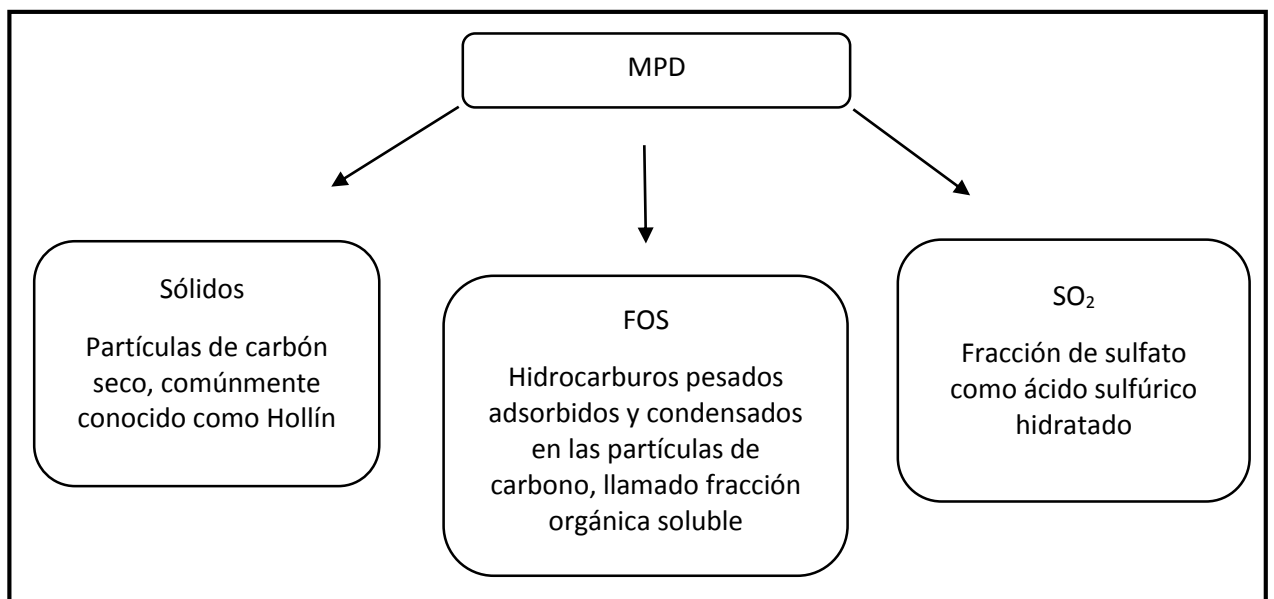
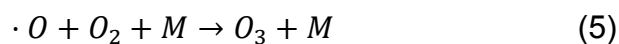
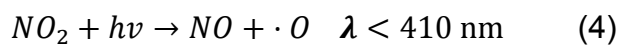
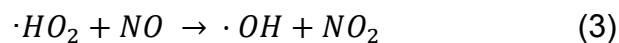
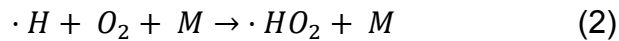
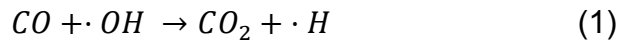


Figura N°1. División del material particulado diésel en tres fracciones básicas

El CO proviene de la combustión incompleta del vehículo. Este subproducto es de relevancia pues influye en la concentración y distribución de los oxidantes atmosféricos tales como el O₃ y los radicales ·HO₂ y ·OH (Novelli et

al., 1998). Su oxidación por la vía de los radicales $\cdot\text{OH}$ puede iniciar la producción *in situ* de O_3 en la atmósfera, a través de la siguiente secuencia:



Siendo M un catalizador y el ciclo neto: $\text{CO} + 2\text{O}_2 \rightarrow \text{CO}_2 + \text{O}_3$

3.1.2. Muestreadores de material particulado

En la actualidad existen diversos muestreadores que colectan el material particulado. Existen por tipo de monitoreo de material particulado, tales como: muestreadores diarios (24 h) de partículas en filtro, donde el canal es único o secuencial; monitor continuo (horario) tal es el caso de la microbalanza de elemento cónico oscilante (TEOM) o monitores de atenuación beta (BAM) (Schwab *et al.*, 2006). Las características principales de cada tipo de monitor son:

- Muestreadores de partículas 24 h: el aire se succiona a través del cabezal, el que selecciona el tamaño máximo del material particulado colectado por un filtro, el cual posteriormente puede ser analizado en masa y composición.

- Microbalanza de elemento cónico oscilante: es un monitor que hace una medición directa del material particulado extraído del aire ambiental a través de un filtro con un caudal constante, donde se pesa continuamente a través de micro oscilaciones y proporciona el cálculo de las concentraciones de masa en tiempo casi real.
- Monitor de atenuación beta: la masa de material particulado se captura en papel filtro, el que se expone a radiación β con el objeto de relacionar la atenuación de dicha radiación con la masa del material particulado depositado en el filtro.

3.2. Arbolado urbano

La diversidad de plantas y árboles es uno de los componentes más importantes de los ecosistemas urbanos, pues proporciona múltiples beneficios ecológicos y contribuye directamente al valor de la vida pública y el bienestar humano (Dobbs *et al.*, 2014; Scopelliti *et al.*, 2016). Los bosques urbanos más diversos pueden contribuir a la optimización de múltiples servicios ecosistémicos, principalmente porque algunas especies son mejores que otras en la prestación de un servicio en particular (Morgenroth *et al.*, 2016).

Los bosques urbanos se caracterizan por tener una estructura y composición heterogénea de la vegetación que incluye un conjunto de especies de árboles nativos y exóticos. Las características espaciales y temporales de la estructura de la vegetación urbana están definidas e impulsadas por factores biofísicos como la topografía, el clima, los ciclos biogeoquímicos y

perturbaciones como la sequía (Escobedo *et al.*, 2016), entre otros. Esta vegetación emite compuestos orgánicos volátiles biogénicos (COVsB) que reaccionan en la atmósfera con NO_x (provenientes principalmente de vehículos motorizados). Las especies reactivas generan una serie de compuestos químicos, entre los cuales destaca el ozono troposférico según se muestra en la Figura N°2 (Atkinson, 2000).

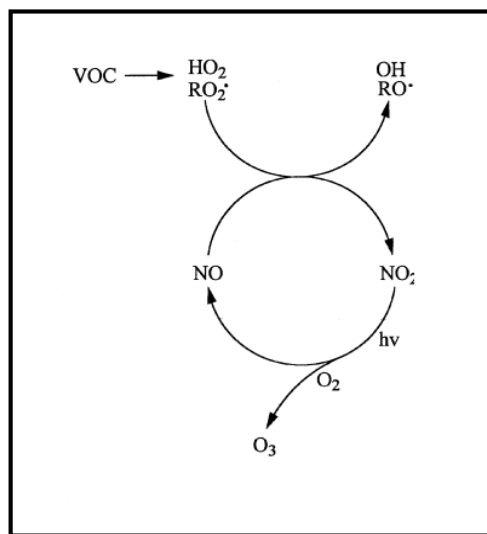


Figura N°2. Esquema de la reacción de formación de ozono a partir de compuestos orgánicos volátiles y el sistema NO-NO₂-O₃. Fuente: Atkinson, 2000.

A nivel urbano, la presencia de ozono troposférico daña a seres vivos (Ebi y McGregor, 2008). Los seres humanos tienden a tener problemas respiratorios y cardiovasculares (Leiva *et al.*, 2011; Criollo *et al.*, 2016).

Se define factor de emisión (FE), a la cantidad de compuesto emitido por una especie vegetal en un tiempo determinado en un área (en este caso, masa foliar). El FE es propio de cada especie vegetal y en la ciudad de Santiago se ha comprobado que, en general, las especies autóctonas emiten menor

cantidad de compuestos volátiles que las especies exóticas (Préndez *et al.*, 2013).

Entre los árboles nativos que emiten bajas concentraciones de COVsB se encuentra la *Quillaja saponaria* Mol. (Préndez *et al.*, 2013), nombre común quillay (Figura N° 3), árbol nativo siempre verde de la zona mediterránea chilena. Se desarrolla en Chile entre las regiones de Coquimbo (30° latitud S) y la Araucanía (38° latitud S), en ambas cordilleras como también en el valle central (Montenegro, 2002). El quillay se caracteriza por tolerar suelos pobres, altas fluctuaciones térmicas y condiciones extremas de sequía (Donoso *et al.*, 2011).

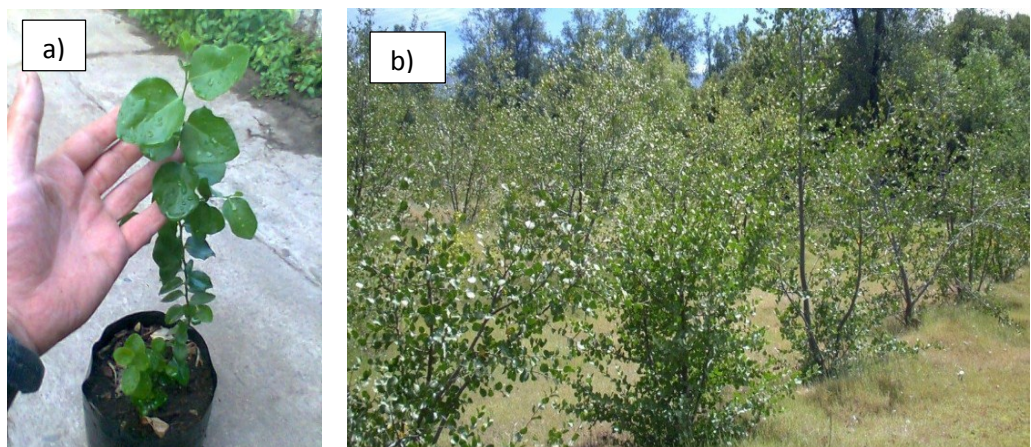


Figura N°3. Follaje y estructuras florales de *Quillaja saponaria*. a) quillay joven; b) quillay adulto. Fuente: Conaf, 2014.

Se seleccionó la especie *Quillaja saponaria* Mol. para este experimento debido a: 1) estudios sobre la diversidad arbórea presente en Santiago de Chile, el cual concluye que el quillay está presente en un porcentaje de aproximadamente un 3,5% (2014), el más alto dentro de la categoría de

nativos (Hernández y Villaseñor, 2018); 2) esta especie es esclerófila y siempre verde, es decir, renueva sus hojas (Donoso *et al.*, 2011) lo cual beneficia la mitigación permanente de contaminantes presentes en la atmósfera, a diferencia de las especies caducas que pierden sus hojas en el período de otoño-invierno, época de mayor contaminación por MP.

3.3. Fundamentos de la fluorescencia de las clorofilas y el estrés hídrico

3.3.1. Fluorescencia de las clorofilas

La mayor parte de la energía emitida por el sol es radiación electromagnética en una amplia gama de longitudes de onda. Alrededor del 9% se encuentra en la región ultravioleta, 46% en la región visible y 45% en la región infrarroja. La atmósfera absorbe aproximadamente el 10% de esta energía radiante. El resto incide sobre la superficie terrestre como balance radiativo (Valcárcel *et al.*, 2008).

La radiación fotosintéticamente activa (PAR), es la luz capaz de excitar los pigmentos de especies fotosintéticas, dentro del rango de los 400 a los 700 nm (Botero *et al.*, 2014).

La radiación que llega a los fotosistemas de la clorofila se distribuye: i) para fotosíntesis (fotoquímica); ii) se disipa en forma de calor; iii) se re-emite como fluorescencia de la clorofila (Krause y Weis, 1991). Estos tres procesos compiten entre sí, de modo que cualquier aumento en la eficiencia de uno resultará en la disminución en el rendimiento de los otros dos. Por lo tanto, se puede inferir información sobre los cambios en la eficiencia de la fotoquímica

y la disipación de calor al medir el rendimiento de la fluorescencia de la clorofila (Maxwell y Johnson, 2000). Dicha medición está relacionada con los centros de reacción del fotosistema II (PSII) y con el sistema de transporte de electrones, los cuales pueden ser detectados usando técnicas de fluorescencia de la clorofila. El PSII es altamente sensible y se daña fácilmente por temperaturas extremas, exceso de radiación, falta de nutrientes y limitaciones hídricas. Por lo tanto, la fluorescencia de la clorofila se usa ampliamente para estudiar los niveles de estrés en las plantas (Peña-Rojas *et al.*, 2004).

La relación F_v/F_m (F_v : fluorescencia variable; F_m : fluorescencia máxima) es una estimación de la eficiencia cuántica máxima de la actividad fotoquímica del PSII cuando todos los centros de reacción del PSII están abiertos (Baker y Rosenqvist, 2004). Los valores de la razón F_v/F_m de una gran variedad de plantas no estresadas adaptadas a la oscuridad se encuentra entre los 0,75 y 0,85. Su disminución indica daño por fotoinhibición (Azcón-Bieto y Talón, 2008). La fluorescencia puede proporcionar información sobre la capacidad que tiene una planta para tolerar tensiones ambientales (por ejemplo: altas concentraciones de contaminantes) y hasta qué punto esas tensiones pueden dañar el aparato fotosintético (Maxwell y Johnson, 2000).

3.3.2. Estrés hídrico

La Región Metropolitana se encuentra bajo la influencia del clima mediterráneo que presenta una marcada diferencia entre los periodos de invierno y verano. En invierno se concentran las precipitaciones y las bajas

temperaturas, mientras que en el período estival ocurre una baja disponibilidad hídrica, acompañada de altas temperaturas y elevada radiación solar (Santibáñez, 1990). Estas condiciones de verano generan múltiples condiciones de estrés en las plantas.

El estrés hídrico es uno de los factores que más limita el crecimiento, la composición y la distribución de las especies en climas mediterráneos (Donoso *et al.*, 2011). El déficit hídrico afecta varios aspectos del funcionamiento de las plantas, tales como el metabolismo celular (baja fijación de CO₂), el crecimiento y la fotosíntesis, entre otras (González-Cruz y Pastenes, 2012; Azcón-Bieto y Talón 2008).

El transporte de agua es una parte integral del proceso de crecimiento de una planta, ya que una variedad de procesos relacionados con el crecimiento, incluyendo la formación y expansión de las células vegetales, son dependientes del turgor y del volumen celular (Azcón-Bieto y Talón 2008; Taiz y Zeiger 2002). Además, bajo condiciones de déficit hídrico, el aparato fotosintético sufre inhibición de la fotosíntesis causada por exceso de radiación. Es decir, cuando se tienen potenciales hídricos bajos, la fotosíntesis se puede ver alterada por efectos que no involucran a los estomas, dado principalmente por una reducción en la actividad de los fotosistemas II (PSII) y en consecuencia, en reacciones de transferencia de electrones (Peña-Rojas *et al.*, 2018).

El potencial hídrico (Ψ) se define como la capacidad de las moléculas de agua para moverse en un sistema particular; esta variable se refiere a la medida de la energía libre del agua en el sistema. Este concepto permite determinar el sentido de los intercambios hídricos entre las diferentes partes de la planta y se utiliza para expresar el estado hídrico de la planta (Azcón-Bieto y Talón, 2008).

El quillay es una especie arbórea que no necesita grandes cantidades de agua para sobrevivir (Donoso *et al.*, 2011). Tiene cualidades económicas y ecológicas, lo que lo perfila como un buen candidato para reforestación de áreas urbanas.

4. MATERIALES Y MÉTODOS

4.1. Materiales y reactivos

- Pinzas planas de acero inoxidable marca C. K. Tools.
- Filtros de teflón marca Pall® de 47 mm de diámetro y 2 µm de tamaño de poro y filtros de policarbonato marca SPI Supplies® de 47 mm de diámetro y de 8 µm de tamaño de poro.
- Cápsulas de poliestireno tipo Petri de 50 mm de diámetro esterilizadas.
- Guantes de polietileno.
- Metanol de calidad analítica marca Merck.
- Fuentes radiactivas selladas de Po-210 y Am-241. Oxford.
- 40 plantas de quillay de 2 años aproximadamente. Vivero Antumapu.

4.2. Equipos y software

- Muestreador Stacked Filter Unit (SFU) MP10 tipo Gent diseñado por UC Davis.
- Cámara de acondicionamiento anaeróbica para masado de filtros, Plabs-Labs INC.
- Balanza analítica precisión 0,01mg, Precisa 40 SM-200A.
- Muestreador de gases CO, CO₂ y O₃ Aeroqual AQ-200

- Fluorómetro modulado portátil Mini-PAM II (Photosynthesis Yield Analyzer, Walz)
- Cámara de presión Sholander PMS Instrument model 1000
- Lámpara Apollo 9 XPE CREE 405W (Rango de longitud de onda: 430 - 660 nm).
- Termómetro MIN-MAX Haut-TOP-OBEN e Higrómetro de Pelo.
- IBM SPSS Statistics 1999.
- Cámara de crecimiento de 3x3x2 m
- Vivero Antumapu
- Furgoneta 4x2 diésel de 1,3 L de cilindrada, con inyección electrónica. Categoría Euro IV (MP=0,025 g/km; CO=0,50 g/km; HC + NOx = 0,30 g/km; NOx=0,25 g/km. Fuente: Dieselnets.com)

4.3. Lugar de muestreo

El muestreo se efectuó en una cámara de crecimiento de 3x3x2 m de largo, alto y ancho, respectivamente (figura 4a), instalada al interior del aserradero de la Facultad de Ciencias Forestales y Conservación de la Naturaleza de la Universidad de Chile; está provista de una doble puerta para evitar al máximo la interacción con variables exteriores durante el experimento: temperatura, radiación fotosintéticamente activa (PAR) y humedad relativa: En la parte

superior, la cámara cuenta con una lámpara para generar fotosíntesis en la especie arbórea a estudiar.

4.4. Método de colección del material particulado

El muestreador SFU (figura 4b), se compone de un cabezal MP₁₀ con un 50% de eficiencia de corte que dispone en serie dos tipos de filtros, ambos de 47 mm de diámetro: uno de policarbonato con tamaño de poro de 8 μm que colecta la fracción gruesa del MP (10 μm -2 μm) y otro de teflón con tamaño de poro de 2 μm que colecta la fracción fina ($\leq 2 \mu\text{m}$) (Maenhaut, 1994).

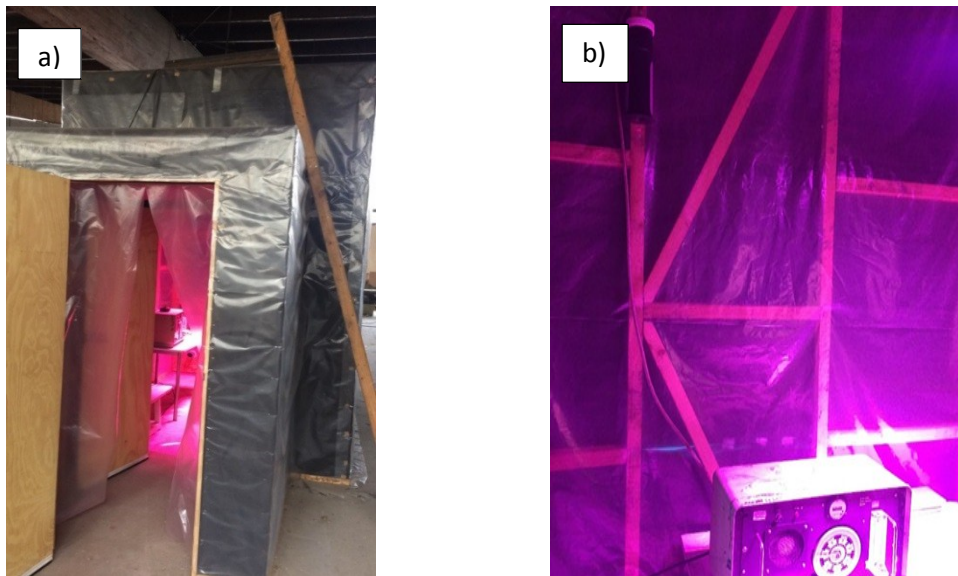


Figura N°4. Lugar de muestreo. a) Cámara de crecimiento, Campus Sur, Universidad de Chile; b) muestreador, colector de MP SFU (Stacked Filter Unit).

La gravimetría de los filtros consiste en el masado de los filtros antes y después del muestreo, al interior de una cámara con temperatura y humedad

relativa controladas para garantizar la confiabilidad de las determinaciones de masa de MP (Préndez *et al.*, 1982). La cámara posee una balanza analítica de 0,01 mg de precisión en la cual se masan los filtros a temperaturas promedio de 25 °C y humedad relativa de 37 ± 3 % con el objeto de prever posibles pérdidas de compuestos volátiles o semi-volátiles y agua, y evitar la proliferación de microorganismos. Adicionalmente se colocan fuentes selladas de Po-210 (emisión alfa) para evitar la carga electrostática que perjudica la manipulación de los filtros y que podría causar posibles errores en la medición. Las partículas alfa del Po-210 ionizan el aire adyacente y neutralizan la electricidad estática en las superficies de los filtros y balanza en contacto con el aire.

El masado de filtros se determina siguiendo el siguiente protocolo: 1) masar dos tipos de filtros (de teflón y de policarbonato) 10 veces hasta tener un promedio de ellos (los cuales siempre permanecerán dentro de la cámara). Este promedio se definirá como estándar certificado y será el blanco corrector (estándar); 2) masar el filtro estándar, pero ahora hasta obtener tres valores iguales; a esta medición le llamaremos estándar de la medición k; 3) masar cada filtro hasta obtener tres valores iguales, los cuales serán expuestos al/ a los contaminantes.

La masa de MP será la diferencia entre la masa corregida del filtro con material y sin él. La desviación estándar asociada a la medición corresponde al error propagado en las diferentes operaciones matemáticas calculadas.

El masado de cada filtro sin MP está definido por la siguiente ecuación:

$$F_{kN} = F_k \left(\frac{STD_k}{STD_c} \right) \quad \text{Ecuación N}^\circ 1$$

Donde: F_{kN} es la masa del filtro normalizado sin MP de la medición k , F_k es la masa del filtro sin MP de la medición k , STD_k es la masa del filtro estándar (blanco) de la medición k y STD_c es el mismo filtro estándar (blanco), pero calculado como estándar certificado y que no depende de k .

Análogamente para el masado de filtro con MP, se tiene:

$$F_{kN}' = F_k' \left(\frac{STD_k'}{STD_c} \right) \quad \text{Ecuación N}^\circ 2$$

Donde F_{kN}' es la masa del filtro normalizado con MP de la medición k , F_k' es la masa del filtro con particulado de la medición k , STD_k' es la masa del filtro estándar (blanco) de la medición k previo a la medición de F_k' y STD_c es el mismo filtro estándar (blanco) pero calculado como estándar certificado y que no depende de k .

La diferencia de masa entonces (en mg), está definida por:

$$\Delta F_k = F_{kN}' - F_{kN} \quad \text{Ecuación N}^\circ 3$$

El volumen normalizado del SFU se calcula a partir del flujo al cual opera el muestreador (17 L min^{-1}) y el tiempo total de muestreo. Todo esto, considerando presión y temperatura estándares. La ecuación N^o4 da cuenta del cálculo del volumen normalizado:

$$V_N = V_x \left(\frac{P_x}{P_N} \right) \left(\frac{T_N}{T_x} \right) \quad \text{Ecuación N°4}$$

Donde, V_x es el volumen calculado (m^3), V_N el volumen normalizado (Nm^3), P_x la presión atmosférica promedio durante el muestreo, P_N la presión atmosférica en condiciones normales (1 atm), T_x la temperatura promedio durante el muestreo y T_N la temperatura en condiciones normales (298,15 °K).

La concentración de material particulado será el cociente entre la diferencia de masas corregida de los filtros y el volumen normalizado, es decir:

$$C_{MP} = \frac{\Delta F_k \cdot 1000}{V_N} \quad \text{Ecuación N°5}$$

Donde C_{MP} es la concentración de MP en $\mu g/m^3 N$ y 1000 es una corrección de conversión de mg a μg .

El cálculo de concentración de material particulado viene con errores asociados a la medición de las variables tanto para la masa de MP como para el volumen asociado al muestreador y las condiciones ambientales que pudiesen generar un error propagado.

Para operaciones de multiplicación o división de variables (como, por ejemplo, la Ecuación N°5), el resultado “y” y su desviación estándar “ s_y ” se calculan mediante las siguientes ecuaciones:

$$y = \frac{a(\pm s_a) \cdot b(\pm s_b)}{c(\pm s_c)} = \frac{a \cdot b}{c} \quad \text{Ecuación N°6}$$

$$\pm s_y = y \sqrt{\left(\frac{s_a}{a}\right)^2 + \left(\frac{s_b}{b}\right)^2 + \left(\frac{s_c}{c}\right)^2} \quad \text{Ecuación N°7}$$

Donde $a(\pm s_a)$, $b(\pm s_b)$ y $c(\pm s_c)$ son variables o medias de variables junto a sus desviaciones estándar (asociado al error de cada variable).

La colección de MP se realizó en el período comprendido entre agosto y diciembre del año 2017, en períodos de colección de 24 horas.

4.5. Método de cuantificación de gases

El muestreador de CO₂, CO y O₃ se muestra en la figura N°5 (Aeroqual). Este equipo portátil se utiliza para cuantificar los tres gases, operando con un sensor particular para cada gas. Son sensores electroquímicos con una región conductora que varía según la presencia de gases reductores u oxidantes adsorbidos en su superficie (Peterson, 2017). Aeroqual usa una combinación de tecnologías de sensores; las utilizadas en nuestro experimento se muestran en el cuadro N°1.

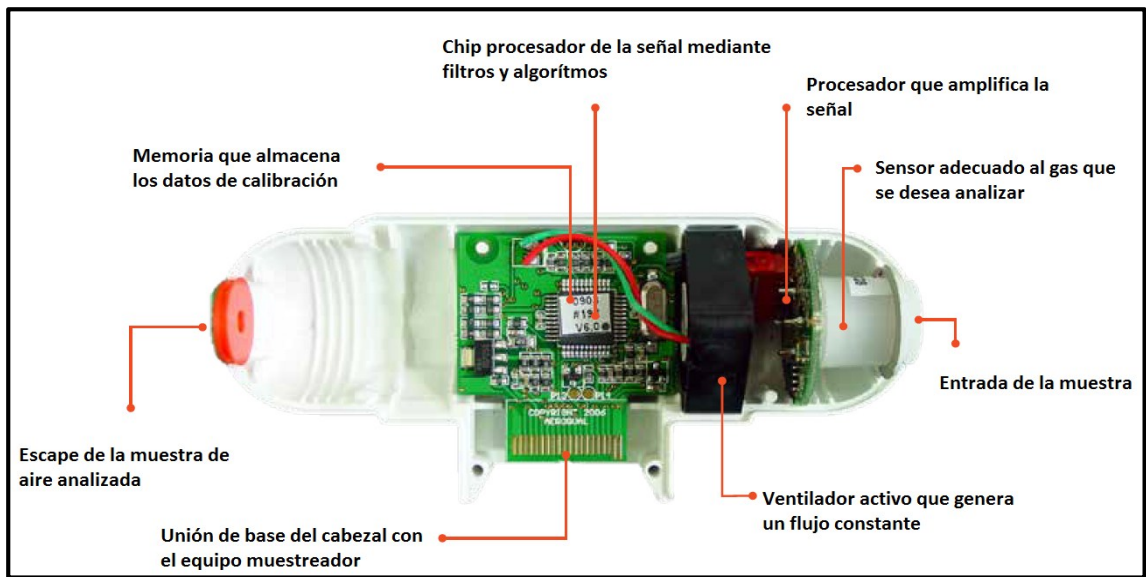


Figura N°5. Partes específicas del equipo Aeroqual AQ-200 utilizado para el muestreo de los gases CO₂, CO y O₃. Fuente: Aeroqual.com

Cuadro N°1. Especificaciones de cada sensor (cabezal) utilizado para la cuantificación de cada gas.

Gas medido	Tipo de Sensor	Rango de medición (ppm)	Límite de Detección (ppm)	Precisión (ppm)	Resolución (ppm)
O ₃	GSS	0-10	0,02	<±0,1 + 15%	0,01
CO ₂	NDIR (infrarrojo)	0-5000	20	<±20 + 5%	1
CO	GSE	0-25	0,05	<±0,5 entre 0-5 / <±10% 5-25	0,01

Fuente: Aeroqual.com

Los tres sensores presentan las siguientes características:

- Semiconductor sensible a los gases (GSS): utiliza material de detección patentado, incorporado en la corrección de la línea de

base automática (ABC) y rechazo de interferencia. Esta combinación permite una resolución en ppb ($1 \cdot 10^{-9}$) y una respuesta altamente lineal.

- Sensor infrarrojo no dispersivo (NDIR): utiliza luz infrarroja, un filtro de banda angosta y un fotodiodo para medir la intensidad de la luz en la banda de absorción de gas. La intensidad de la luz es proporcional a la concentración de gas.
- Sensores electroquímicos sensibles a los gases (GSE): generan corrientes de nano-amplificadores proporcionales a la concentración de gas. Aeroqual usa electrónica de bajo nivel de ruido para capturar estas señales, lo que resulta en niveles de detección adecuados.

4.6. Método de obtención del potencial hídrico (Ψ)

La cámara de presión Sholander utilizada en la determinación del potencial hídrico se muestra en la figura N°6. Posee un balón de gas comprimido de nitrógeno como fuente externa de presión. La medición consiste en el corte mínimo de un tallo de la planta para introducirlo en la cámara hasta registrar la presión a la cual la sabia sale del xilema y se visualiza en el extremo cortado del tallo. La presión requerida es igual, pero con signo opuesto al potencial hídrico.



Figura N°6. Cámara de presión Sholander modelo PMS 1000. Fuente: Ambimet.com

4.7. Método de obtención del rendimiento cuántico del fotosistema II (Fv/Fm)

Junto a las mediciones hídricas, se evaluó el comportamiento de la fluorescencia de la clorofila utilizando el fluorímetro modulado portátil Mini-PAM mostrado en la figura N°7. Un pulso de fotones de aproximadamente $0,5 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ se configuró a 600 Hz con el fin de determinar, a pre-alba, la señal de fluorescencia base (F_0). Para obtener la señal de fluorescencia máxima (F_m) se aplicó un pulso de saturación de fotones correspondiente a $6000 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ durante 0,8 segundos tal como señala Peña-Rojas (2018). El rendimiento cuántico máximo del fotosistema II a pre-alba se calculó como $F_v/F_m = (F_m - F_0)/F_m$.



Figura N°7. Fluorímetro modulado portátil Mini-PAM Photosynthesis Yield Analyser. Fuente: Walz.com.

4.8. Procedimiento de muestreo y mediciones fisiológicas

En cada ciclo de medición (10 ciclos) se instalaron al interior de la cámara los muestreadores de MP y de gases, junto con cuatro individuos de quillay en el centro (bajo la lámpara de luz PAR), de los cuales son dos individuos con restricción hídrica moderada y los otros dos sin restricción hídrica. Para ello, se aclimataron previamente las plantas a las condiciones hídricas de evaluación durante una semana; las plantas sin restricción hídrica se regaron cada dos días a capacidad de campo; a las plantas con restricción hídrica se les redujo el riego hasta alcanzar potenciales hídricos cercanos a $-2,5$ MPa, lo que indica que las plantas se encuentran bajo una restricción hídrica moderada (Donoso *et al.*, 2011).

Semanalmente se realizó una evaluación, para relacionar la concentración de contaminantes con la respuesta fotosintética de las plantas de quillay jóvenes. Para ello el primer día de la semana se introdujeron cuatro plantas (dos plantas según niveles de riego) con el fin de aclimatar las plantas al ciclo

lumínico (fotoperiodo) y temperatura de verano a la cual fueron expuestas en la cámara de crecimiento. Las plantas se ingresaron a la cámara un mínimo de dos días antes de comenzar el ciclo de muestreo; en general, las plantas se introdujeron 66 horas antes. Transcurrido el tiempo de adaptación a las condiciones de verano (lumínicas y térmicas) y antes de agregar el contaminante proveniente del vehículo se determinó el rendimiento cuántico máximo del PSII (F_v/F_{mPD}) y el potencial hídrico a prealba, es decir antes de que la luz artificial se encendiera de acuerdo al fotoperiodo de verano, junto con las concentraciones base de CO, CO₂ y O₃. Luego, se encendió el motor del vehículo diésel y se estabilizó durante 5 minutos; inmediatamente después se introdujo el contaminante durante 25 minutos y se encendió el muestreador SFU por 24 horas. Después de 24 horas se apagó el muestreador SFU y se midieron nuevamente el F_v/F_{mPD} , el Ψ_{PD} y los gases, siguiendo el mismo procedimiento que al inicio de la evaluación. Este mismo protocolo se repitió en los 10 ciclos de medición. Las distintas etapas involucradas en cada ocasión se especifican en la figura N°8.

4.9. Análisis estadístico

Los ensayos se diseñaron tomando en cuenta 3 factores: nivel de riego, adición del contaminante y ajuste del motor. Para los análisis de Ψ_{PD} y F_v/F_{mPD} se utilizó un modelo lineal general univariante. Mientras que, para los efectos de los gases y MP en el rendimiento cuántico máximo del fotosistema II, se utilizó un modelo bivariado, calculando la correlación de Pearson con sus niveles de significación.

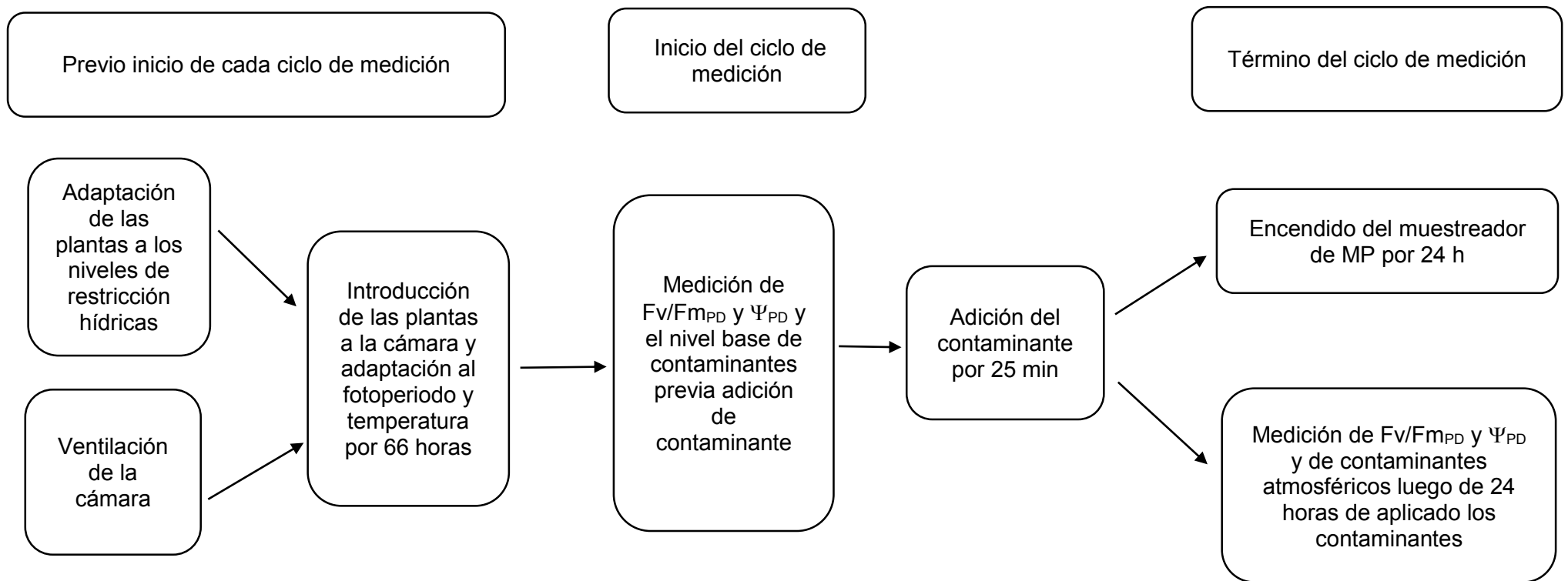


Figura N°8. Secuencia del procedimiento utilizado en cada ciclo de medición.

5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

5.1. Análisis gravimétrico del material particulado

Los resultados de las concentraciones de material particulado MP_{2,0} y MP_{2,0-10} en las 10 repeticiones efectuadas se presentan en el Cuadro N°2. La figura N°9 muestra las concentraciones de MP colectado.

Cuadro N°2. Concentraciones y error estándar propagado de material particulado fino y grueso, expresadas en $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ emitidas desde un vehículo diésel y colectadas durante 24 horas. Muestreador SFU.

Repeticón	Concentracón MP _{2,0} ($\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$)	Concentracón MP _{2,0-10} ($\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$)
1	142 ± 1,3	29,5 ± 8,8
2	129 ± 1,2	42,5 ± 8,4
3	142 ± 1,8	35,1 ± 12,4
4	151 ± 1,5	24,5 ± 10,0
5	149 ± 2,2	38,5 ± 15,0
6	157 ± 1,5	14,8 ± 10,0
7	112 ± 2,0	22,4 ± 13,6
8	116 ± 1,8	24,2 ± 12,4
9	93,1 ± 1,8	38,4 ± 12,4
10	142 ± 1,7	26,7 ± 11,5
Promedio	133 ± 20,4	29,7 ± 8,7

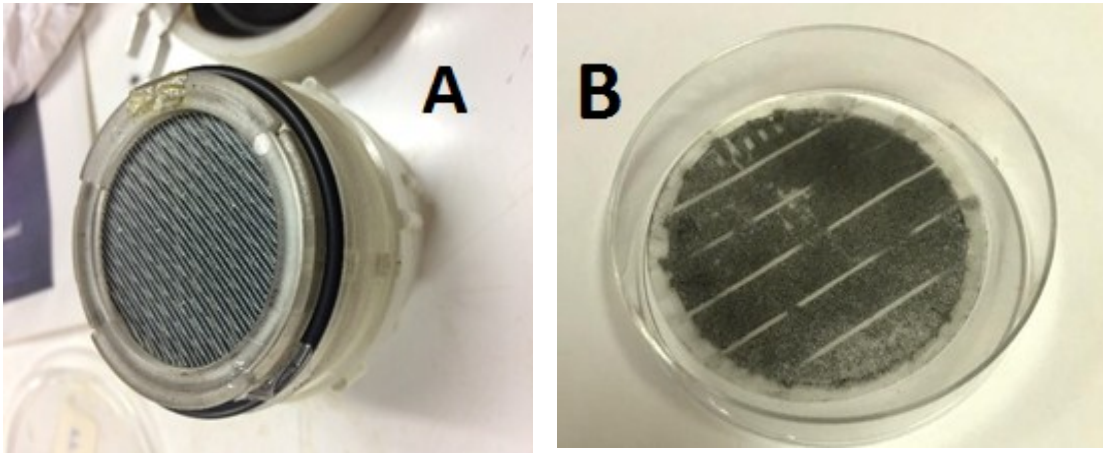


Figura N°9. Filtros con material particulado depositado. A) Material particulado depositado en filtros de teflón; B) material particulado depositado en filtros de policarbonato. Muestreador SFU.

La suma de $MP_{2,0-10}$ y $MP_{2,0}$ corresponde al MP_{10} . La concentración promedio del MP_{10} durante todo el muestreo fue de $163 \pm 19,8 \mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$, mientras que las fracciones fina y gruesa tuvieron valores promedio de $133 \pm 20,4$ y $29,7 \pm 8,7 \mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$, respectivamente. Las fracciones no correlacionan entre sí, lo cual es esperable puesto que un vehículo diésel es la mayor fuente primaria de MP fino. La concentración de $MP_{2,0}$ es mayor a la de $MP_{2,0-10}$, debido a que el motor de un vehículo diésel emite una mayor cantidad de MP fino acorde a la norma de emisiones Euro IV en la cual este vehículo está categorizado.

En Chile no existe una norma secundaria (protección sobre el ambiente y preservación de la naturaleza) para material particulado, pero si comparamos los resultados de las concentraciones con la norma secundaria de Estados Unidos para MP_{10} (24 horas) (Auffhammer, 2009), podemos destacar que en la cámara se obtuvo una concentración del orden de lo estipulado en dicha norma, correspondiente a $150 \mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$, pero en este caso con casi un 78% correspondiendo a $MP_{2,0}$.

5.2. Medición de las concentraciones de los gases CO, CO₂ y O₃

Las concentraciones en mg/m³ de CO, CO₂ y O₃ iniciales y finales, emitidos por el vehículo o formados en la cámara de muestreo, se muestran en el Cuadro N°3.

Cuadro N°3. Concentraciones de CO CO₂ y O₃, expresadas en mg/m³, antes y después de la aplicación de las emisiones del tubo de escape de un vehículo diésel en cada ciclo de medición.

Repetición	Momento de aplicación de los contaminantes	Concentración CO (mg/m ³)*	Concentración CO ₂ (mg/m ³)**	Concentración O ₃ (mg/m ³)***
1	Antes	6,4 ± 0,08	1469 ± 0,01	0,34 ± 0,29
	Después	24,8 ± 0,02	2910 ± 0,01	1,64 ± 0,06
2	Antes	3,1 ± 0,16	1061 ± 0,02	0,41 ± 0,24
	Después	20 ± 0,03	3054 ± 0,01	1,52 ± 0,07
3	Antes	BLD****	1066 ± 0,02	0,27 ± 0,37
	Después	14,6 ± 0,03	2716 ± 0,01	1,42 ± 0,07
4	Antes	BLD****	1136 ± 0,02	0,31 ± 0,32
	Después	24,5 ± 0,02	3486 ± 0,01	1,88 ± 0,05
5	Antes	BLD****	1120 ± 0,02	0,29 ± 0,34
	Después	26 ± 0,02	3342 ± 0,01	1,68 ± 0,06
6	Antes	BLD****	1061 ± 0,02	0,2 ± 0,50
	Después	11,5 ± 0,04	2592 ± 0,01	1,14 ± 0,09
7	Antes	BLD****	1062 ± 0,02	0,24 ± 0,42
	Después	1,4 ± 0,36	1886 ± 0,01	0,95 ± 0,11
8	Antes	BLD****	1196 ± 0,02	0,27 ± 0,37
	Después	10,4 ± 0,05	3342 ± 0,01	1,39 ± 0,07
9	Antes	BLD****	1062 ± 0,02	0,26 ± 0,38
	Después	5,3 ± 0,09	2910 ± 0,01	1,34 ± 0,07
10	Antes	BLD****	1061 ± 0,02	0,23 ± 0,43
	Después	2,6 ± 0,19	2825 ± 0,01	1,33 ± 0,08

* LD = 0,06 mg/m³; ** LD = 35,97 mg/m³; *** LD = 0,04 mg/m³; **** BLD: Bajo límite de detección.

Las concentraciones de CO₂ y O₃ (contaminantes secundarios) son bastante similares antes de agregar las emisiones del tubo de escape (en promedio 1129 ± 128 y 0,28 ± 0,06 mg/m³, respectivamente), lo que evidencia una buena ventilación o “limpieza” de la cámara de crecimiento, antes de empezar cada ciclo de medición. La aplicación de los gases a la cámara de crecimiento significó un aumento promedio de 13,16 ± 8,55 mg/m³ para CO, de 1993 ± 448 mg/m³ para CO₂ y de 1,15 ± 0,24 mg/m³ para el O₃; este último gas mostró un comportamiento más uniforme. El O₃ es el contaminante secundario que sólo se genera e interactúa con la planta después de que se enciende la luz (reacción química).

Las concentraciones de ozono son elevadas. No es posible comparar directamente con la norma de calidad primaria debido a que ésta exige un promedio aritmético de los valores de concentración correspondientes a 8 horas sucesivas, promedio móvil. De todas formas, dicha norma es de 120 µg/m³N, esto es 0,12 mg/m³. Las concentraciones medidas después de encendida la luz son a lo menos 10 veces superiores. Es claro que en este caso el ozono se forma por la interacción entre los NO_x y el CO emitidos por el vehículo y/o los compuestos orgánicos volátiles emitidos por las plantas, mediados por la luz. Por otro lado, el CO presenta dos tendencias diferentes entre los primeros y los últimos 5 ensayos. En el primer caso las concentraciones promedio obtenidas (20,1 ± 4,94 mg/m³) son mayores a la norma de calidad primaria ambiental, correspondiente a 10 mg/m³N como concentración de 8 horas. Después de una mantención del vehículo la emisión de CO se redujo alcanzando un promedio de 6,2 ± 4,5 mg/m³.

La correlación entre el CO y el O₃ se puede visualizar en la figura N°10. El CO es precursor del O₃ y por tanto esperable que correlacionen. Se encontró una correlación estadísticamente significativa con un $p < 0,01$. El CO explica el 93% de las variaciones de O₃, lo que podría estar indicando una preferencia por su formación vía una reacción radicalaria por sobre la reacción fotoquímica.

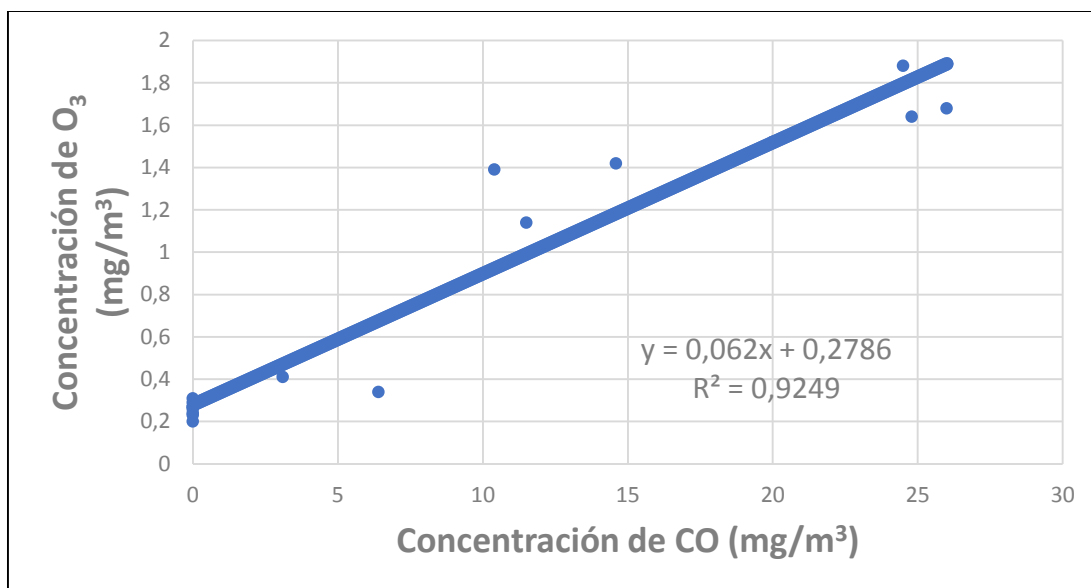


Figura N°10. Correlación entre concentración de CO y O₃ con una significancia de Pearson de $p < 0,01$ ($r = 0,962$) para los valores obtenidos en los 10 ciclos de medición (N=17).

5.3. Análisis de potencial hídrico y rendimiento cuántico máximo del PSII

Los ciclos de medición en las plantas de quillay mostraron diversos resultados para la relación de las variables. Para la variable potencial hídrico (cuadro N° 4) sólo se obtuvieron diferencias estadísticamente significativas en las plantas con diferente tratamiento hídrico (CR y SR), independientemente de la adición del contaminante. La variable arreglo del motor (SA: sin arreglo; CA: con arreglo) nunca presentó diferencias estadísticamente significativas.

Cuadro N°4. Valores medios \pm desviación estándar del potencial hídrico (Ψ_{PD}) a pre-alba para plantas con riego, CR, (N=40) y sin riego, SR (N=40), con (CC) y sin (SC) exposición al contaminante. Plantas de *Quillaja saponaria* Mol.

Arreglo Motor	Momento	Tratamiento	Media \pm desviación (MPa)
SA	SC	CR	-0,58 \pm 0,21 aA
		SR	-2,52 \pm 0,43 aB
	CC	CR	-0,70 \pm 0,16 aA
		SR	-2,94 \pm 0,46 aB
CA	SC	CR	-0,77 \pm 0,19 aA
		SR	-3,10 \pm 0,69 aB
	CC	CR	-1,06 \pm 0,18 aA
		SR	-3,52 \pm 0,78 aB

*Letras minúsculas distintas indican diferencias estadísticamente significativas entre momentos (con y sin contaminantes); letras mayúsculas diferentes indican diferencias estadísticamente significativas entre los tratamientos de riego (con y sin riego).

Para la variable dependiente F_v/F_{mPD} , se obtuvo que, manteniendo el tratamiento hídrico, pero en diferentes momentos (antes y después de agregar contaminante), existen diferencias estadísticamente significativas en el rendimiento fotosintético para plantas CR (Cuadro N°5). Esto indica que posiblemente el daño por el estrés hídrico inducido a la planta sea más perjudicial que la contaminación, dado que, en plantas sanas, la interacción con la contaminación perjudica significativamente el rendimiento cuántico máximo del PSII. En plantas con estrés hídrico moderado previo a la exposición a contaminantes, no se observan cambios en el rendimiento de la fotosíntesis.

Para el mismo momento, pero diferente tratamiento hídrico, no diferencias estadísticamente significativas debido a que el estrés inducido en las plantas fue

un estrés hídrico moderado y no severo, lo que se tradujo en una leve disminución de los valores medios del F_v/F_{mPD} .

Cuadro N°5. Valores medios \pm desviación estándar del rendimiento cuántico máximo del fotosistema II (F_v/F_{mPD}) a pre-alba para plantas con riego, CR, (N=40) y sin riego, SR (N=40), con (CC) y sin (SC) exposición al contaminante. Plantas de *Quillaja saponaria* Mol.

Arreglo Motor	Momento	Tratamiento	Media \pm desviación
SA	SC	CR	0,793 \pm 0,016 aA
		SR	0,676 \pm 0,053 aA
	CC	CR	0,474 \pm 0,084bA
		SR	0,604 \pm 0,054 aA
CA	SC	CR	0,769 \pm 0,027aA
		SR	0,708 \pm 0,057 aA
	CC	CR	0,606 \pm 0,071 bA
		SR	0,604 \pm 0,042 aA

*Letras minúsculas distintas indican diferencias estadísticamente significativas entre momentos (con y sin contaminantes); letras mayúsculas diferentes indican diferencias estadísticamente significativas entre los tratamientos de riego (con y sin riego).

5.3.1. Efecto de los contaminantes en el rendimiento cuántico máximo del PSII

5.3.1.1. Efecto en plantas con riego

Las Figuras N°11, 12, 13, 15 y 16 muestran la correlación de cada contaminante respecto al rendimiento cuántico máximo del PSII para plantas regadas, donde cada contaminante tiene una correlación negativa al 99% de confianza. El estado inicial de F_v/F_{mPD} de las plantas regadas está entre 0,72 y 0,9 y las variables se miden antes y después de adicionar el contaminante.

El CO₂ es un contaminante que resulta beneficioso para las plantas, pues es la base de su metabolismo y por lo tanto para su fotosíntesis. La Figura N°11 muestra que el CO₂ es responsable del 38% de la variación de Fv/Fm_{PD} con un coeficiente de correlación $r = -0,618$ (N=37) lo que indica una disminución del Fv/Fm_{PD} a medida que aumenta la concentración de CO₂.

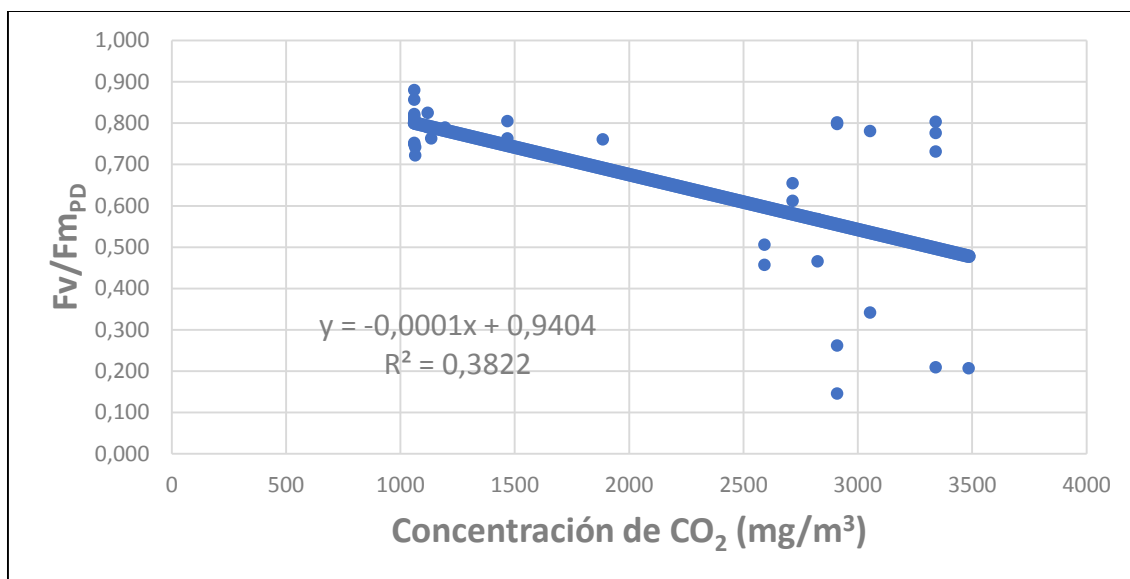


Figura N°11. Variación de Fv/Fm_{PD} vs la concentración de CO₂ para plantas de quillay con riego. Correlación de Pearson significativa para $p \leq 0,01$ ($r = -0,618$) con N=37.

De acuerdo con Reddy *et al.*, (2010), una mayor disponibilidad de CO₂ como sustrato conduciría a una mayor asimilación de carbono lo que se traduciría en una mayor fotosíntesis debido a la alta actividad de RuBisCO. Sin embargo, para concentraciones altas (mayores a la ambiental) podría ocurrir una reducción de la conductancia estomática y, por lo tanto, una reducción en la tasa de fijación de carbono, según señalan Warren *et al.*, (2007); ello podría explicar lo observado experimentalmente, en donde la correlación de concentración de CO₂ con respecto a Fv/Fm_{PD} es negativa, confirmando el comportamiento sugerido por Warren *et al.*, (2007) sin perjuicio de que otros gases y aerosoles también

contribuyen. Una exposición a largo plazo de CO₂ en altas concentraciones podría provocar una reducción en la actividad o concentración de RuBisCO, porque la cantidad de enzima necesaria para mantener la misma tasa de asimilación disminuye. Al disminuir la tasa de foto-respiración, la demanda de energía por carbono fijo disminuye implicando entonces una menor demanda de clorofila, según sostiene Dhir (2016).

La Figura N°12 muestra la correlación entre Fv/Fm_{PD} y CO con un coeficiente de correlación de Pearson de -0,742 para N=37.

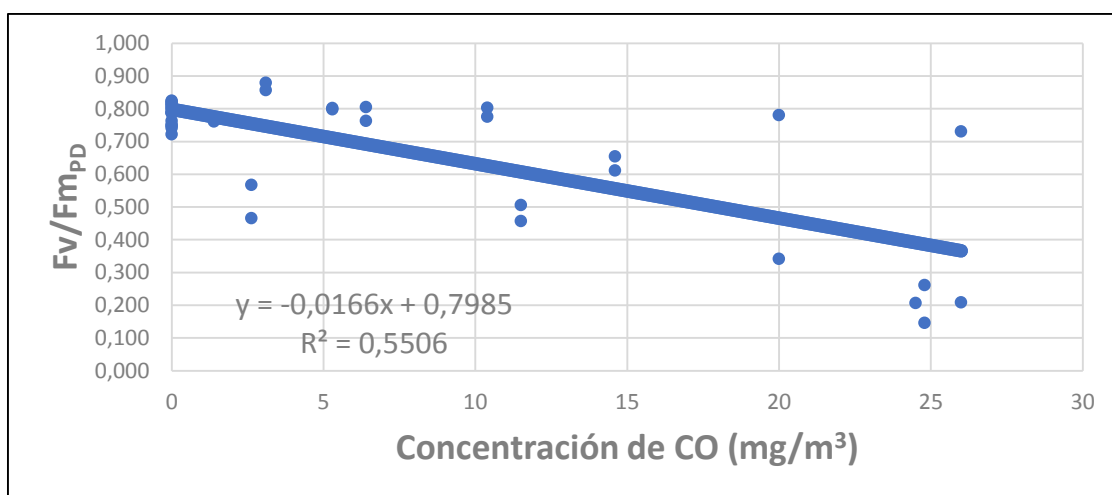


Figura N°12. Variación de Fv/Fm_{PD} vs la concentración de CO. Correlación de Pearson significativa para $p < 0,01$ ($r = -0,742$; $N = 37$).

El CO representa un 55% de la variación del Fv/Fm_{PD}. Este contaminante es precursor del CO₂ y del O₃ y es directamente emitido por el tubo de escape del vehículo diésel. Los estudios de Muneer (2014) sostienen que el CO, junto al O₃, son gases principales en la generación de especies reactivas de oxígeno (ROS, por su sigla en inglés) lo que podría explicar el daño producido a los fotosistemas y por lo tanto la disminución observada del Fv/Fm_{PD}.

La Figura N°13 muestra la correlación entre $F_v/F_{m_{PD}}$ y O_3 . Se obtuvo un coeficiente de correlación de Pearson de -0,684 para $N=37$.

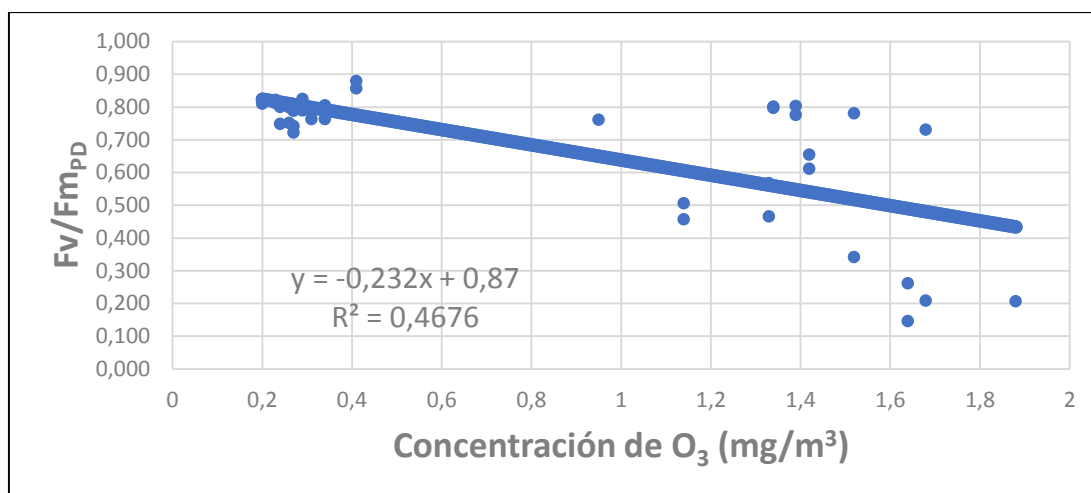


Figura N°13. Variación de $F_v/F_{m_{PD}}$ vs la concentración de O_3 para plantas de quillay con riego. Correlación de Pearson significativa para $p<0,01$ ($r=-0,684$; $N=37$).

El ozono tiene un 46% de participación en la variación del $F_v/F_{m_{PD}}$ mostrándose como un contaminante importante y esperable acorde a los estudios de fluorimetría; su correlación de Pearson es estadísticamente significativa con un coeficiente de correlación de -0,684, lo que indica que a mayor concentración de ozono existe un mayor daño a los fotosistemas.

La Figura N°14 muestra una planta regada antes y después de su interacción con los contaminantes. De acuerdo a Dhir (2016) este efecto negativo en las plantas podría deberse a la pérdida de clorofila o a la destrucción del fotosistema generado por un estrés oxidativo, debido a la presencia del O_3 el cual genera especies reactivas de O_2 que pueden causar la per-oxidación lipídica de las membranas plasmáticas de los cloroplastos y la pérdida de clorofila en las hojas, lo que explicaría la disminución en el rendimiento fotosintético observado. Otros autores señalan resultados similares en cuanto a la generación de estrés

oxidativo y reducción de fotosíntesis por efecto de contaminantes atmosféricos y MP (Noctor, 2016; Przybysz, 2014).

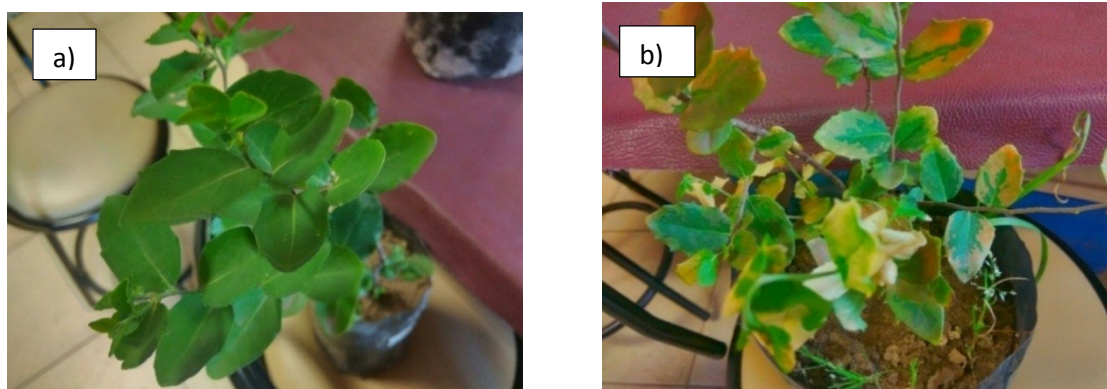


Figura N°14. a) *Quillaja saponaria* Mol. regada, antes de exponerse a los contaminantes emitidos por el vehículo diésel; b) *Quillaja saponaria* Mol. regada, después de la exposición a los contaminantes emitidos por el vehículo diésel.

La Figura N°15 muestra que la concentración del MP es estadísticamente significativa ($p < 0,01$) en las variaciones de $F_v/F_{m_{PD}}$ con una importancia del 47% y un coeficiente de correlación de $-0,692$, indicando una disminución del $F_v/F_{m_{PD}}$ con el aumento de la concentración de $MP_{2,0}$ ($N=37$).

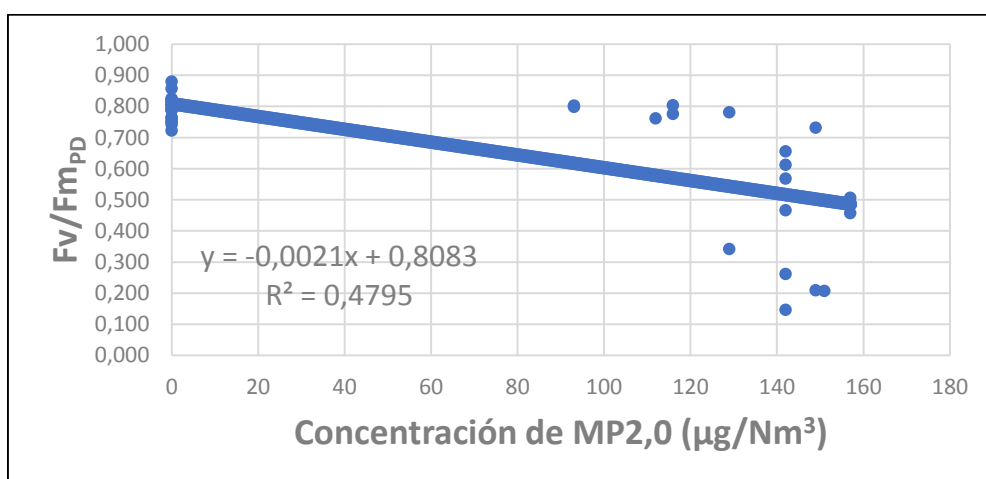


Figura N°15. Variación de $F_v/F_{m_{PD}}$ vs la concentración de $MP_{2,0}$ para plantas de quillay con riego. Correlación significativa de Pearson para $p < 0,01$ ($r = -0,692$; $N=37$).

La depositación del MP puede obstruir los estomas, reduciendo la absorción de la radiación fotosintéticamente activa. También la obstrucción afectaría al intercambio gaseoso; en el follaje disminuye la producción de clorofila. Por tanto, tomando en cuenta que el MP reduce la disponibilidad de luz y CO₂, sumado a un bajo contenido de clorofila y al aumento de la resistencia estomática, éstos afectarían negativamente a la fotosíntesis de la planta, como lo informa también Dhir, (2016).

La Figura N°16 muestra que el MP_{2,0-10} explica el 18% de las variaciones del rendimiento fotoquímico máximo y la correlación de Pearson es estadísticamente significativa para $p < 0,01$ con $r = -0,431$.

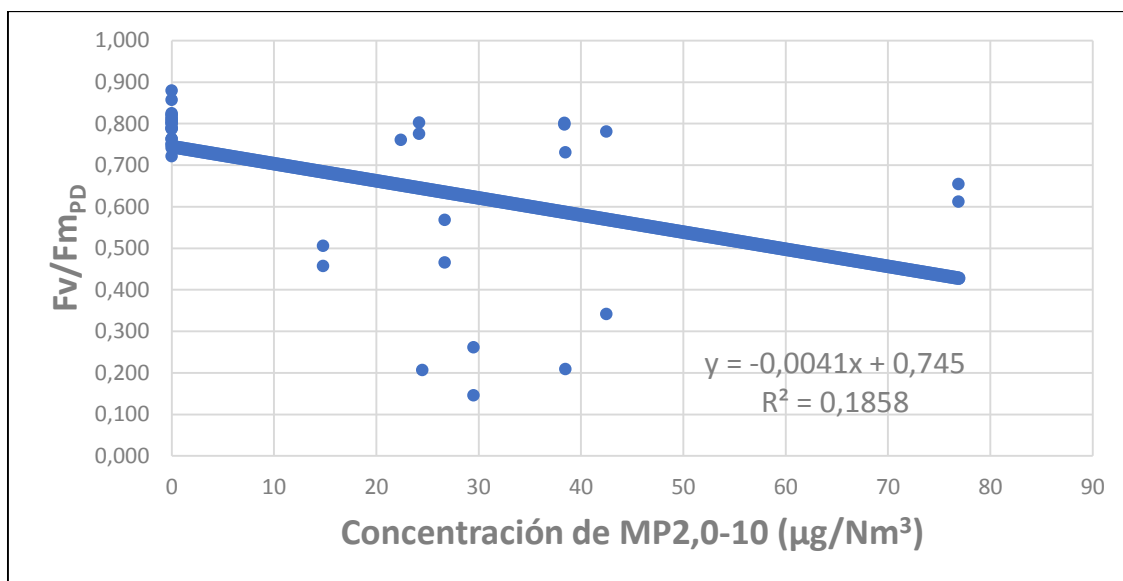


Figura N°16. Variación de Fv/Fm_{PD} vs la concentración de MP_{2,0-10} para plantas de quillay con riego. Correlación de Pearson estadísticamente significativa para $p < 0,01$ con $r = -0,431$ para $N=37$.

5.3.1.2. Efecto en plantas sin riego

Las Figuras N°17, 18, 19 y 20 muestran las correlaciones de los gases y del material particulado versus la eficiencia máxima del PSII para plantas sin riego (estrés hídrico moderado) (N=38).

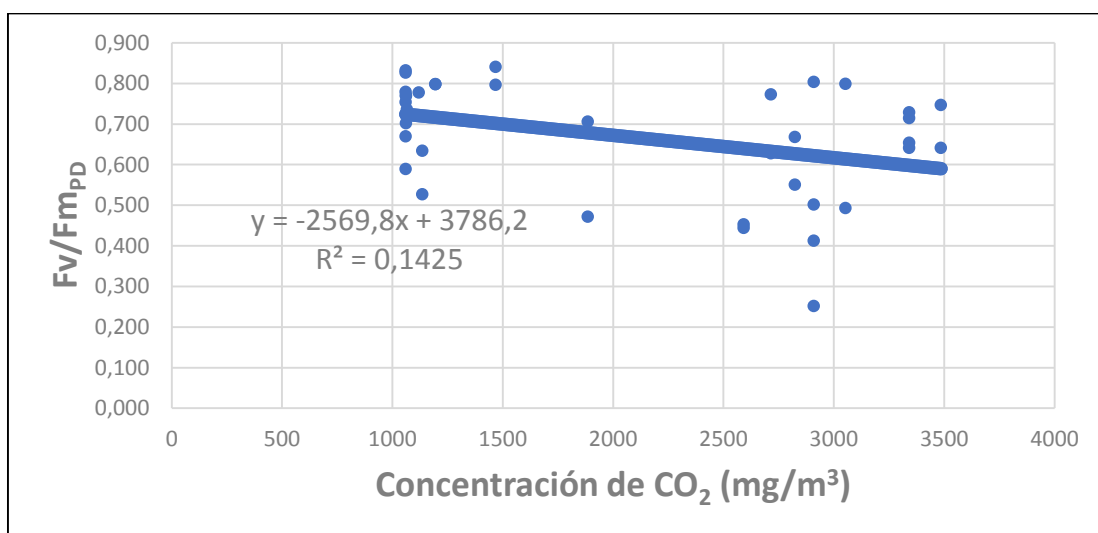


Figura N°17. Variación de Fv/Fm_{PD} vs la concentración de CO₂ para plantas de quillay sin riego. Correlación de Pearson significativa ($r=-0,378$; $p<0,05$) para N=38.

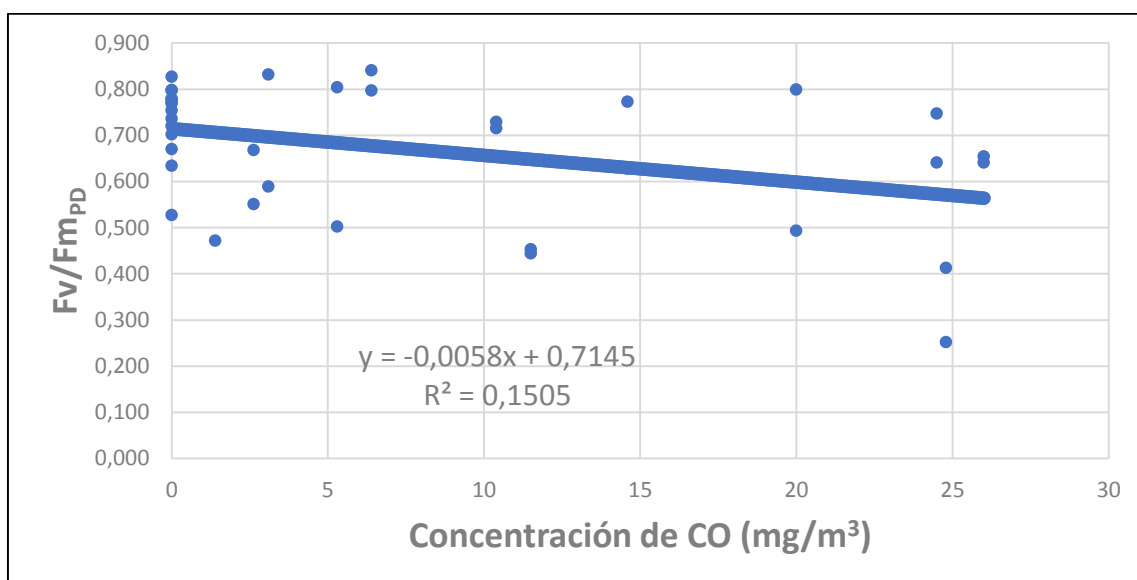


Figura N°18. Concentración de CO vs Fv/Fm_{PD} para plantas de quillay sin riego. Correlación de Pearson significativa para $p<0,05$ ($r=-0,388$; N=38).

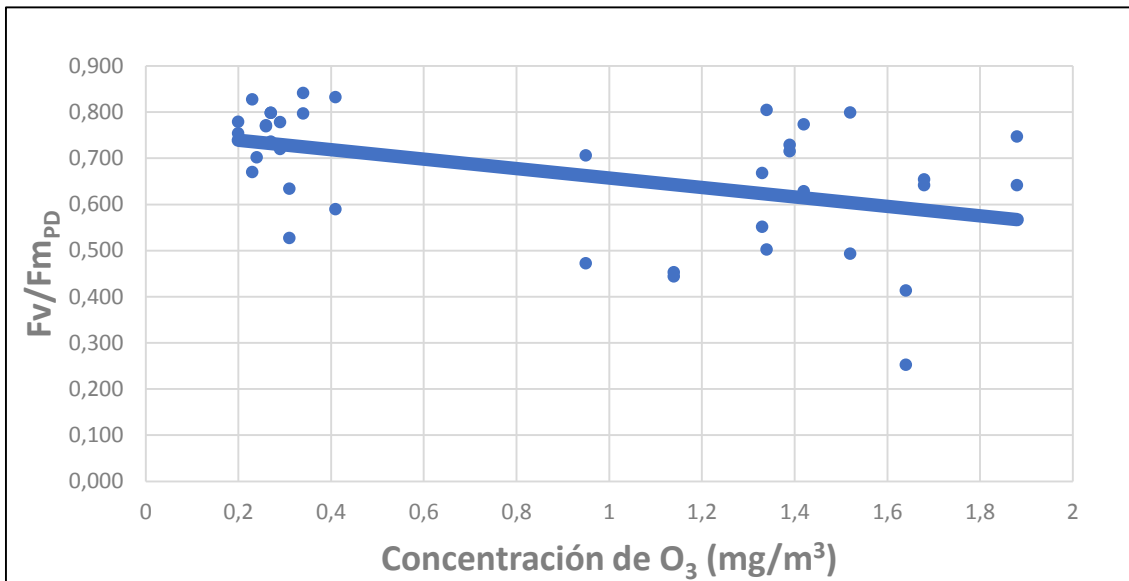


Figura N°19. Variación de $F_v/F_{m_{PD}}$ vs la concentración de O_3 para plantas de quillay sin riego. Correlación de Pearson significativa para $p < 0,01$ ($r = -0,444$; $N = 38$).

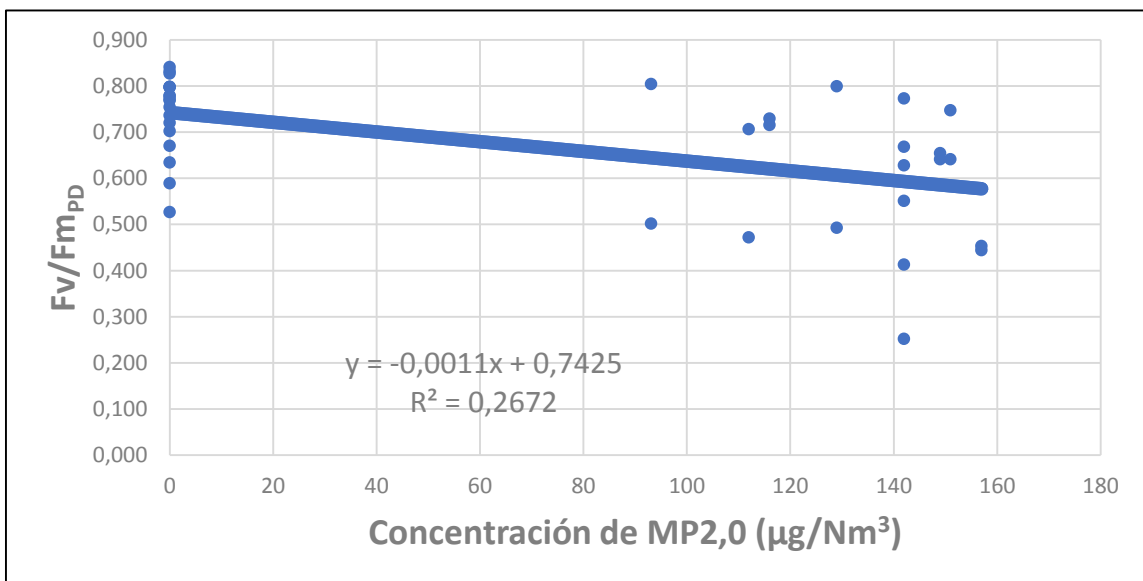


Figura N°20. Variación de $F_v/F_{m_{PD}}$ vs la concentración de $MP_{2,0}$ para plantas de quillay sin riego. Correlación de Pearson significativa para $p < 0,01$ ($r = -0,517$; $N = 38$).

El CO_2 explica el 14% de la variación de $F_v/F_{m_{PD}}$. El CO representa el 15% de la variación. El O_3 afecta en un 20% la variación de $F_v/F_{m_{PD}}$ mientras que el

MP_{2,0} explica entre un 26 y 27% dicha variación. El MP_{2,0-10} (fracción gruesa) no correlaciona con el Fv/Fm_{PD}.

Es teóricamente esperable que las concentraciones de los contaminantes que afecten la eficiencia máxima del PSII sean menores en el caso de plantas no regadas que en las regadas. Los resultados obtenidos no confirman este supuesto dado que muestran diferencias estadísticamente significativas ($p < 0,05$) para plantas con riego en las variaciones de Fv/Fm_{PD} con y sin presencia de contaminante; mientras que, para plantas sin riego, el “efecto” de estos contaminantes es menor y la variación de Fv/Fm_{PD} no es estadísticamente significativa ($p > 0,05$).

Por otra parte, el análisis de cada contaminante versus el efecto que provocaba en el rendimiento cuántico máximo del PSII mostró que, en plantas con riego, cada contaminante analizado tenía una correlación significativa, contrario a las plantas sin riego, las cuales a pesar de que los contaminantes en conjunto no afectaban significativamente al Fv/Fm_{PD}, sí ocurrió que analizados por separado el O₃ y el MP_{2,0} mostraban una correlación estadísticamente significativa al 99%, lo que implica que estos contaminantes tienen un mayor efecto sobre la especie arbórea que los demás contaminantes analizados.

El estrés hídrico moderado inducido a las plantas provoca que los sistemas de transporte de iones y de agua a través de las membranas funcionen de tal modo que controlen los cambios de presión de turgencia en las células protectoras y, por tanto, estimulen el cierre de los estomas. El cierre estomático implica un menor intercambio gaseoso y por lo tanto un metabolismo retardado, lo que se traduce en una menor incidencia de los contaminantes sobre la planta, de

acuerdo con lo sostenido por Osakabe *et al.*, (2014). En cambio, una planta sin estrés aparente, debiese tener una apertura estomática tal que, todo el daño reflejado en la disminución de la fotosíntesis sea proveniente de los contaminantes.

6. CONCLUSIONES

- En las plantas con estrés hídrico moderado (sin riego), la aplicación de contaminantes no generó una reducción estadísticamente significativa del rendimiento cuántico máximo del fotosistema II (F_v/F_{mPD}) contrario a lo que se planteaba en la hipótesis, donde se consideraba un mayor daño cuando aumentaban los factores de estrés (por contaminación y por déficit hídrico).
- En las plantas sin estrés hídrico (con riego), la aplicación de contaminante provocó una disminución estadísticamente significativa del rendimiento cuántico máximo del fotosistema II (F_v/F_{mPD}).
- La variable potencial hídrico es estadísticamente significativa entre los tratamientos hídricos. Otras variables, tales como la adición de contaminante o el arreglo del motor no afectan dicha variable.
- El rendimiento cuántico máximo del fotosistema II (F_v/F_{mPD}) no se ve afectado por el ajuste del turbo del motor del vehículo.
- El $MP_{2,0-10}$ afecta en plantas con riego al rendimiento cuántico máximo del fotosistema II (F_v/F_{mPD}), situación que no ocurre en plantas sin riego.
- Las concentraciones de CO , de $MP_{2,0}$ y del O_3 reducen de forma estadísticamente significativa la respuesta del rendimiento cuántico máximo del fotosistema II (F_v/F_{mPD}) en plantas con y sin riego.

7. CONSIDERACIONES FINALES Y PROYECCIONES

La disponibilidad hídrica y la temperatura son factores que afectan a las plantas, ya sea en su crecimiento o en su metabolismo; además, los árboles urbanos están expuestos a las emisiones de los contaminantes primarios y a los contaminantes secundarios. Los vehículos motorizados aportan casi el 50% de los gases antropogénicos emitidos en la ciudad de Santiago. Los árboles por su parte emiten compuestos orgánicos volátiles (COVsB) que en la atmósfera actúan como precursores de O₃, pero su contribución es casi tangencial y corresponden al 15,3% de los COV totales (Gramsch *et al.*, 2014). Pero además los árboles pueden remover MP de la atmósfera y verse dañados por ello, al igual que por el ozono presente en la atmósfera urbana (Joshi & Swami, 2007).

En este trabajo las plantas de quillay se expusieron siempre a concentraciones altas de CO₂ que, según Warren *et al.*, (2007) podrían conducir a una reducción de la conductancia estomática y, por lo tanto, a una reducción en la tasa de fijación de carbono, lo que se demostró en este estudio a través de una disminución estadísticamente significativa del rendimiento cuántico máximo del fotosistema II (Fv/Fm_{PD}) en plantas sin estrés hídrico (con riego). Wittmann and Pörtner (2013) proyectaron aumentos del CO₂ de hasta 936 ppm (o 1683 mg/m³) para el 2100 para el escenario *Representative Concentration Pathway* (RCP 8.5) valor para el cual correspondería una disminución del 15,7% del Fv/Fm_{PD} según los resultados de este trabajo, y no habría disminución en el caso de las plantas con estrés hídrico moderado (sin riego).

Por otra parte, estudios publicados por Santibáñez *et al.* (2016) sobre la disponibilidad de agua en Chile, proyectan una mayor reducción del régimen

pluviométrico para el año 2050, junto con un aumento de la temperatura desde el norte hacia el sur del país lo que conduciría a condiciones climáticas más hostiles y azarosas. Por ejemplo, las precipitaciones promedio en la comuna de Independencia entre el año 1980 y el 2000 fueron de 362 mm/año, las cuales proyectadas al 2050 serían de 310 mm/año, es decir, una disminución del 14% (Santibáñez *et al.*, 2016).

Por lo tanto, concluyendo desde esta memoria de título que evidencia que no se produce un gran daño sobre plantas de *Quillaja saponaria* Mol. con restricción hídrica moderada y presencia de contaminantes generados o formados desde las emisiones de los vehículos diésel, sería conveniente proponer esta especie arbórea para un plan de arborización urbana en el cual se controlen los ciclos de riego (restricción hídrica moderada a leve), de manera que pueda contribuir a la mitigación de contaminantes urbanos hasta un horizonte lejano en el tiempo y sin afectar el desarrollo de la propia especie por la restricción de agua.

8. BIBLIOGRAFÍA

- Aeroqual. Portable Air Quality Monitors (2019). [En línea]
<<https://www.aeroqual.com/outdoor-air-quality/outdoor-portable-air-monitors>>
[Consulta: 08 de agosto de 2019]
- Atkinson, R. (2000). Atmospheric chemistry of VOCs and NOx. *Atmospheric environment*, 34(12-14), 2063-2101.
- Auffhammer, M., Bento, A. M., & Lowe, S. E. (2009). Measuring the effects of the Clean Air Act Amendments on ambient PM10 concentrations: The critical importance of a spatially disaggregated analysis. *Journal of Environmental Economics and Management*, 58(1), 15-26.
- Azcón-Bieto, J. y Talón, M. (2008). *Fundamentos de fisiología vegetal*. Segunda edición. España. Editorial McGraw-Hill Interamericana. 255-651 p.
- Baker, N. R., & Rosenqvist, E. (2004). Applications of chlorophyll fluorescence can improve crop production strategies: an examination of future possibilities. *Journal of experimental botany*, 55(403), 1607-1621.
- Botero, J. S., Navarro, S., Giraldo, N., & Atehortua, L. (2014). Estimation of Photosynthetically Active Radiation (PAR) using a low cost spectrometer. *IEEE Latin America Transactions*, 12(2), 107-111.
- Conaf. Programa de Arborización de la Corporación Nacional Forestal. (2014)
[En línea] <<https://www.t13.cl/noticia/actualidad/el-quillay-es-el-arbol-mas-demandado-y-producido-en-la-region-metropolitana>> [Consulta: 08 de agosto de 2019]

- Criollo, C., Assar, R., Cáceres, D., & Préndez, M. (2016). Arbolado urbano, calidad del aire y afecciones respiratorias en seis comunas de la provincia de Santiago, Chile. *Revista Chilena de Enfermedades Respiratorias*, 32(2), 77-86.
- Schwab, J. J., Felton, H. D., Rattigan, O. V., & Demerjian, K. L. (2006). New York state urban and rural measurements of continuous PM_{2.5} mass by FDMS, TEOM, and BAM. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 56(4), 372-383.
- Dieselnet. Emission Standards. [En línea] <<https://www.dieselnet.com/standards/eu/ld.php#stds>> [Consulta: 08 de agosto de 2019]
- Dhir, B. (2016). Air pollutants and photosynthetic efficiency of plants. In *Plant responses to air pollution*. Springer, Singapore. 71-84 p
- Dobbs C., Kendal D., Nitschke C.R. (2014) Multiple ecosystem services and disservices of the urban forest establishing their connections with landscape structure and sociodemographics. *Ecol. Indic.*, 43: 44-55.
- Donoso, S., Peña-Rojas, K., Pacheco, C., Luna, G., & Aguirre, A. (2011). Respuesta fisiológica y de crecimiento en plantas de *Quillaja saponaria* y *Cryptocarya alba* sometidas a restricción hídrica. *Bosque*, 32(2), 187-195.
- Ebi, K. L., y McGregor, G. (2008). Climate change, tropospheric ozone and particulate matter, and health impacts. *Environmental health perspectives*, 116(11), 1449.

- 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 forests to improve air quality. *Journal of environmental management*, 86(1), 148-157.
- Escobedo, F., Palmas-Perez, S., Dobbs, C., Gezan, S., & Hernandez, J. (2016). Spatio-temporal changes in structure for a mediterranean urban forest: Santiago, Chile 2002 to 2014. *Forests*, 7(6), 121.
- Gramsch, E., López, G., Gidhagen, L., Segersson, D., Castillo, M., Vásquez, Y., Valverde, C., Díaz, X., Tagle, M., Donoso, R. (2014). Actualización y sistematización del inventario de emisiones de contaminantes atmosféricos en la Región Metropolitana. 34-52 p.
- González-Cruz, J., & Pastenes, C. (2012). Water-stress-induced thermotolerance of photosynthesis in bean (*Phaseolus vulgaris* L.) plants: The possible involvement of lipid composition and xanthophyll cycle pigments. *Environmental and Experimental Botany*, 77, 127-140.
- Hernández, H. J., y Villaseñor, N. 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.
- INE. Instituto nacional de estadísticas. Cifras Parque de Vehículos 2018 (2019). [En línea] <http://www.ine.cl/docs/default-source/econ/transporte-y-comunicaciones/anuarios/parque-de-veh%C3%ADculos/resultados/cifras-2018.xlsx?sfvrsn=b3875dd2_9> [Consulta: 31 mayo, 2019].

Joshi, P. C., & Swami, A. (2007). Physiological responses of some tree species under roadside automobile pollution stress around city of Haridwar, India. *The Environmentalist*, 27(3), 365-374.

Krause, G. H., & Weis, E. (1991). Chlorophyll fluorescence and photosynthesis: the basics. *Annual review of plant biology*, 42(1), 313-349.

Kulkarni, P., Baron, P. A., & Willeke, K. (Eds.). (2011). *Aerosol measurement: principles, techniques, and applications*. John Wiley & Sons, 6 p.

Leiva M., Araya C., Mancilla C., Seguel R., Norris J.E. (2011), Uncertainty of ozone measurements with the primary standard reference photometer (SRP45), *Talanta*, 1-11 p.

Maxwell, K. and G. Johnson (2000). Chlorophyll fluorescence—a practical guide. *Journal of Experimental Botany*, 51 (345): 659–668 p.

Maenhaut, W., Francois F., and Cafmeyer, J., (1994). The “Gent “stacked filter unit sampler for the collection of atmospheric aerosols in two size fractions: description and introduction for installation and use, in *Applied Research of Air Pollution Using Nuclear-Related Analytical Techniques*, Report NAHRES-19, International Atomic Energy Agency, Vienna, Austria.

MMA, (2015). [En línea]<
http://planesynormas.mma.gob.cl/archivos/2016/proyectos/DS_47_de_2015__PDAO.pdf >[Consulta: 20 de julio 2018]

Montenegro, G. (2002). Chile: Nuestra flora útil. Guía de uso apícola, medicinal folclórica, artesanal y ornamental. Pontificia Universidad Católica de Chile.

Facultad de Agronomía e Ingeniería Forestal. Ediciones Universidad Católica. Santiago. Chile. 267p.

Morales, R. G. (2006). Contaminación atmosférica urbana: episodios críticos de contaminación ambiental en la ciudad de Santiago. Editorial Universitaria, 112-113 p.

Morgenroth J., Östberg J., Konijnendijk van den Bosch C., A.B. Nielsen, R. Hauer, H. Sjöman, W. Chen, M. Jansson. (2016). Urban tree diversity—Taking stock and looking ahead. *Urban For. Urban Green.*, 15, pp. 1-5

Muneer, S., Kim, T. H., Choi, B. C., Lee, B. S., & Lee, J. H. (2014). Effect of CO, NOx and SO₂ on ROS Production, Photosynthesis and Ascorbate–glutathione Pathway to Induce *Fragaria× annasa* as a Hyperaccumulator. *Redox biology*, 2, 91-98.

Noctor, G., Mhamdi, A., & Foyer, C. H. (2016). Oxidative stress and antioxidative systems: recipes for successful data collection and interpretation. *Plant, cell & environment*, 39(5), 1140-1160.

Novelli, P. C., Masarie, K. A., & Lang, P. M. (1998). Distributions and recent changes of carbon monoxide in the lower troposphere. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 103(D15), 19015-19033.

Osakabe, Y., Osakabe, K., Shinozaki, K., & Tran, L. S. P. (2014). Response of plants to water stress. *Frontiers in plant science*, 5, 86.

- Peterson, Philip JD, *et al.* (2017). Practical Use of Metal Oxide Semiconductor Gas Sensors for Measuring Nitrogen Dioxide and Ozone in Urban Environments. *Sensors*, 17 (7), 1653.
- Peña-Rojas, K., Aranda, X., & Fleck, I. (2004). Stomatal limitation to CO₂ assimilation and down-regulation of photosynthesis in *Quercus ilex* resprouts in response to slowly imposed drought. *Tree Physiology*, 24(7), 813-822.
- Peña-Rojas, K., Donoso, S., Pacheco, C., Riquelme, A., Gangas, R., Guajardo, A., & Durán, S. (2018). Respuestas morfo-fisiológicas de plantas de *Lithraea caustica* (Anacardiaceae) sometidas a restricción hídrica controlada. *Bosque*, 39(1), 27-36.
- Pope III, C. A., & Dockery, D. W. (2006). Health effects of fine particulate air pollution: lines that connect. *Journal of the air & waste management association*, 56(6), 709-742.
- Préndez, M. M., Ortiz, J., Garrido, J., Huerta, P., Alvarez, B., & Zolezzi, S. (1982). Une méthode simple pour le traitement des filtres employés dans l'étude des aerosols atmosphériques. *Radiochem. Radioanal. Letters* 56/5/ 291-304 p.
- Préndez, M., Corvalán, R. M., & Cisternas, M. (2007). Estudio preliminar del material particulado de fuentes estacionarias: Aplicación al sistema de compensación de emisiones en la Región Metropolitana, Chile. *Información Tecnológica*, 18(2), 93-103.

- Préndez, M., Carvajal, V., Corada, K., Morales, J., Alarcón, F., & Peralta, H. (2013). Biogenic volatile organic compounds from the urban forest of the Metropolitan Region, Chile. *Environmental Pollution*, 183, 143-150.
- Préndez, M., Araya, M., Criollo, C., Egas, C., Farías, I., Fuentealba, R., & 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.
- Przybysz, A., Popek, R., Gawrońska, H., Grab, K., Łoskot, K., Wrochna, M., & Gawroński, S. W. (2014). Efficiency of photosynthetic apparatus of plants grown in sites differing in level of particulate matter. *Acta Sci. Pol. Hortorum Cultus*, 13, 17-30.
- Reddy, A. R., Rasineni, G. K., & Raghavendra, A. S. (2010). The impact of global elevated CO₂ concentration on photosynthesis and plant productivity. *Current Science*, 46-57.
- Santibáñez, F. y Uribe, J. M. (1990). *Atlas Agroclimático de Chile: Regiones V y Metropolitana*. Departamento de Ingeniería y Suelos. Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales. Universidad de Chile. 65 p.
- Santibáñez, F. (2016). *El cambio climático y los recursos hídricos en Chile*. Santiago, ODEPA. 57 p.
- Scopelliti, M., Carrus, G., Adinolfi, C., Suarez, G., Colangelo, G., Laforteza, R., & Sanesi, G. (2016). Staying in touch with nature and well-being in different income groups: the experience of urban parks in Bogotá. *Landscape and Urban Planning*, 148, 139-148.

- SINIA, MMA. (2017) [En línea] <<http://sinia.mma.gob.cl/wp-content/uploads/2017/09/REMA-2017.pdf>> [Consulta: 20 julio 2018].
- Soto F. (2008). Análisis y cuantificación de material particulado diésel: caracterización físico-química de partículas ultrafinas y modelación de emisiones producidas por vehículos fuera de ruta. Tesis para optar al grado de Magister en Ciencias de la Ingeniería Mención Mecánica en Memoria para optar al Título de Ingeniero Civil Mecánico, 14-15 p.
- Steiner, S., Bisig, C., Petri-Fink, A., & Rothen-Rutishauser, B. (2016). Diesel exhaust: current knowledge of adverse effects and underlying cellular mechanisms. *Archives of toxicology*, 90(7), 1541-1553.
- Valcárcel, J. P., González, H., Cristancho, J. M., & Valcárcel, F. (2008). Determinación de la cantidad de oxígeno fotosintético evolucionado por las plantas verdes utilizando técnicas espectroscópicas. *Paideia Surcolombiana*, (13), 30-34.
- Warren, C. R. (2007). Stand aside stomata, another actor deserves centre stage: the forgotten role of the internal conductance to CO₂ transfer. *Journal of Experimental Botany*, 59(7), 1475-1487.
- Wittmann AC, Pörtner H-O (2013) Sensitivities of extant animal taxa to ocean acidification. *Nat Clim Chang* 3:995–1001. [En línea] <<https://doi.org/10.1038/nclimate1982>> [Consulta: 07 de agosto 2019]
- World Health Organization. [En línea] <[http://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/ambient-\(outdoor\)-air-quality-and-health](http://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/ambient-(outdoor)-air-quality-and-health)> [Consulta: 15 junio 2018].