



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**

---

---

**FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES ZARAGOZA**

Composición iónica y nivel de acidez del agua de lluvia en el  
bosque templado del Parque Nacional Izta-Popo.

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE

**B I O L Ó G O**

Presenta:

Manuel Ávila de los Santos

Directora de Tesis: Biól. Eloísa A. Guerra Hernández



México D.F.

Noviembre 2011



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.



---

## DEDICATORIAS

### A mis padres

*Elía de los Santos Bruno y Refugio Antonio Ávila Hernández ¡LOS AMO!, por haberme heredado este precioso regalo que es el estudio, por haberme apoyado en todo momento y estar siempre conmigo, por sus consejos, sus cuidados, sus regaños, sus valores, por la motivación constante que me ha permitido ser una persona de bien, por sus ejemplos de perseverancia, por generarme el cariño por el trabajo y enseñarme que las cosas se consiguen con dedicación, pero más que nada por su amor.*

### A la memoria de mis abuelos

*Andrés Ávila, Hilaria Hernández y Guadalupe Bruno, por ser una parte muy importante en mi vida, por enseñarme valores, enseñarme el cariño y amor por el campo y las costumbres y sobre por enseñarme a ser una persona humilde y noble.*

### A mis hermanos

*Cesar Andrés Ávila de los Santos y Fernando Antonia Ávila de los Santos, por todos esos momentos buenos y malos que hemos pasado, por soportar mis errores y enseñarme a conocer mis debilidades y por apoyarme cuando lo he necesitado ¡Saben que los quiero mucho!*

### A mi familia

*A todos mis tíos y tías, primos y primas sin excepción alguna, que de alguna forma han estado siempre que los he necesitado, por soportar mis travesuras y mis locuras, siempre contaran conmigo para los buenos y malos momentos y sepan que los quiero mucho. Gracias por todo su apoyo y palabras de aliento.*

***¡¡GRACIAS A TODOS LOS AMO Y SIEMPRE LOS LLEVO EN MI CORAZÓN!!***



## AGRADECIMIENTOS

*A dios, por haberme permitido llegar hasta este punto y haberme dado salud para lograr uno de tantos objetivos en mi vida, además de su infinita bondad y amor.*

*A la Universidad Nacional Autónoma de México y a la FES Zaragoza por ser mi segundo hogar durante todo este tiempo de mi formación académica, por darme las herramientas para enfrentarme al mundo laboral y permitirme pertenecer a su comunidad.*

*A mi directora de Tesis Biól. Eloísa A. Guerra Hernández, por confiar en mí y apoyarme en la realización de este trabajo, por su paciencia y tiempo, sus consejos que siempre valoro y sobre todo por brindarme más que conocimientos académicos su amistad, siempre estaré agradecido gracias por todo..*

*Al Dr. Gerardo Cruz Flores por su incondicional ayuda en campo y brindarme parte de su conocimiento, pero sobre todas las cosas por todos los consejos que me ha dado, muchas gracias, para mí es más que un maestro, es un amigo más.*

*Al Biol. Luis Samuel Campos Lince por su ayuda incondicional y compartir parte de sus conocimientos para la culminación de esta tesis.*

*Al Dr. Efraín Ángeles Cervantes por brindare parte de su conocimiento, tiempo, aportaciones al trabajo y por su apoyo continuo.*

*A cada uno de los miembros de mí jurado, Biól. Eloísa A. Guerra Hernández, Biól. Maricela Arteaga Mejía, Dr. Efraín Ángeles Cervantes, M. en C. Germán Calva Vásquez y Biól. Luis Samuel Campos Lince, por su tiempo y valiosas aportaciones para enriquecer este trabajo.*

*A todos los profesores que me ayudaron en mi formación profesional, sobre todo a aquellos que dejaron una huella importante en mi crecimiento, muchas gracias por sus consejos y enseñanzas.*

*A mi peque hermosa Pilar, gracias por permitirme formar parte de tu vida, gracias por presionarme para culminar este trabajo, por aguantarme todo este tiempo que hemos compartido, gracias por enseñarme a creer en mí y motivarme a hacer las cosas de la mejor manera, pero sobre todo gracias por tu amor, quiero que esto sea el comienzo de algo maravilloso y estar a tu lado mucho tiempo, Te amo.*

*A mis compañeros de laboratorio Alma, Viri, Elva, Belly, Sergio, Alejandro, Emilio, Nancy, Paco, Ismael y Carlos y todas aquellas personas que me acompañaron durante este trabajo y me ayudaron en esos arduos muestreos en campo y que sobre todo hicieron divertidas las salidas a campo. En especial a Mitzi por su apoyo durante esta etapa de mi vida muchas gracias brindarme tu amistad durante todo este tiempo, de verdad muchas gracias, tu apoyo y palabras de aliento fueron fundamentales para mí, sabes que se te quiere mucho. A Liss, Laura y Ernesto, que me adoptaron y me hicieron sentir parte de su equipo de laboratorio, gracias por esos momentos en el laboratorio y brindarme su amista.*

*A mis otros Hermanos que aunque no son de sangre los quiero como si lo fueran, Jorge, Ángel, Juanito, Alejandro y Tania, que me ayudaron en los momentos que los necesite, gracias por aceptarme tal y como soy y soportar mis locuras, por estar conmigo en las buenas y en las malas, por todos esos viajes y sueños que compartimos juntos, los quiero mucho a todos.*

*Son muchas las personas a las que me gustaría agradecer y discúlpeme si se me escapa alguien, gracias a Jessi, Jesus, Rene, Betin. A Pilar, Paco, Alex y Susana, por aceptarme en su grupo de amigos, gracias por su amistad, apoyo y cariño, de verdad les agradezco su amistad, compañía, palabras de aliento y conversaciones que tuvimos durante estos años, todo fue de mucha ayuda.*

*Todos me dejan recuerdos y enseñanzas que llevare conmigo siempre ¡¡Los quiero!!*

*Manuel Ávila de los Santos*



## ÍNDICE

ÍNDICE DE TABLAS.....	6
ÍNDICE DE FIGURAS.....	6
RESUMEN.....	8
ABSTRACT.....	9
1. INTRODUCCIÓN.....	10
2. MARCO TEÓRICO.....	12
2.1 Composición iónica del agua de lluvia.....	12
2.2 Mecanismos de formación de los ácidos atmosféricos.....	13
2.3 Fuentes de contaminantes atmosféricos.....	16
2.4 Procesos de incorporación de la depositación ácida.....	17
2.5 Captación del depósito ácido atmosférico.....	18
2.6 Daños y beneficios ocasionados por la deposición húmeda.....	20
3. ANTECEDENTES.....	23
4. JUSTIFICACIÓN.....	29
5. OBJETIVOS.....	30
5.1 Objetivo General.....	30
5.2 Objetivos Particulares.....	30
6. HIPÓTESIS.....	31
7. ÁREA DE ESTUDIO.....	32
7.1 Ubicación geográfica.....	32
7.2 Altitud.....	33



---

7.3 Clima.....	33
7.4 Hidrología.....	34
7.5 Geología.....	35
7.6 Vegetación.....	35
7.7 Descripción de los géneros estudiados.....	38
7.7.1 Género <i>Pinus</i> .....	38
7.7.2 Género <i>Abies</i> .....	39
8. MÉTODOS.....	41
8.1 Gabinete.....	41
8.2 Campo.....	41
8.3 Laboratorio.....	43
9. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	46
9.1 Evaluación del pH SDT Y CE en las estructuras arbóreas.....	49
9.2 Evaluación de la composición iónica del agua de lluvia.....	56
9.2.1 Cloruros Nitratos y Sulfatos.....	59
9.3 Comparación experimental del efecto del follaje y corteza de los géneros <i>Abies</i> y <i>Pinus</i> en el nivel de acidez y composición iónica ( $\text{NO}_3^-$ , $\text{Cl}^-$ y $\text{SO}_4^{2-}$ ) en el agua.....	63
9.4 Comparación de resultados obtenidos en laboratorio y campo.....	72
10. CONCLUSIONES.....	77
11. LITERATURA CITADA.....	79



## ÍNDICE DE TABLAS

Cuadro 1 Medición de la Lluvia (OMM, 1993).....	12
Cuadro 2. Intervalos de pH en muestras de agua de lluvia recolectadas en los claros del Bosque (junio-noviembre 2009).....	46
Cuadro 3. Caracterización del Sitio de Estudio y valores promedio para el agua de lluvia (Junio- Noviembre del 2009) .....	47

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Mecanismo de incorporación de los contaminantes atmosféricos a los ecosistemas.....	18
Figura 2. pH promedio del agua de lluvia de diferentes redes de monitoreo .....	25
Figura 3. Distribución y cobertura de las estaciones de monitoreo del SIMAT.....	26
Figura 4. Ubicación del área de estudio, PNIP y su zona de influencia.....	32
Figura 5. Parque Nacional Izta-Popo.....	33
Figura 6. <i>Pinus leiophylla</i> .....	39
Figura 7 <i>Abies religiosa</i> .....	40
Figura 8 Flujo del agua a través del ecosistema muestreado.....	42
Figura 9 Tratamiento de muestras del agua de lluvia en el laboratorio.....	44
Figura 10. Diagrama de árbol del Diseño Experimental.....	45
Figura 11. Diseño experimental.....	45
Figura 12 Variación del pH del agua de lluvia durante los meses de muestreo.....	47
Figura 13. Diagrama de la variación promedio del pH, STD y CE para <i>Pinus leiophylla</i> .....	49
Figura 14. Variación y Análisis del pH del agua de lluvia por estructuras arbóreas para <i>Pinus leiophylla</i> .....	50
Figura 15. Diagrama de la variación promedio del pH, STD y CE para <i>Abies religiosa</i> .....	51
Figura 16. Variación y Análisis del pH del agua de lluvia por estructuras arbóreas para <i>Abies religiosa</i> .....	52
Figura 17. Variación y Análisis de los SDT del agua de lluvia por estructuras arbóreas para <i>Pinus Leiophylla</i> y <i>Abies religiosa</i> .....	54
Figura 18 Variación y Análisis de la CE del agua de lluvia por estructuras arbóreas para <i>Pinus Leiophylla</i> y <i>Abies religiosa</i> .....	55
Figura 19 Variación y Análisis de la Alcalinidad del agua de lluvia por estructuras arbóreas para <i>Pinus Leiophylla</i> y <i>Abies religiosa</i> .....	56
Figura 20 Variación y Análisis de la Dureza de Calcio del agua de lluvia por estructuras arbóreas para <i>Pinus Leiophylla</i> y <i>Abies religiosa</i> .....	57
Figura 21 Variación y Análisis de la Dureza Total del agua de lluvia por estructuras arbóreas para <i>Pinus Leiophylla</i> y <i>Abies religiosa</i> .....	58
Figura 22 Variación y Análisis de los Cloruros del agua de lluvia por estructuras arbóreas para <i>Pinus Leiophylla</i> y <i>Abies religiosa</i> .....	60



Figura 23. Variación y Análisis de los Nitratos del agua de lluvia por estructuras arbóreas para *Pinus Leiophylla* y *Abies religiosa*..... 61

Figura 24 Variación y Análisis de los Sulfatos del agua de lluvia por estructuras arbóreas para *Pinus Leiophylla* y *Abies religiosa*..... 62

Figura 25 Variación y análisis del pH en los diferentes tratamientos de agua para las estructuras de *Pinus leiophylla*.....64

Figura 26 Variación y análisis del pH en los diferentes tratamientos de agua para las estructuras de *Abies religiosa*.....65

Figura 27 Variación y análisis de los Nitratos en los diferentes tratamientos de agua para las estructuras de *Pinus leiophylla*.....66

Figura 28 Variación y análisis de los Nitratos en los diferentes tratamientos de agua para las estructuras de *Abies religiosa*.....67

Figura 29 Variación y análisis de los Cloruros en los diferentes tratamientos de agua, para las estructuras de *Pinus leiophylla*..... 68

Figura 30 Variación y análisis de los Cloruros en los diferentes tratamientos de agua, para las estructuras de *Abies religiosa*.....69

Figura 31 Variación y análisis de los Sulfatos en los diferentes tratamientos de agua, para las estructuras de *Pinus leiophylla*.....70

Figura 32 Variación y análisis de los Sulfatos en los diferentes tratamientos de agua, para las estructuras de *Abies religiosa*.....71

Figura 33 Comportamiento del pH en las estructuras arbóreas de *Abies* en Campo y el Diseño experimental.....72

Figura 34 Comportamiento de los Cloruros en el Follaje de *Abies* en Campo y el Diseño experimental.....73

Figura 35 Comportamiento de los Nitratos en las Estructuras de *Pinus* y *Abies* en Campo y el Diseño experimental.....74

Figura 36 Comportamiento de los Sulfatos en las estructuras de *Pinus* y *Abies* en Campo y el Diseño Experimental.....75

Figura 37 Comportamiento de los Iones (Cl-, NO3- y SO4-2) en las estructuras de *Pinus* y *Abies* en Campo y el Diseño experimental.....75



## RESUMEN

Entre los contaminantes atmosféricos se encuentran el monóxido de carbono, los óxidos de nitrógeno y los óxidos de azufre; su disolución en medio acuoso, le confieren a la lluvia un carácter ácido, debido a la formación de ácidos fuertes como son el  $\text{H}_2\text{CO}_3$ ,  $\text{H}_2\text{SO}_4$ , y  $\text{HNO}_3$ . Actualmente existen dos tendencias sobre el efecto del agua de lluvia en los ecosistemas. La primera menciona que su carácter ácido afecta el crecimiento y desarrollo enfermedades en el arbolado y la segunda resalta la limpieza de la atmósfera y el ingreso de nutrientes al ecosistema. El agua de lluvia al entrar en contacto con la vegetación modifica su composición original. La finalidad de este estudio fue evaluar la composición iónica ( $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ) y los niveles de acidez del agua de lluvia que es captada sobre el bosque templado del PN Izta-Popo (PNIP) de junio a noviembre del 2009. Se instalaron colectores abiertos para el agua de lluvia en claros del bosque (CB) que se utilizaron como testigo, bajo el follaje, fuste y hojarasca en individuos de *Pinus leiophylla* y *Abies religiosa*. En el laboratorio se realizó un experimento para determinar el cambio en la concentración iónica del agua, a través de tres diferentes tratamientos (Simulación del agua de lluvia, Agua del lugar y Agua destilada) cuando las hojas o la corteza de cada una de las especies mencionadas permanecen sumergidas, en cada uno de los tratamientos durante 7 días. En todas las muestras se determinó el pH, STD (sólidos totales disueltos), CE (conductividad eléctrica),  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$  y  $\text{Cl}^-$ .

El pH promedio de la lluvia incidente en el PNIP fue de 4.91. Los valores de este parámetro durante el estudio indicaron la presencia de lluvia ácida en la zona. En general el pH fue mayor en el pluviolavado y el agua bajo la hojarasca con respecto al claro del bosque. La CE y los STD se incrementan durante su flujo por las estructuras. Los  $\text{NO}_3^-$  y  $\text{SO}_4^{2-}$  disminuyen en el follaje, pero se incrementan al llegar a la hojarasca tanto en *Pinus leiophylla* como *Abies religiosa*. Los  $\text{Cl}^-$  se incrementan en el fuste con respecto a la precipitación incidente. En el experimento, los tratamientos con la corteza y el follaje disminuye su pH durante los tres primeros días, principalmente en las estructuras de *Pinus leiophylla*. Se observa que existe una disminución de  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$  y  $\text{Cl}^-$  en el tratamiento con simulación del agua de lluvia y el del agua de lugar con respecto a la concentración que se registró en el agua destilada.

La interceptación del agua de lluvia en la vegetación modificó su composición iónica inicial. *P. leiophylla* disminuye significativamente el pH del agua de lluvia, en tanto que *A. religiosa* lo incrementa, además durante el paso del agua de lluvia por las estructuras arbóreas se genera un aporte de iones hacia el suelo que pueden ser asimilables fácilmente por la vegetación, por lo que esta última se considera un factor regulador importante del pH y el lavado de los elementos depositados en las estructuras arbóreas, con transferencia de iones al suelo; lo cual tiene gran importancia ecológica.

*Palabras clave: lluvia ácida, bosque templado húmedo, pH.*



## ABSTRACT

Air pollutants include the carbon monoxide, nitrogen oxides and sulphur oxides; its dissolution in the aqueous bestow rain acid in nature, due to the formation of strong acids such as the  $\text{H}_2\text{CO}_3$ ,  $\text{H}_2\text{SO}_4$ , and  $\text{HNO}_3$ . Currently there are two trends on the effect of rain on ecosystems. The first states that its acid character development affects growth and disease in the trees and the second highlights the clean air and nutrients entering the ecosystem. Rain water in contact with the vegetation composition changes. The purpose of this study was to assess the ionic composition ( $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{-2}$ ) and levels of acidity of rainwater that is captured on the temperate rainforest of the PN Iztapopo (PNIP) from June to November 2009. Open collectors were installed for rainwater in forest clearings (CB) were used as a witness, under the foliage, stem and leaf litter in individuals of *Pinus leiophylla* and *Abies religiosa*. In the laboratory, an experiment was conducted to determine the change in the ionic concentration of water through three different treatments (rainfall simulation, water distilled and water site) when the leaves or bark of each species mentioned remain submerged in each of the treatments for 7 days. All samples were analyzed for pH, TDS (total dissolved solids), EC (electrical conductivity),  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{SO}_4^{-2}$  and  $\text{Cl}^-$ .

The mean pH of rain incident in PNIP was 4.91. The values of this parameter during the study indicated the presence of acid rain in the area. The pH was higher in the throughfall and water under the leaves with respect to the clearing. The EC and TDS increases during flow structures. The  $\text{NO}_3^-$  and  $\text{SO}_4^{-2}$  decrease in the throughfall, but it increases to reach the litter in both *Pinus leiophylla* and *Abies religiosa*. The  $\text{Cl}^-$  increase in the stemflow with respect to the incident precipitation. In the experiment, treatment with the bark and foliage pH decreases during the first three days, mainly in *Pinus leiophylla* structures. It is observed that there is a decrease in  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{SO}_4^{-2}$  and  $\text{Cl}^-$  in the simulation treatment of rainwater and water place with respect to concentration was recorded in distilled water.

Interception of rainfall in the vegetation changed its initial ionic composition. *P. leiophylla* significantly decreases the pH of rain water, while *A. religiosa* increases, as well as during the passage of rainwater by tree structures generated a contribution of ions into the soil that can be easily assimilated by vegetation, so that the latter factor is considered an important regulator of pH and washing elements in tree structures deposited with ion transfer to the ground which has great ecological importance.

*Keywords: acid rain, temperate humid forests, pH.*



## 1. INTRODUCCIÓN

La lluvia es uno de los procesos atmosféricos más complejos, tiene un rango amplio de influencia desde microescala ( $10^{-6}$  m) y hasta macroescala ( $10^6$  m). Involucra transformaciones e interacciones desde su formación, dentro de la nube, bajo la nube, en su liberación y en la intercepción con diferentes elementos del entorno (Sienfield y Pandis, 2006; Herrera, 2009).

La determinación de la composición iónica del agua de lluvia proporciona un mayor conocimiento sobre las fuentes que contribuyen a la alteración química de ésta y permiten comprender los patrones de dispersión de los contaminantes atmosféricos a nivel regional, local y global; así como el impacto de su depósito sobre los ecosistemas (Freydier, 1998, Sánchez, 2009). Los principales contaminantes del aire son el monóxido de carbono (CO), bióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), óxidos de azufre ( $\text{SO}_x$ ), óxidos de nitrógeno ( $\text{NO}_x$ ), los hidrocarburos y el material particulado (Campos *et al.*, 2002). El ingreso de estos compuestos y su concentración varía en función de la localización geográfica, estación del año, vientos y la cantidad de partículas existentes en el aire (Andrade, 1995).

Las lluvias forman parte del sistema atmósfera-vegetación,-suelo, dando origen a diversos procesos que mantienen en equilibrio al planeta; desempeña un papel preponderante en la remoción de compuestos atmosféricos, que aunado al depósito seco son los mecanismos de eliminación de algunos gases y partículas del aire (Stoker y Seager, 1981). En este sentido, tales compuestos modifican la composición iónica y el pH del agua de lluvia, que es, por naturaleza, ligeramente ácida, esto corresponde debido a que está en equilibrio con el  $\text{CO}_2$  de la atmósfera y produce un ácido débil (ácido carbónico  $\text{H}_2\text{CO}_3$ ). Sin embargo, se denomina "lluvia ácida" cuando presenta valores de pH menores a 5.6, lo cual indica la presencia de ácidos fuertes como  $\text{HNO}_3$  y  $\text{H}_2\text{SO}_4$  (Liu y Lipták, 2000).

La depositación ácida se ha considerado hipotéticamente, una de las causas del declive forestal a escala mundial, afectando grandes extensiones de las superficies boscosas (Moreno *et al.*, 2001; Herrera, 2009).

El ingreso de elementos al ecosistema ocurre principalmente por deposición seca y húmeda o por fijación biológica activa ( $\text{CO}_2$  y Nitrógeno) contribuyendo en forma importante a los ciclos biogeoquímicos (Oyarzún, 2002). Uno de los mejores mecanismos



de traslación de las partículas atmosféricas (gases y aerosoles) a los ecosistemas terrestres es mediante su incorporación a las gotas de lluvia, con lo cual favorece su transformación, asimilación o eliminación de la atmósfera.

La vegetación tiene un papel importante al interceptar el agua de la lluvia; a medida que ésta atraviesa la cubierta forestal, la composición química y en consecuencia su pH sufren alteraciones como resultado del lavado del depósito seco sobre el follaje y los cambios en el dosel arbóreo a través de la lixiviación de nutrientes en el follaje y fuste así como la absorción directa por la copa (Andrade, 1995, Bellot y Escarre; 1989; Guilherme *et al.*, 1995; Moreno, 2001; Calderon *et al.*, 2008).

El efecto del depósito ácido no explica por sí mismo el fenómeno de mortalidad del arbolado. Además los bosques regulan la captación, conservación, cantidad y calidad de los recursos hídricos que ingresa a ellos como la precipitación; por tal motivo surge la necesidad de evaluar la composición iónica y los niveles de acidez de la lluvia en diferentes zonas y momentos al interactuar con tipos de vegetación diversos, como es el caso del Bosque Templado en el Parque Nacional Izta- Popo y áreas comunales.



## 2. MARCO TEÓRICO

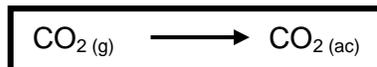
### 2.1 Composición iónica del agua de lluvia

La lluvia (del lat. *pluvia*) es un fenómeno atmosférico que se inicia con la condensación del vapor de agua contenido en las nubes. Según la definición oficial de la Organización Meteorológica Mundial la lluvia es la precipitación de partículas líquidas de agua con diámetro mayor de 0.5 mm o de menor tamaño pero muy dispersas y depende de tres factores: la presión atmosférica, la temperatura y especialmente la radiación solar. Se mide en milímetros al año (Cuadro 1)

Cuadro 1 Medición de la Lluvia (OMM, 1993).

mm al año	Precipitación
< 200 mm	Insuficientes
200 – 500 mm	Escasas
500 – 1000 mm	Suficientes
1000 – 2000 mm	Abundantes
>2000 mm	Excesivas

Con frecuencia se da por sentado que el pH de lluvia, influenciado por la disociación del dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) atmosférico tienen un valor de 5.6; las disminuciones con respecto a este valor son causadas por la adición de componentes ácidos a la atmósfera y una alta proporción de ellos es atribuida a las actividades antropogénicas, aunque de manera natural también existen componentes ácidos que son transportados por el viento (Sánchez *et al.*, 2009, Herrera *et al.*, 2009).





## 2.2 Mecanismos de formación de los ácidos atmosféricos

Los contaminantes emitidos a la atmósfera influyen en el pH de la lluvia. Los procesos que afectan la acidez de la precipitación incluyen el transporte de partículas atmosféricas, transformaciones gas-partícula, reacciones fotoquímicas y catalíticas, reacciones acuosas al interior de la nube y en la lluvia; generando que los contaminantes sean más agresivos. (Sánchez *et al.*, 2009).

El depósito ácido presenta una variada y compleja química en la que intervienen factores como:

- Geográficos: están definidos por las condiciones topográficas, la ubicación geográfica, cercanía con el mar, disponibilidad de oxígeno y la dirección predominante del viento.
- Climáticos: determinados por el régimen de precipitación, temperatura, incidencia de luz solar y la humedad relativa, entre otros.

La precipitación ácida se atribuye en primer lugar a ácidos fuertes, entre los más importantes se encuentran: el ácido sulfúrico ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ) y ácido nítrico ( $\text{HNO}_3$ ), que son generados por los  $\text{SO}_x$  y  $\text{NO}_x$ .

### Dióxido de Azufre

El dióxido de azufre al reaccionar con el aire se oxida transformándose a trióxido de azufre, lo cual se da a través de dos procesos químicos. El primero es combinándose con el ozono ( $\text{O}_3$ ) presente en la atmósfera



Y el segundo es la reacción entre el dióxido de azufre ( $\text{SO}_2$ ) y el oxígeno atmosférico ( $\text{O}_2$ ) que actúa como catalizador de las partículas sólidas (aerosoles) suspendidas en el aire.





El trióxido de azufre resultante reacciona con el agua de las nubes, generándose ácido sulfúrico, que precipita dando un carácter ácido a la lluvia. En condiciones normales el  $\text{SO}_3$  no se encuentra en la atmósfera ya que reacciona con el agua atmosférica y forma  $\text{H}_2\text{SO}_4$ .

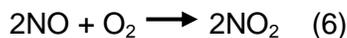


El azufre también se emite indirectamente hacia la atmosfera como  $\text{H}_2\text{S}$  por la industria petrolera y la fabricación del papel y de forma natural por emanaciones volcánicas. Una vez en la atmosfera el sulfuro de hidrogeno se oxida en el aire primero a dióxido de azufre y luego a ácido sulfúrico.

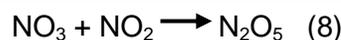
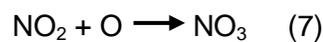


### Óxidos de Nitrógeno

Las emisiones de óxido nítrico ( $\text{NO}$ ) y dióxido de Nitrógeno ( $\text{NO}_2$ ), conjuntamente denominados  $\text{NO}_x$ , juegan un papel importante en el depósito ácido. El óxido de nitrógeno se forma por reacción entre el oxígeno y el nitrógeno a alta temperatura en los motores de combustión interna:



Posteriormente, este gas sufre una serie de reacciones fotoquímicas, que se resumen en las siguientes ecuaciones:





Finalmente el Pentóxido de dinitrógeno, reacciona con el agua formando ácido nítrico:



### Amonio

El amoníaco ( $\text{NH}_3$ , especie química importante en la atmósfera) se encuentra generalmente como un vapor alcalino capaz de neutralizar los ácidos sulfúrico y nítrico, generando un incremento importante en el pH de la precipitación (De Mello y De Almeida, 2004). El amoníaco se disuelve para formar amonio ( $\text{NH}_4^+$ ), lo cual puede incrementar la tasa de conversión de  $\text{SO}_2$  a  $\text{H}_2\text{SO}_4$  en la atmósfera, favoreciendo la formación de sulfato de amonio [ $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ ].



### Cloruros

Las emisiones de cloruro de hidrógeno gaseoso ( $\text{HCl}$ ) son generadas principalmente por la producción de cloro como gas y las actividades industriales; es un contribuyente significativo en la acidez de la lluvia, sin embargo, sus mecanismos de su formación aún no se han establecido completamente (Zhu y Liu 2003).

Otra fuente importante que afecta las características ácido-base de la lluvia es la emisión de materiales alcalinos sólidos (como carbonatos, óxidos de calcio y magnesio) provenientes del suelo, los cuales pueden tener una acción significativa en la disminución de la acidez de la lluvia.



Los ácidos orgánicos (ácido fórmico y acético) son constituyentes químicos importantes de la precipitación y del agua de las nubes; la fuente de estos compuestos no está bien



establecida, aunque se asume su aparición a partir de emisiones biogénicas o quema de combustible fósil.

### 2.3 Fuentes de contaminantes atmosféricos

En la atmósfera se llevan a cabo diversos procesos de regulación y purificación del aire, a ella se incorporan diferentes sustancias que alteran su composición química; y que provienen de diferentes fuentes de emisión las cuales se clasifican en:

- a) Naturales: Los contaminantes naturales que constituyen la gran mayoría del material particulado flotante en la atmósfera son gases y material particulado, polvos de pantano, cenizas de incendios forestales, partículas de sales marinas, polen y residuos finos de erupciones volcánicas. Las impurezas gaseosas en la atmósfera como  $\text{SO}_2$ ,  $\text{HCl}$  y  $\text{H}_2\text{S}$  son de origen volcánico y/o bacterias sulfurosas presentes en zonas pantanosas, la formación de otros gases como  $\text{NO}_2$  y  $\text{O}_3$  se debe a las descargas eléctricas durante las tormentas. La mayor parte de las emisiones de amoníaco a la atmósfera ocurren por procesos naturales y biológicos, como descomposición de la materia orgánica, incendios forestales, volatilización del suelo (fertilizantes) y océano. En general, las fuentes naturales de estos gases tienen una distribución global (Torres y Galván, 1999; Rubio *et al.*, 2001; Nebel y Wright, 2002).
- b) Antropogénicas: En esta categoría se consideran las industrias, casas y depósitos de desperdicios, que realizan la quema de diferentes combustibles para su funcionamiento, generando gases, humos y material particulado rico en sustancias como  $\text{SO}_2$ ,  $\text{NO}_x$  y  $\text{HC}_x$ , al presentar combustiones incompletas y falta de oxígeno; también se encuentran los campos agrícolas que generan aerosoles y material particulado debido a la fertilización y utilización de compuestos organoclorados, en conjunto aportan grandes cantidades de contaminantes a la atmósfera. También encontramos fuentes móviles que son todas aquellas que se desplazan por medio de motores de combustión interna. Los  $\text{SO}_x$  provienen principalmente de combustibles fósiles (carbón y petróleo), fertilizantes y los procesos industriales de acuerdo a Caselli, 1992, Stoker y Seager, 1981, Sienfield y Pandis, 2006; las emisiones antropogénicas tienden a concentrarse cerca de las zonas urbanas.



## 2.4 Procesos de incorporación de la depositación ácida

Una vez sintetizados los ácidos atmosféricos son dispersados y se depositan de acuerdo a su tamaño a determinada distancia de la fuente de emisión ya sea por gravedad o impacto en diferentes superficies. El Depósito húmedo y seco (Figura 3) es el camino por el cual los gases y las partículas son removidos de la atmósfera e incorporados a la superficie terrestre:

- Depósito seco: Es la transferencia directa de gases y material particulado ( $<1\mu\text{m}$  de diámetro), desde la atmósfera a la superficie, esta transferencia es afectada por turbulencia a algunos metros de la superficie y por la difusión molecular así como por movimiento Browniano. Las grandes partículas se depositan por sedimentación bajo la influencia de la gravedad; en el caso de los gases es por absorción, como el  $\text{SO}_2$  a través de superficies húmedas del follaje, corteza, estomas, paredes y estructuras protectoras (Saavedra *et al.*, 2003).
- Depósito húmedo: es el proceso por el cual se depositan los contaminantes en presencia de precipitación (lluvia, granizo, rocío, neblina y nieve) o condiciones de humedad, mediante la absorción del contaminante en forma directa. La deposición húmeda cumple un papel muy importante en la limpieza de la atmósfera, ya que a través de ella se aporta una cantidad importante de iones a la vegetación o al suelo. El agua de lluvia es un importante regulador, a través de la remoción húmeda y su composición química está determinada principalmente por tres mecanismos: condensación del vapor de agua; captura de contaminantes por la nube (*rainout*); y procesos de lavado bajo la nube (*washout*) (Báez *et al.*, 1993).

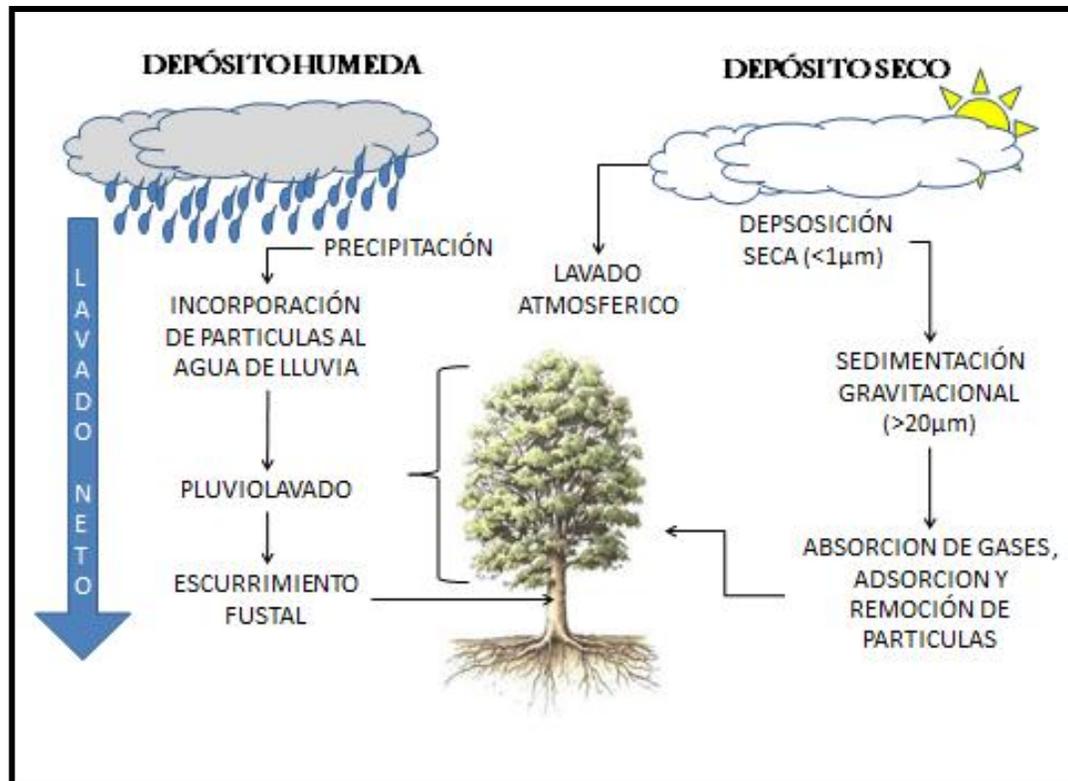


Figura 1. Mecanismo de incorporación de los contaminantes atmosféricos a los ecosistemas (Modificado de Calva, 1999)

## 2.5 Captación del depósito ácido atmosférico

En un ecosistema forestal las precipitaciones son modificadas por las características de la cubierta vegetal; ya que se altera la intensidad, cantidad, y distribución de éstas, antes de alcanzar el suelo del bosque. Este proceso se conoce como redistribución de precipitaciones (Cárcamo, 2006; Xiao- Yan *et al.*, 2009).

Una vez que el agua de lluvia atraviesa la cubierta forestal, su cantidad así como su composición química sufre cambios debidos principalmente a dos factores: el primero es el lavado de los elementos depositados en seco sobre el follaje y corteza; el segundo que se produce en el dosel arbóreo, a través de la lixiviación de nutrientes desde el follaje y/o absorción directa por la copa de los iones presentes en el agua de lluvia (Moreno *et al.*, 2001; Guilherme *et al.*, 1995). Los valores de intercepción por especie arbórea fluctúan entre 15 y 60% de la precipitación y se relacionan con la intensidad de la lluvia y la velocidad del viento (Farías *et al.*, 2007).



Las rutas de incorporación del agua de lluvia a los bosques, las podemos expresar en varias etapas:

- Precipitación incidente o total (claro del bosque). Es el total de agua de lluvia que llega hasta los bosques y que a su paso no ha sido interceptada; es decir, ha caído libremente desde la nube hasta el suelo (Cárcamo, 2006).
- Lavado de copa (precipitación penetrante o throughfall): Es el lavado de micro y macronutrientes que sufre la vegetación por efecto del depósito ácido, al reaccionar con los constituyentes naturales, lava elementos como Mg, Na, Fe, Si, entre otros. Hubber e Iroumé, (2001) realizaron estudios en diferentes bosques donde la precipitación penetrante representó del 55-85%; y mencionan que el potencial de intercepción de la comunidad vegetal, permite valorar su aporte en la regulación del ecosistema (Cárcamo, 2006).
- Escurrimiento Fustal (stremflow): Después de entrar en contacto con el follaje, las partículas contaminantes viajan hacia el tronco o tallo donde comienza un nuevo lavado al reaccionar con ellos, en el caso de la corteza arbórea se incorpora por vía húmeda o se adsorbe a la misma en espera de condiciones húmedas para su incorporación. El agua que fluye por las ramas y troncos del árbol se le ha llamado escurrimiento fustal, este depende principalmente de las características propias de los árboles, como tamaño del árbol, ángulo de inserción de las ramas en el fuste, longitud del recorrido del agua desde la copa hasta la base, forma y tamaño de las copas, espesor y forma de la corteza. Los valores de este escurrimiento generalmente son menores al 5% de la precipitación anual pero pueden llegar a representar incluso el 22%. El flujo del tronco puede variar de 0.07-22% de la lluvia incidente bajo un amplio rango de precipitación, 0.4-1.1% en bosques deciduos (San José y Montes, 1991), del 1-13% en coníferas y del 1-8% en bosques de hoja ancha (Hubber e Iroumé, 2001), el valor medio máximo para regiones templadas es aproximadamente del 11.3% (Xiao-Yan *et al.*, 2009).

La lixiviación como un mecanismo de retorno de nutrientes al suelo forestal se efectúa exclusivamente en solución acuosa y favorece a los elementos con alta solubilidad, el aumento del nivel de acidez en las lluvias, da lugar a una mayor lixiviación, principalmente de cationes. El lavado y la lixiviación de los nutrientes minerales desde las copas pueden intensificar el ciclo biogeoquímico, en la medida que el agua de lluvia que llega al suelo



bajo el dosel arbóreo contenga nutrientes en compuestos de rápida asimilación, que serán absorbidos con mayor velocidad por las raíces (Andrade, 1995).

Los bosques son particularmente efectivos en limpiar y retener solutos atmosféricos, debido a su superficie y resistencia aerodinámica; estos mecanismos permiten a los árboles situados en suelos pobres, incrementar la sucesión de especies que necesitan mayor riqueza nutrimental.

## **2.6 Daños y beneficios ocasionados por la deposición húmeda.**

La precipitación es vital en el mantenimiento y conservación de los bosques templados, por lo que su estudio es necesario para reconocer los cambios generados por causas naturales y diversas actividades humanas. Actualmente existen dos tendencias sobre el efecto del depósito húmedo en los bosques.

El aluminio presente en rocas, suelo y sedimentos de ríos y lagos, al disminuir el pH comienza a disolverse y afectar a la fauna acuática ya que es tóxico para los peces aún en bajas concentraciones. Uno de los efectos más importantes de la lluvia ácida en los sistemas acuáticos es el descenso de ciertas poblaciones de peces. Aunque los peces pueden morir a causa de la acidificación, lo más común es que dejen de reproducirse; teniendo cada año una población más vieja, hasta que la especie termina por desaparecer del lago o la corriente. También la población de algunos grupos de zooplancton, algas y plantas acuáticas se ven disminuidas, lo cual trastorna la cadena alimenticia global de los lagos.

Como ejemplo relevante de los daños que ocasiona la lluvia ácida, es frecuente mencionar el desgaste de ciertos materiales de construcción, un proceso cada vez más evidente, ya que día con día los monumentos, estatuas, edificios, casas habitación y muy en especial los sitios arqueológicos sufren un desgaste debido al intemperismo, que se agrava con la presencia de este tipo de lluvia. La piedra caliza que se ha utilizado en la construcción de monumentos mayas y totonacas sufre un desgaste producido por la lluvia ácida, que reacciona con el carbonato de calcio disolviéndolo, esto genera un desgaste superficial anual de 4.4 y 4.57  $\mu\text{m}$  /año para la zona maya y totonaca respectivamente (Bravo *et al.*, 2003)

Se ha mencionado que la lluvia ácida causa afectaciones a las zonas forestales que circundan la cuenca del Valle de México, ya que han sido sometidas a fuertes presiones



derivadas de la actividad humana. El Parque Nacional Izta-Popo, es una de las zonas que puede estar siendo afectada, como consecuencia de los efectos directos o indirectos de la contaminación del aire.

De manera natural, los metales traza (Fe, Al, Zn) se incorporan al suelo por el desgaste de material parental y por fenómenos naturales como tormentas, erupciones volcánicas, etc., sin embargo, la deposición ácida provoca cambios en las características físicas y químicas del suelo, de acuerdo a Driscoll *et al.*, 2003, se originan deficiencias de cationes, incremento en la solubilidad y toxicidad de elementos como Al, Fe, Mn, remoción de nutrientes esenciales para el desarrollo de las plantas, como el Ca, Mg y K, lo que afecta negativamente la salud, el crecimiento de los árboles, y reduce la capacidad de los suelos para neutralizar futuros impactos del depósito ácido. Esto se observa comúnmente en suelos con una baja alcalinidad y bajo contenido de Calcio que permita amortiguar la acidez de la lluvia.

La vegetación expuesta directamente a la lluvia ácida no sólo sufre las consecuencias del deterioro del suelo, sino también un daño directo que también puede llegar a ocasionar la muerte de muchas especies. Este fenómeno se ha señalado como una de las causas del decremento de las regiones boscosas, afectando a diversas áreas del mundo. (Cinderby *et al.*, 1998; Chadwick *et al.*, 1991; Bredemeier, 1988; Norton, 1977).

Existen perturbaciones en la vegetación que se encuentran asociadas a efectos directos o indirectos de la contaminación del aire. Entre los síntomas se encuentran la pérdida de hojas y ramas, necrosis foliar, clorosis y descortezamiento, ya que estas alteraciones aparentemente no corresponden a la influencia de factores definidos (cambios de temperatura, plagas, senilidad natural, etc.), se atribuyen a la alteración química de la lluvia en estas zonas, el daño foliar, la deficiencia nutrimental y la lixiviación de constituyentes foliares, principalmente de cationes básicos, como se ha reportado en otras regiones del mundo (Romero, 2003; Velasco, 2002).

Las altas concentraciones de ozono que se ve sometido el arbolado, causan una serie de daños como decoloración con pérdida de la masa foliar, senescencia prematura de las hojas y raíces (Prinz, 1985), debido a la absorción vía seca del ozono que daña la estructura intracelular y como consecuencia la inmunodepresión del árbol. El ozono entra a la planta a través de la apertura estomatal. El ingreso de gases al parecer depende del número y tamaño de estomas, así como de su grado de apertura bajo condiciones de



humedad, la apertura de los estomas se incrementa y las plantas son usualmente más sensitivas a la contaminación.

El ácido nítrico gaseoso es uno de los contaminantes nitrogenados más abundantes en el smog, puede ser absorbido por las hojas y metabolizado, presenta potencial fitotóxico. Sus efectos se manifiestan en la cutícula foliar; ya que el ácido nítrico puede alterar la composición química de las ceras epicuticulares, afecta la conductancia estomatal y favorece la entrada de contaminantes vía estomas (González, 2005).

Entre los efectos directos para el hombre, puede causar irritación de tracto respiratorio y las membranas mucosas, daños cardiacos o dermatológicos (SMA, D.F., 2009).

Por otro lado existen investigaciones que consideran el agua de lluvia como fuente de nutrimentos hacia el ecosistema. Chadwick *et al.*, (1991) señalan que el origen de los nutrimentos en el ecosistema inicialmente derivan de la roca y gradualmente se agotan. Bajo condiciones constantes, los ecosistemas parecen estar en un estado profundo e irreversible de pérdida de nutrientes; no obstante, la contribución de elementos atmosféricos se dice podría mantener la productividad en selvas tropicales de Hawaii sobre suelos intemperizados.

La lluvia es un factor preponderante en la remoción de los compuestos atmosféricos solubles, junto con el depósito seco, lo que representa una medida del reciclaje de los diferentes componentes atmosféricos y una entrada significativa de nutrimentos a los ecosistemas forestales. La química de la lluvia tienen una gran relevancia en el momento de evaluar las interacciones atmosféricas y los ciclos biogeoquímicos (Andrade *et al.*, 1995; Sanhueza *et al.*, 2005). La lluvia puede contribuir como un fertilizante para suelos (Báez *et al.*, 1989), en una zona agrícola importante del país y con un rápido proceso de industrialización; se encontró que el aporte de N por parte de la precipitación representa el 22% de fertilizante utilizado, y del 5.4-22% de S del sulfato aplicado durante la época de siembra y crecimiento (Báez *et al.*, 1989). Los nutrimentos solubles llegan directamente al suelo y a la raíz, dando como resultado su potencial disponibilidad, superior a la que proviene del suelo o del intemperismo de la roca. Es importante mencionar que el N y S son elementos limitantes, por lo que la precipitación podría mantener los requerimientos de estos nutrimentos en áreas con deficiencia (Báez *et al.*, 1989).



### 3. ANTECEDENTES

La deposición ácida existe de manera natural desde la formación de la tierra, durante varios millones de años, a través de eventos volcánicos, incendios y recientemente por aportes antropogénicos. En los inicios de la Revolución Industrial Smith (1852) descubre la lluvia ácida como resultado de la combustión por el uso del carbón en Manchester, Inglaterra, no obstante, poca fue la atención que recibió su descubrimiento, pasando desapercibido por la mayoría de la gente. (Torres y Galván, 1999).

El fenómeno del depósito ácido comenzó a finales de los años 60's y principios de los 70's. Los primeros problemas ambientales generados por la lluvia ácida fueron la acidificación de los lagos en la península escandinava, afectando a los peces y la proliferación de algunas especies de algas y musgos bentónicos a expensas de otros, por efectos de altas emisiones de azufre y nitrógeno, al igual que en los lagos de Canadá y EEUU, este fenómeno se presentaría después en los bosques de Alemania, Checoslovaquia, Hungría, Polonia, Australia, Francia y Suiza entre otros. A partir de 1962, se realizan diversos estudios mesoregionales para determinar en forma espacial y temporal la precipitación ácida en Europa tomando como punto de partida la composición y las concentraciones de diferentes iones como sulfatos y óxidos de nitrógeno entre otros. Actualmente se han publicado estudios sobre precipitación química en países tropicales, así como estudios sobre la química del agua de lluvia para países con clima semiárido (Sánchez, 2009).

Durante 1993, Maravilla colectó diversas muestras de agua de lluvia en la Ciudad de México, al sur en Huipulco y en la Ciudad Universitaria, al oriente en Zaragoza y al norte en Tlalnepantla y se evaluó su capacidad de inducir Intercambio de Cromátidas Hermanas (ICH) y en las células meristemáticas de la raíz de *Vicia faba*, ya que es un sistema muy sensible que aporta datos seguros y confiables sobre mutágenos y que además ha probado ser un buen monitor de contaminantes ambientales, el pH reportado al que se expusieron las raíces fue de 4.7 a 5.8 y los testigos se trataron con agua destilada y agua acidulada que tienen un pH de 6.0 y 4.7 respectivamente. Las únicas muestras que presentaron incrementos significativos de ICH con relación al testigo fueron las de Huipulco (Maravilla *et al.*, 2001).

El interés actual se fundamenta en los efectos de la acidez en sistemas acuáticos y terrestres, los daños potenciales a cultivos y bosques, el creciente deterioro de los



materiales para construcción, etc. Sánchez realizó un análisis del agua de lluvia en la ciudad de Maracaibo, las muestras de agua de lluvia fueron recolectadas en tres períodos repartidos entre los años 1989 y 2001, con equipos de muestreo manuales y automáticos. Para los diferentes análisis realizados se utilizaron un espectrómetro de absorción atómica modalidad llama, Perkin-Elmer 3110 y un cromatógrafo iónico con detector de conductividad, marca Dionex 2000i/SP. El pH- PPV (Promedio Ponderado en Volumen) en la lluvia de Maracaibo es 4.8, indicativo de una atmósfera ligeramente ácida e influenciada por:  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{Cl}^-$  y  $\text{NO}_3^-$  en 86 %.

En nuestro país existen pocas investigaciones sobre lluvia ácida, y la mayoría se han realizado en ambientes urbanos (Torres y Galván, 1999; Velázco, 2002). En la Zona Metropolitana del Valle de México, el estudio de lluvia ácida inició en 1987, desde entonces se efectúan mediciones de la acidez del agua de lluvia y de los parámetros químicos: conductancia específica, sulfatos ( $\text{SO}_4^{2-}$ ), nitratos ( $\text{NO}_3^-$ ), calcio ( $\text{Ca}^{2+}$ ), potasio ( $\text{K}^+$ ) y magnesio ( $\text{Mg}^{2+}$ ), que son los que tienen mayor representatividad en la química del agua de lluvia y que son vigilados alrededor del mundo por las diferentes redes de monitoreo de lluvia ácida: SIMAT (Sistema de Monitoreo Atmosférico, Ciudad de México), NADP (Programa Nacional de Depósito Atmosférico, EUA), JARMN (Red de Monitoreo de Lluvia Ácida del Japón, Japón), CCPMN (Red de Monitoreo de la Precipitación Coleson Cove, Canadá), ENBPMN (Red de Monitoreo de Precipitación de New Brunswick, Canadá), CAPMON (Red de Precipitación y Aire Canadiense, Canadá) y ADMNEA (Red de Monitoreo de Depósito Ácido en el Este de Asia) (Figura 2).

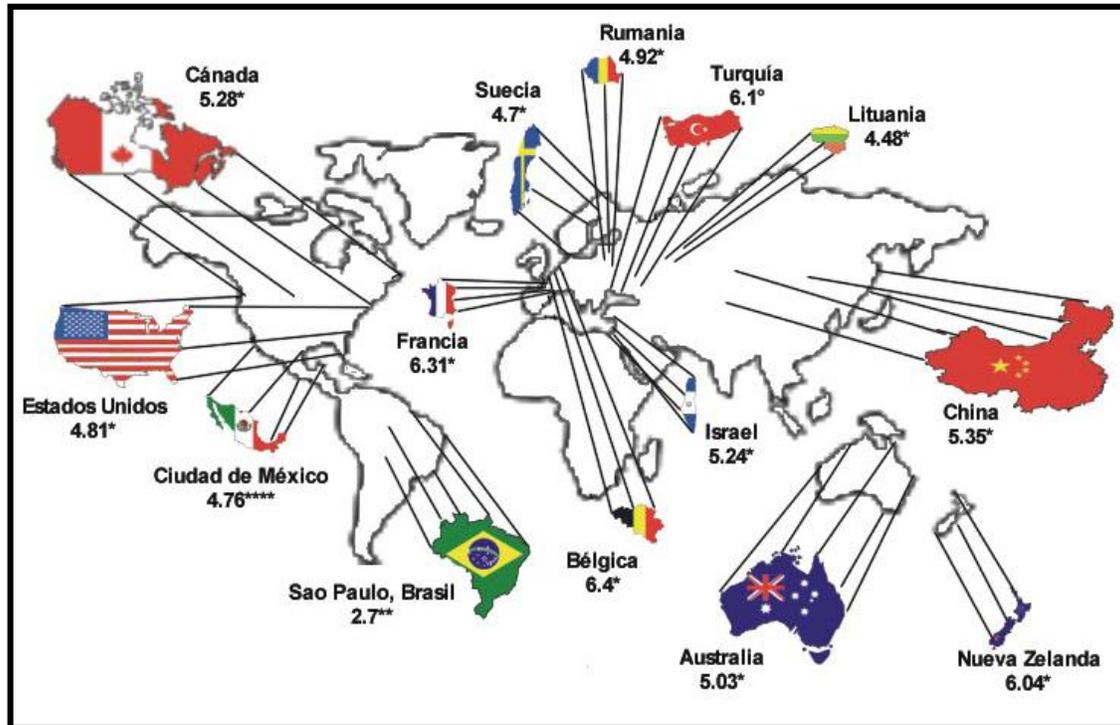


Figura 2. pH promedio del agua de lluvia de diferentes redes de monitoreo (tomado de Torres y Galván, 1999)

Fuentes:

\* Página del Programa SWOPE. Promedios de la primavera de 1997.

\*\*Forti, M., y cols. 1990. Elements in the precipitation of S. Paulo city (Brazil). Atmospheric Environment Vol. 24B, No. 2. p.p. 355 - 360.

\*\*\* Davies, D.T., et al., 1990. Use of simple daily atmospheric circulation types for the interpretation of precipitation composition at a site (Eskdalemuir) in Scotland, 1978 - 1984. Atmospheric Environment 24A (1), p.p. 63 - 72.

\*\*\*\*DGPC. Informe Anual 1998 del Programa de Precipitaciones Ácidas en la ZMCM. En proceso. 9Al-Momani, I.F., et al., 1995. Chemical composition of precipitation near an industrial area at Izmir, Turkey. Atmospheric Environment Vol. 29 No. 10. p.p. 1131 - 1143.

Actualmente, la Secretaría del Medio Ambiente del gobierno del Distrito Federal a través del Sistema de Monitoreo Atmosférico de la Ciudad de México (SIMAT) se encargan de vigilar la calidad del aire, con ayuda de 48 estaciones de monitoreo distribuidas en la zona urbana y el suelo de conservación (comprende las 16 delegaciones del Distrito Federal y 10 Municipios del Estado de México) (Torres y Galván, 1999) (Figura 3).

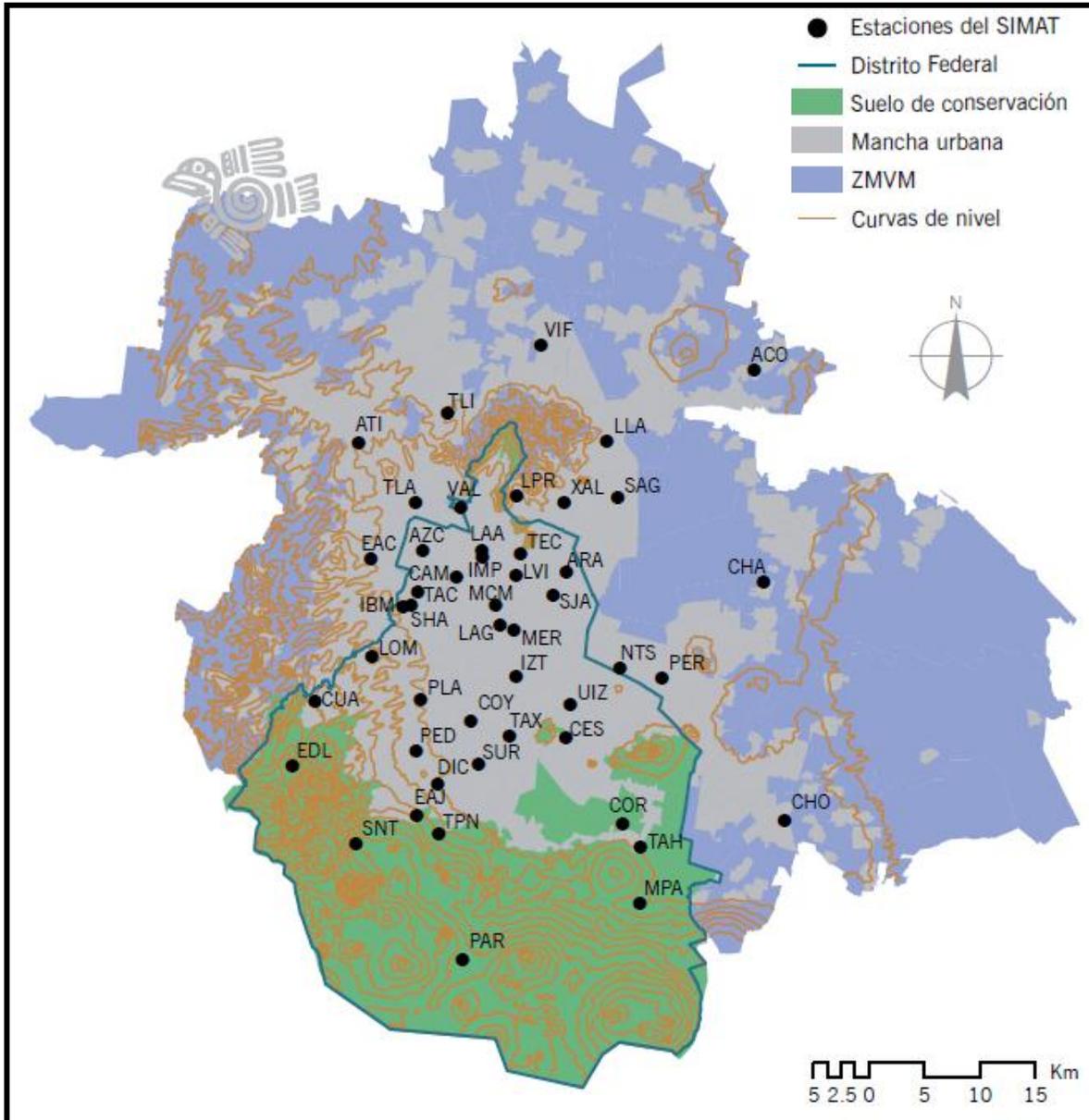


Figura 3. Distribución y cobertura de las estaciones de monitoreo del SIMAT (SMA, 2008)

La capacidad de autorregulación de los bosques o sobre el efecto químico que causa la vegetación cuando el agua de lluvia es interceptada por ella han sido poco estudiados.

Calva y Flores (1991) realizaron un estudio determinando los niveles de acidez que tienen los árboles en los bosques del Ajusco, El Pelado, Desierto de los Leones, Izta-Popo, Zempoala, Villa del Carbón, Tlalpan, Chapultepec y San Juan de Aragón. Los resultados muestran mayores niveles de acidez en los árboles de los bosques (pinos,  $\text{pH}=2.28$ ;



abetos, 3.55; cedros, 3.0; encinos, 3.9; fresnos, 4.26; álamos, 4.24; ailes, 3.55; olmos, 4.5 y garrya, 4.0), respecto a lo registrado en el agua de lluvia (Nevado de Toluca, pH=4.64; C.U., 4.47; Chapultepec, 4.60) para 1985 y 1987, la acidez aumentó registrando valores cercanos a 2.50. Los bosques que presentaron mayor acidez con sus árboles son el Izta-Popo (pH=2.2) y Villa del Carbón (pH=2.6).

Romero en 1998 analizó la precipitación pluvial en los Bosques de *Abies religiosa* del parque Cultural y Recreativo Desierto de los Leones, D.F., para determinar la presencia de lluvia ácida y la lixiviación de cationes del follaje, tomando en cuenta la precipitación en los claros de bosque y el escurrimiento foliar en periodos de recolección de una semana. Los resultados indican que en los bosques del Desierto de los Leones se presentaron lluvias ácidas, pH<5.65 y el contenido promedio de  $K^+$  y  $Mg^{2+}$  no tuvo diferencias significativas ( $p>0.05$ ) entre las fechas de muestreo y los tipos de recolección. (Romero, 2003).

En el año 2001 Velasco realizó una investigación sobre la composición química del agua de lluvia en bosques del poniente del Valle de México y los compara con investigaciones realizadas por el CENICA (Centro Nacional de Investigación y Capacitación Ambiental) y RAMA (Red Automática de Monitoreo Atmosférico) del Distrito Federal. Presenta resultados descriptivos de parámetros básicos para caracterizar la precipitación húmeda: volumen, pH, y conductividad específica; algunos iones que contribuyen a la acidez de la lluvia: sulfatos, nitratos y cloruros; así como elementos que en cierta proporción son esenciales para la vegetación: hierro, fosfatos, calcio, magnesio, manganeso, cobre, zinc y potasio y algunos son tóxicos para la vegetación: sodio, cadmio, aluminio, plomo y níquel (Velasco, 2002).

Martín realizó un análisis de seguimiento mensual de agua de manantial durante siete años (1994-2000), antes y durante la actividad del volcán Popocatepetl; encontró que el agua del manantial presenta un rango en el pH que va de 5.8 a 7.8 provocado en una mínima parte por la actividad del volcán y por la lixiviación del tipo de material que fue expulsado durante las erupciones, pero el volumen de ceniza en la mayoría de las erupciones es muy pequeño. Se registraron concentraciones de boro alrededor de 0,5 mg / L, el F lixiviado de componentes de las cenizas llegó a 197 mg / kg en 1996. Aunque el volumen de cenizas fue baja, el impacto de F en las cenizas de lixiviados en el suministro de agua no se debe subestimar. Las altas concentraciones de  $Cl^-$  y  $SO_4^{-2}$  de lixiviados de



cenizas también fueron reportados (1250 y 21775 mg / kg, respectivamente) (Martín *et al.*, 2002).

En el 2003, Pérez realizó la comparación con diferentes niveles de deposición atmosférica en el Parque Nacional Desierto de los Leones (DL) y Zoquiapan (ZOQ), se llevó a cabo el monitoreo de escurrimiento foliar y deposición total de manera semanal, para *Pinus hartwegii* Lindl. y *Abies religiosa* Schl. La deposición fue mayor en el DL que en ZOQ con respecto a  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ , Ca, Mg y K. En cuanto a los valores promedio de pH para escurrimiento bajo pino (Valor  $P=0.07$ ) y el abeto (Valor  $P=0.001$ ) fueron más ácidos en el DL (pH 5.23 de abeto) que en ZOQ (pH 5.78 de abeto). En ambos sitios el pH del escurrimiento colectadas bajo los pinos fue más ácida que las soluciones conseguidas bajo los árboles de abeto o en claros del bosque (Pérez, 2008).

López en el 2010 realizó un estudio en diferentes localidades (PN Izta-Popo, PN el chico y la Mojonera) con la finalidad de evaluar el efecto de la vegetación sobre el pH del agua de lluvia; en bosques templados. Con recolección de agua de lluvia en: *Pinus leiophylla*, *Abies religiosa*, *Cupressus lusitanica*, *Fagus grandifolia* y *Pinus patula*; bajo el follaje, fuste, hojarasca del arbolado y los claros del bosque (CB). Únicamente en el PNIP y la Mojonera se registró un pH promedio de 4.51 y 4.68 respectivamente, esto indicó presencia de lluvia ácida. Los sulfatos ( $11.03 \text{ mg L}^{-1}$ ) fueron mayores en la Mojonera; en el PNIP fueron significativamente mayores la CE y STD. El pH presentó mayores fluctuaciones en el follaje y la hojarasca, en esta última la CE y los STD fueron mayores en todos los sitios. Los escurrimientos superficiales aledaños registraron pH cercanos a la neutralidad. Las concentraciones de  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$  y  $\text{PO}_4^{3-}$  fueron menores en el flujo caulinar que en los CB.



#### 4. JUSTIFICACIÓN

Los estudios en el país versan sobre los efectos del agua de lluvia principalmente en zonas industriales o ambientes urbanos, sin embargo es necesario conocer la composición de la lluvia desde su caída y sus cambios al interactuar con la vegetación hasta su incorporación al suelo, al considerar que los compuestos químicos depositados en la superficie foliar y fustal o aquellos que son liberados desde el interior de los tejidos vegetales, modifican el pH de la lluvia y actúan como reguladores de la acidez, además es importante definir si se presenta el mismo efecto en toda la vegetación arbórea o este es específico para cada género. Existen pocos estudios en el país sobre el comportamiento y efecto de la deposición húmeda en áreas de conservación. De acuerdo a los antecedentes se han utilizado periodos largos de recolección de agua de lluvia que van de semanas a meses, lo que da lugar a cambios en las características del agua en función del tiempo de almacenaje, sin conservación.

Con base en lo anterior en este estudio se plantea realizar la recolección inmediata del agua de lluvia en la precipitación libre y como producto del escurrimiento foliar, fustal y de lixiviación a través de la hojarasca acumulada en el suelo, para los géneros *Abies* y *Pinus*, con la intención de conocer más acerca del efecto amortiguador de la vegetación y evaluar la presencia, tendencia e impacto de la lluvia ácida, en esta región.



## 5. OBJETIVOS

### 5.1 Objetivo General

Determinar la composición iónica del agua de lluvia desde su caída y en su intercepción con estructuras arbóreas para los géneros *Abies* y *Pinus*; en el Bosque templado del área de influencia del PNIP.

### 5.2 Objetivos Particulares

- Caracterizar el agua de lluvia proveniente de claros, escurrimiento foliar, fustal, y hojarasca a través de los siguientes parámetros:

Físicos	Químicos
pH	Alcalinidad
STD (Sólidos Totales Disueltos)	Durezas (Calcio y Total)
CE (Conductividad Eléctrica)	Nitratos
	Cloruros
	Sulfatos

- Determinar la variación temporal del pH y de la concentración de  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{Cl}^-$  y  $\text{SO}_4^{2-}$  en el agua de lluvia.
- Determinar el pH y la concentración de  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{Cl}^-$  y  $\text{SO}_4^{2-}$  en el pluviolavado, escurrimiento fustal y bajo la hojarasca para los géneros *Abies* y *Pinus*.
- Comparar los resultados obtenidos en campo para cada uno de los géneros y estructuras arbóreas.
- Comparar experimentalmente el efecto del follaje y la corteza de los géneros *Abies* y *Pinus*, en el nivel de acidez y composición iónica ( $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{Cl}^-$  y  $\text{SO}_4^{2-}$ ) en el agua.
- Comparar los resultados experimentales con los registrados en campo para cada uno de los géneros y estructuras arbóreas.



## 6. HIPÓTESIS

“La lluvia ácida se presenta con mayor incidencia en áreas urbanas y zonas industriales (Henry, 1999; Moreno, 2001; Klumpp, 1998); debido a la cercanía del bosque templado del Parque Nacional Izta-Popo con la Zona Metropolitana de la Ciudad de México se espera que el agua de lluvia tenga valores de pH menores a 5.6.

El escurrimiento por las diferentes estructuras arbóreas, modificará el pH y la composición del agua de lluvia que es interceptada por la vegetación; ya que se favorecerá la disolución de los iones presentes en la deposición seca o exudados liberados por los órganos vegetales. Esperando un efecto diferencial según el género (Pérez 2008, Moreno, 2001; Guilherme, 1995).

Se espera que la concentración de los iones analizados sea mayor al inicio del periodo de lluvias y disminuya conforme finaliza la temporada. Así mismo en el agua colectada bajo las estructuras arbóreas la concentración iónica será mayor respecto a la colectada en los claros del bosque, lo cual favorecerá la neutralización de la misma”.

## 7. ÁREA DE ESTUDIO

### 7.1 Ubicación geográfica

Se localiza en la parte centro-oriental del Eje Volcánico Transversal. Ocupa parte de la Sierra Nevada en su porción sur y de la Sierra de Río Frío en su porción norte se encuentra en las coordenadas  $18^{\circ}54.6'$ ,  $19^{\circ} 42' N$  y  $98^{\circ} 31.2'$ ,  $98^{\circ} 48' W$ , con una extensión de 1320.16 Km<sup>2</sup>. Su topografía comprende los volcanes Popocatepetl 5,452 m y la Iztaccíhuatl 5,280 m que dan nombre al Parque Nacional. Abarca una superficie de 40,008 hectáreas dividida entre los estados de México, Puebla y Morelos, en los municipios de Texcoco, Ixtapaluca, Chalco, Tlalmanalco, Amecameca, Atlautla y Ecatezingo, en el Estado de México; Tlahuapan, San Salvador el Verde, Chautzingo, Huejotzingo, San Nicolás de los Ranchos y Tochimilco, en Puebla; y Tetela del Volcán, en Morelos (CONANP, 2009).

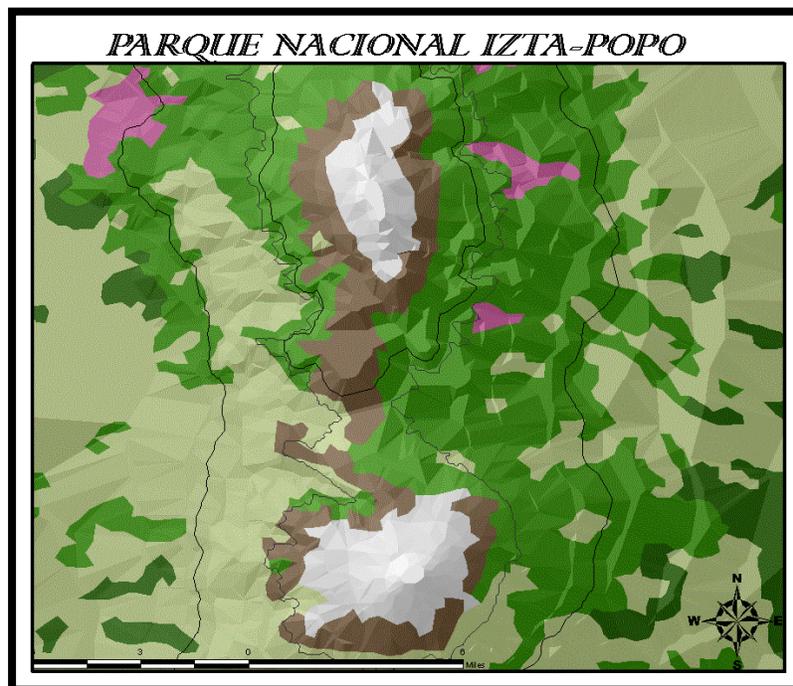


Figura 4. Ubicación del área de estudio, PNIP y su zona de influencia.



## 7.2 Altitud

Los niveles de altitud que va de los 3600 a los 5452 msnm en los que se sitúa el Parque, permiten variaciones climáticas importantes de muy frío en las partes más elevadas a templado en las más bajas (Rojas, 2001).

## 7.3 Clima

Los tipos de clima que presenta esta zona fueron definidos por García (1973) como:

- I. EFHw (muy frío), que se presenta en las partes más elevadas de los altos picos a una altitud superior a los 5000 msnm, con condiciones glaciares y periglaciares, este último con la variante ETHwi (clima frío) de los 4500 a 5000 msnm.
- II. C(w2)b, (templado) se distribuye de manera radial a los volcanes y es la transición entre los fríos y los templados, hasta un altura aproximada de 4000 msnm.
- III. C(w2), (templado) se presenta en las partes más bajas de la zona y es la transición hacia los climas cálidos.



Figura 5. Parque Nacional Izta-Popo; (Foto Manuel Avila de los Santos)



## 7.4 Hidrología

Los recursos hídricos son originados por el deshielo de los glaciares y la precipitación pluvial, abundante en la región; anualmente se registran entre 800 y 1300 mm de lluvia en el área, esto da lugar a corrientes superficiales permanentes e intermitentes. Estos ecosistemas de la Sierra Nevada permiten la recarga de acuíferos y mantos freáticos que abastecen parcialmente la Zona Metropolitana del Valle de México, el Valle de Puebla-Tlaxcala y el Valle Cuautla-Cuernavaca (CONANP, 2009).

La distribución altitudinal de los recursos hídricos se caracteriza por una pendiente pronunciada en su curso alto, arriba de los 4,500 msnm, cada vez más atenuada conforme descienden. A la altura del parteaguas, la precipitación cae en forma de nieve o granizo, ello permite la formación de hielo o glaciares que sufren un proceso de ablación paulatina. Debajo de la cota mencionada y hasta los 4,000 msnm los escurrimientos son incipientes, a partir de los vértices de los glaciares donde comienza el deshielo, escurriéndose aguas abajo; en esta zona aparecen los primeros manantiales. Por debajo de los 4,000 msnm los arroyos adquieren velocidad y volumen y los manantiales son más abundantes. Por abajo de los 3,500 msnm las aguas ejercen una fuerte erosión en el terreno ya que su caudal es la suma de los deshielos y las precipitaciones. Entre los 2,500 msnm y los 2,300 msnm los arroyos depositan gran parte del material arrastrado a lo largo de su trayectoria, formando abanicos aluviales. En esta zona encontramos actividades con aprovechamiento del agua para regadío agrícola, generación de energía eléctrica y uso doméstico en los asentamientos humanos.

El parteaguas de la Sierra Nevada es el origen que divide las aguas tributarias del Océano Atlántico (Golfo de México) de las del Océano Pacífico. Dado el papel fundamental que cumplen estas montañas como verdaderas fábricas de agua debido a sus boscosas zonas que captan y filtran el agua que abastece a dos importantes cuencas hidrológicas: la del Valle de México y la del alto Balsas. Hacia la parte occidental descienden gran cantidad de arroyos que van a desembocar al norte de la Sierra Nevada en la antigua zona lacustre de la subcuenca Chalco y Lago de Texcoco, los cuales, a través del Gran Canal del Desagüe son tributarios del Río Tula y a su vez éste del Pánuco que desemboca en el Golfo de México. Hacia el sur de la Sierra Nevada las corrientes que descienden contribuyen a formar el Río Cuautla que alimenta la subcuenca del Río Nexapa tributaria de la cuenca del Balsas. En la vertiente oriental los escurrimientos del



macizo montañoso conforman la subcuenca del Río Atoyac, tributaria también de la cuenca del Balsas, misma que desemboca en el Océano Pacífico (CONANP, 2010).

## 7.5 Geología

Esta zona se caracteriza por la presencia de rocas volcánicas del Cenozoico, principalmente del Terciario aunque se encuentran de manera aislada afloramientos de rocas mesozoicas del Cretácico tardío. La evolución tectónica de la Sierra Nevada generó un conjunto de estructuras que manifiestan una zona de arqueamiento de la corteza terrestre, producto de esfuerzos compresivos que ejerce la placa de Cocos contra la placa Continental Americana y el rígido del Golfo de México.

Dichas estructuras constan de fallas de cizalla o de corrimiento, fallas normales y fallas inversas. Debido a que son originadas por un vulcanismo más antiguo, las rocas andesíticas y dacíticas de la parte norte del área (Zona de Zoquiapan) son las más expuestas a los agentes meteóricos (contrastes de temperatura, humedad y acción de los vientos) que actúan de manera interna y externa, provocando el agrietamiento y descomposición de los componentes internos de las rocas (minerales), contribuyendo a la generación de suelos. Sin embargo, la actividad volcánica constante del Popocatepetl interrumpe los procesos de intemperismo y erosión, originando depósitos recientes (derrames de lava, material piroclástico, y lahares) que cubren las rocas más antiguas, pero que en ocasiones cambian los relieves de la región (erupción de hace 23 mil años). Por otro lado, el intenso tectonismo y magmatismo en la zona ha causado fracturamiento en las rocas, lo que favorece la infiltración del agua de lluvia en la zona montañosa y de esta manera alimenta los cuerpos de agua subterráneos. Estos agentes endógenos y exógenos le dan a las rocas ciertas características que pueden alterar el medio ambiente de la región (CONANP, 2009).

## 7.6 Vegetación

El Parque Nacional Izta-Popo es el remanente más importante de bosques de coníferas y praderas de alta montaña en el centro del país. Su importancia radica no sólo en la extensión de bosques en buen estado de conservación (más de 21,000 hectáreas de bosque conservado que representan 52.72% de la superficie total del parque), sino en la diversidad de su flora y fauna. Su captación de dióxido de carbono, generación de oxígeno, regulación del clima, además de proveer grandes atractivos turísticos.



Hasta los 3,100 m de altitud se encuentran asociaciones dominadas por *Pinus montezumae*. Forman un dosel de 20 a 30 m sobre el nivel del suelo frecuentemente asociado con especies de los géneros *Quercus*, *Abies*, *Arbutus*, *Alnus*, *Salix* y *Buddleia* en la zona del Popocatepetl. Por su parte, en Zoquiapan la distribución del bosque de pino, dominado por las especies de *Pinus hartwegii* y *Pinus montezumae*, se asocia más a las condiciones de suelos profundos o someros pero con bastante materia orgánica.

Se establecen asociaciones vegetales de transición entre *Pinus* y *Abies* lo que implica que son zonas de amplia diversidad florística y ecológica conformando rodales mixtos de *Pinus ayacahuite* con *Abies religiosa*. En esta zona de ecotono también es frecuente la asociación de *Pinus montezumae* con *Pinus hartwegii*. En estos bosques el dosel no es muy cerrado, lo que permite el establecimiento y desarrollo de diversas especies arbóreas, arbustivas y herbáceas. Entre los géneros mejor representados pueden citarse: *Pinus*, *Senecio*, *Ribes*, *Muhlenbergia*, *Agrostis*, *Lupinus* y *Festuca*.

En las partes más elevadas y abruptas hacia los 3,600 msnm se establece el bosque de *Pinus hartwegii* tolerante a las temperaturas bajas, frecuentes nevadas y probablemente uno de los pinos más adaptados a los incendios superficiales. En las partes bajas de su área de distribución forma rodales abiertos con árboles entre 15 y 20 m de altura, asociados con zacatonal denso y leguminosas como *Lupinus* spp., pero hacia las partes más elevadas (4,000 msnm), con frecuencia constituye un bosque achaparrado (de 5 a 8 m de alto) y más bien abierto, aunque algunos individuos aislados pueden encontrarse en los 4,200 msnm, que es el límite altitudinal arbóreo en México (CONANP, 2009).

Por la morfología y la disposición de sus hojas, los pinos poseen una fisonomía particular y los bosques que forman presentan un aspecto que difícilmente puede confundirse con el de otros tipos de vegetación. La mayoría de especies mexicanas de *Pinus* posee afinidades hacia los climas templados a fríos y semihúmedos y hacia los suelos ácidos, el grueso de la masa forestal de pinos mexicanos se desarrolla a altitudes entre 1500 y 3000 m. A elevaciones mayores los pinares también son frecuentes y constituyen el único tipo de bosque que alcanza el límite superior de la vegetación. Los límites absolutos de distribución marcan tolerancia de temperatura media anual entre 10 y 20 °C y entre 600 y 1000 mm de lluvia al año, lo cual correspondería al tipo de clima Cw de la clasificación de Koeppen (1948). En general son áreas afectadas por heladas todos los años y la precipitación se concentra en 6 a 7 meses (Rzedowski, 2006).



Los pinares de México muestran preferencia por áreas cubiertas con rocas ígneas, tanto antiguas como recientes. También se les encuentra a menudo sobre gneis y esquistos, así como sobre margas, areniscas, lutitas y calizas y en suelos cuyo pH varía generalmente entre 5 y 7.

Los bosques de *Abies* sobresalen entre el conjunto de las comunidades vegetales dominadas por coníferas (Rzedowski, 1978). Sus características más sobresalientes del clima son:

- Clima subisotérmico, sin estación fría y caliente bien diferenciada.
- Con estación seca bien diferenciada
- Temperatura media anual entre 7 y 15 (20) ° C
- Nevadas moderadas escasas o ausentes
- Oscilaciones diurnas de la temperatura intensa
- Insolación intensa
- Largo del día poco variable en el transcurso del año

La distribución geográfica de los bosques de *Abies* en México es en extremo dispersa y localizada. En la mayor parte de los casos la comunidad se presenta en forma de manchones aislados, muchas veces restringidos a una ladera o a una cañada. Este tipo de vegetación está confinado a sitios de alta montaña, por lo común entre 2400 y 3600 m de altitud. La precipitación media anual es por lo común superior a 1000 mm, distribuida en 100 o más días con lluvia apreciable. Las nevadas se presentan casi todos los años hacia el límite altitudinal superior de la comunidad, pero a 2500 msnm pueden faltar por completo. En el PNIP la especie dominante de los bosques de oyamel es el *Abies religiosa*, con un intervalo altitudinal entre 2,400 a 3,500 msnm. El dosel suele estar entre los 20 y 40 m sobre el nivel del suelo. Los suelos son típicamente profundos, bien drenados pero húmedos todo el año. En muchos sitios se hallan limitados a cañadas o barrancas más o menos profundas que ofrecen un microclima especial. No se desarrollan sobre terrenos planos o poco inclinados, pero tal hecho quizá está en función de la escasez de estos terrenos en la zona montañosa y de la influencia humana (CONANP, 2009).



## 7.7 Descripción de los géneros estudiados

### 7.7.1 Género *Pinus*

Los pinos son árboles siempre verdes, resinosos, con hojas aciculares, en número de 1 a 8, protegidas en la base por una vaina caediza o persistente y con los frutos en forma de cono leñosos, formados por escamas que protegen las semillas.

- Semilla. Tiene forma de nuez, es de color negruzco, oval, con un ala más o menos desarrollada, su tamaño varía de 4 a 5 mm. por lo general se encuentran dos semillas en cada escama, cuando la semilla es grande una de ellas se atrofia, este es el caso del piñón.
- Ala. Es un órgano de transporte, que impulsado por el viento disemina las semillas a varios kilómetros de distancia, siempre y cuando esté desarrollada.
- Tallo. Se levanta derecho produciendo ramas delgadas, las cuales van desapareciendo a medida que el tronco crece, presentándose las ramas definitivas, son verticiladas. La altura varía según la especie y su condición de vida.
- Corteza. Por regla general es lisa y delgada en árboles jóvenes; gruesa, rugosa y áspera en los árboles viejos, su color puede ser pardo o pardo rojizo amarillenta o anaranjada, más o menos oscuro o casi negro. A medida que aumenta el espesor, las cortezas se agrietan formándose placas alargadas e irregulares, presenta una coloración rojiza, en muchos casos las características ayudan en la determinación de especies.
- Hojas definitivas. Son aciculares, en fascículos que están sostenidos por una vaina, El número varía según la especie, el medio, siendo tres y cinco las más comunes, su longitud varía desde dos y medio centímetros hasta cuarenta o más. Los bordes por lo general son aserrados, con los diente-cillos muy pequeños y uniformes, su color varía de verde claro, oscuro, azulado, amarillento, opaco y brillante, en cuanto a la dirección se presentan erguidas, caídas o colgantes.
- Vaina. Es un conjunto de escamas que sostiene a los fascículos y está formado por escamas sobrepuestas, su superficie es escamosa o anillada. En algunos pinos las vainas son persistentes es decir acompañan a las hojas hasta que estas





como bosque de *Abies*, bosque de abetos o bosque de oyamel, prospera en altitudes que van de los 2800 a los 3500 msnm, siendo la óptima, 3200 msnm (SIRE, 2007).

Árbol monóico de 35 a 40 m de altura, en ocasiones hasta 60 m, y diámetro hasta de 1.80 m. Presenta ramas verticales y extendidas que se cortan gradualmente formando una copa piramidal o cónica (Figura 7). Su corteza es áspera y agrietada de color grisáceo. Se le considera una de las pináceas de porte más elegante. La producción de conos masculinos de *Abies religiosa* es lateral en las ramillas de la parte baja del árbol, los conos son oblongos y miden de 12 a 13 mm de largo por 5 mm de ancho y están protegidos por brácteas oscuras. Los conos femeninos se observan en la misma época en las ramillas más altas, son cilíndricos-oblongos, de aproximadamente 7 cm de largo, con grandes brácteas rojizas de margen blanco, translúcido y con una banda verde longitudinal. Las semillas presentan una forma ovoide u oblonga de 10 a 12 mm de largo, provistas de un ala lateral, oblicua, suave, delgada, quebradiza y de color castaño claro. El uso más importante como de árbol de navidad, además sus ramas son usadas en ceremonias religiosas para adornar y la pulpa se utiliza para fabricar papel (Rzedowski, 1978).



Figura 7 *Abies religiosa* Fuente de la imagen: [www.conafor.gob.mx](http://www.conafor.gob.mx), Fotos Manuel Avila de los Santos



## 8. MÉTODOS

La realización de este trabajo se llevó a cabo en tres fases:

### 8.1 Gabinete

Se realizó la búsqueda y revisión continua de información bibliográfica y digitalizada, así como una búsqueda cartográfica de las principales comunidades y vías de acceso a la zona de muestreo en áreas boscosas con influencia de contaminación atmosférica. Se eligió el sitio de muestreo donde coexistiera pino y oyamel para realizar la comparación, donde el bosque de pino (*Pinus*) es el de mayor importancia, seguido del bosque de oyamel (*Abies*).

Se eligió el diseño experimental en el laboratorio en la temporada de secas, para observar el efecto del follaje y la corteza en la composición iónica del agua.

A partir de los resultados obtenidos tanto en el diseño experimental como en campo se construyó una base de datos a partir de la cual se realizaron las gráficas y el análisis correspondiente. Se realizó un análisis de varianza de una vía con el propósito de establecer si existieron diferencias entre la precipitación incidente (claro) y el escurrimiento del follaje, fuste y hojarasca para cada especie con un nivel de significancia de  $\alpha=0.05$ , y mediante la comparación de medias a través de la prueba de Scheffer.

Además se realizó una prueba de hipótesis simple para comparar el comportamiento que tiene el agua de lluvia en los claros durante los meses de muestreo.

### 8.2 Campo

El trabajo de campo consistió en:

Elegir el sitio de muestreo de acuerdo a las necesidades y optimización del proyecto, coleccionar muestras de agua de lluvia de cada una de las diferentes fuentes: claros del bosque (CB), bajo las hojas de los árboles (H-x), del escurrimiento fustal (EF-x) y bajo hojarascas (BHs-x), siendo "x" el Género o Individuo de donde proviene el escurrimiento fustal y el pluviolavado.

Una vez en el sitio de estudio este fue georreferenciado con un GPS (Garmin Vista) y posteriormente se eligieron aleatoriamente los individuos para el estudio y en cada uno de ellos se realizó lo siguiente: (Figura 8).

- I. Bajo las hojas de los árboles: se colocaron aleatoriamente recipientes abiertos de polietileno, de tal forma que el escurrimiento del follaje se depositara en ellos, a esto se le denominó flujo caulinar.
- II. Escurrimiento fustal: se instaló en cada árbol elegido un sistema de conducción de flujo sobre la corteza alrededor del tronco, para coleccionar el agua de la lluvia que fluye por el fuste antes de alcanzar la superficie edáfica. Los sistemas de conducción consisten en una manguera de polietileno abierta y situada alrededor del tronco, la cual se colocó a 60 cm de altura del suelo formando un canal que conduce el escurrimiento del fuste al colector ubicado al pie del árbol.
- III. Bajo la hojarasca: Se colocaron recipientes por debajo de la hojarasca al pie de los árboles y se cubrieron con malla para evitar que se acumulen restos vegetales, materia orgánica u organismos pequeños al material de los colectores y que alteren las muestras.
- IV. Claros del Bosque: se instalaron colectores abiertos de polietileno al azar en áreas abiertas al interior del bosque (dentro de un radio  $\geq 20$  m del área de muestreo),



Figura 8 Flujo del agua a través del ecosistema muestreado, Fotos Manuel Avila de los Santos



para la colecta de la precipitación incidente.

- V. La colecta de las muestras se llevó a cabo durante el periodo de lluvias. Cabe señalar que las muestras del agua se recogieron lo más rápidamente posible (antes de 24 horas) después de la precipitación pluvial para evitar interferencias en los resultados.
  - VI. Una vez recolectadas las muestras se determinaron *in situ* el pH, Sólidos Totales Disueltos (STD) y Conductividad Eléctrica (CE) con un potenciómetro digital de campo (Hanna HI 98311).
  - VII. Las muestras de agua se conservaron de acuerdo a las técnicas citadas en el APHA-AWWA-WPCF, 1992., a una temperatura de 4° C (en botellas de plástico de 125 mL) para su posterior análisis en el laboratorio.
- A. Posteriormente se realizó una coleta de agua del lugar y de cada una de las estructuras arbóreas para su uso en el experimento a realizar en laboratorio.
- La toma de muestras de tejido vegetal se realizó de manera aleatoria para cada género.
  - Se tomaron porciones de corteza a la altura del pecho y de follaje libre de conos, de árboles en buenas condiciones. La selección de árboles en la microcuenca de estudio fue al azar.
  - La toma de muestra de agua se realizó en el arroyo adyacente al sitio de estudio.

### 8.3 Laboratorio

En el laboratorio se determinaron los siguientes parámetros a cada una de las muestras colectadas (Figura 9): Alcalinidad (Método de dos indicadores), dureza total y de calcio (Método complejométrico), nitratos (Método del ácido fenoldisulfónico), cloruros (Método Argentométrico) y sulfatos (Método Turbidimétrico) (NMX-AA-073-SCFI-2001, NMX-AA-079-SCFI-2001, NMX-AA-074-1981, APHA-AWWA-WPCF, 1992).



Figura 9 Tratamiento de muestras del agua de lluvia en el laboratorio

B. Para el diseño experimental se realizaron las siguientes actividades:

- 1) Se eligió un diseño de 3 factores que consideró:
  - a. Tres diferentes tipos de agua (Simulación del agua de lluvia (SALL), Agua del arroyo adyacente(AL), Agua destilada como testigo (AD));
  - b. Dos estructuras arbóreas (corteza, foliar)
  - c. Dos géneros de árboles (*Abies* y *Pinus*).
- 2) Para los tipos de agua:
  - a. Preparación de una disolución con concentración iónica similar a la obtenida para el agua de lluvia en los muestreos en campo (Simulación de agua de lluvia).
  - b. Caracterización inicial de c/u de los tipos de agua a utilizar en el tratamiento con las estructuras arbóreas (agua destilada, agua de lugar, simulación de agua de lluvia).
- 3) Para las estructuras arbóreas se pesaron muestras de 20 g de muestra foliar (libre de conos) y de 10 g de corteza, estas se adicionaron por separado a cada recipiente de plástico con 500 mL del agua de acuerdo al tratamiento correspondiente.
- 4) Montaje del diseño experimental (Figura 10):

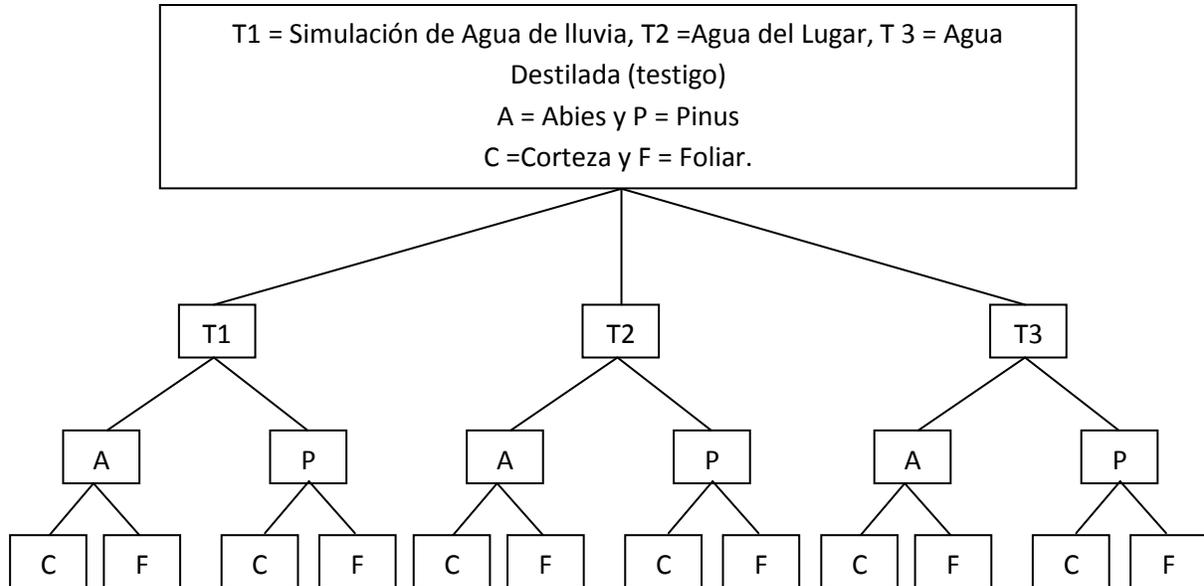


Figura 10. Diagrama de árbol del Diseño Experimental

5) Para los dos géneros se realizó:

- a. La caracterización inicial y evaluación de los tratamientos durante un periodo de 15 días con monitoreo diario del pH, STD (Sólidos Totales Disueltos), y CE (Conductividad Eléctrica) de cada una de las muestras.
- b. Determinación de Nitratos, Sulfatos y Cloruros en las muestras en la etapa inicial y final de los tratamientos (APHA-AWWA-WPCF, 1992, NMX-AA-073-SCFI-2001, NMX-AA-079-SCFI-2001, NMX-AA-074-1981, APHA-AWWA-WPCF, 1992).



Figura 11. Diseño experimental, Fotos Manuel Avila de los Santos



## 9. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Se eligieron dos especies vegetales *Pinus leiophylla* y *Abies religiosa*, por ser representativos de la comunidad arbórea que se presenta en el Parque Nacional Izta-Popo y su área de influencia.

De acuerdo a la distribución espacial del pH del agua de lluvia medido en las muestras de los claros durante el periodo de junio a noviembre del 2009 se registraron los intervalos que se muestran en el Cuadro 2.

**Cuadro 2. Intervalos de pH en muestras de agua de lluvia recolectadas en los claros del Bosque (junio-noviembre 2009)**

FECHA	pH (Claros)
Junio	3.86 - 5.98
Julio	3.18- 5.47
Agosto	5.24 - 5.82
Septiembre	2.38 - 5.10
Octubre	4.71 - 6.6
Noviembre	4.27 - 5.94

Mediante una prueba de hipótesis simple se corroboró que la mayoría de los meses el agua de lluvia presentó un valor medio significativo en el  $\text{pH} < 5.6$  ( $\alpha=0.05$ , Valor  $P \leq 3.7E-6$ ). Durante los meses de muestreo el pH en los claros del Bosque (testigo) fue con presencia de lluvia ácida, únicamente en octubre el pH promedio del agua de lluvia no se considera como lluvia ácida ya que fue mayor a 5.6 (Figura 12). Esto nos indica que la lluvia ácida no es exclusiva de áreas urbanas e industrializadas, ya que también se presenta en zonas sujetas a conservación como lo es el Parque Nacional Izta-Popo (Cuadro 3).

La química del agua de lluvia se ve afectada debido a que la ZMVM posee una alta carga de SOx y NOx emitidos al ambiente principalmente en las zonas centro, noroeste y noreste, lo cual se asocia con la afluencia vehicular y un mayor número de industrias. Por su parte, en la periferia de la Ciudad de México las emisiones son menores y predominan las áreas forestales y agrícolas.

Durante los meses de junio a septiembre, entre los 3000 y 5800 m de altitud la distribución de los vientos es dispersa; sin embargo, existen patrones de vientos



incipientes con dirección Oeste que contribuyen con el depósito seco en el sitio de estudio (Delgado et al., 1995). Además de lo anterior, en la ZMVM el patrón de viento predominante tiene una dirección norte – suroeste la mayor parte del año. Se infiere que este fenómeno propicia que son pocos los contaminantes que se desplazan hacia la región montañosa del sureste de la Ciudad de México por lo que la emisión de SO<sub>x</sub> y NO<sub>x</sub> que se acumulan en esta región pueden ser de producción local o regional.

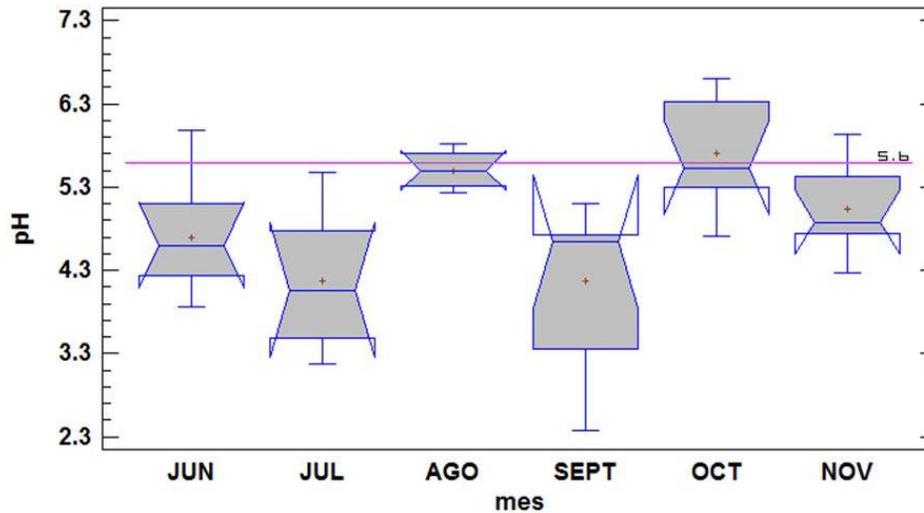


Figura 12 Variación del pH del agua de lluvia durante los meses de muestreo

Cuadro 3. Caracterización del Sitio de Estudio y valores promedio para el agua de lluvia (Junio- Noviembre del 2009)

PNIP	
ALTITUD (msnm)	3167
SUELO	Andosol húmico
ROCA	Basáltica y andesítica
P(mm)	1134
T media (°C)	8.8
pH (promedio)	4.91
CE ( $\mu\text{S m}^{-1}$ )	29.55
STD ( $\text{mgL}^{-1}$ )	15.63
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> ( $\text{mgL}^{-1}$ )	0.3691
Cl <sup>-</sup> ( $\text{mgL}^{-1}$ )	0.5875
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> ( $\text{mgL}^{-1}$ )	0.3406



Los resultados de pH que se encuentran en los claros del bosque reportados por Sanhueza (2005), en la Gran Sabana, Parque Nacional Canaima; Venezuela fueron valores promedio de 5.09, 5.37 y 5.18 para Parupa, Luepa y Kavanayén respectivamente, mostrando lluvia ácida en los tres casos.

Por su parte Velasco *et al.*, (2002) al realizar un estudio en los Bosques del Valle de México registró valores promedio de 4.72 para Chapa de Mota, 4.91 para el Ex Desierto de los Leones, 5.32 para San Luis Ayucan y 5.87 en la UAM-Iztapalapa.

López en el 2010 reportó valores de pH en un estudio para diferentes localidades (PN Izta-Popo, PN El Chico y la Mojonera) con la finalidad de evaluar el efecto de la vegetación sobre el pH del agua de lluvia; en bosques templados. No se encontraron diferencias significativas entre los tres sitios de estudio, aun cuando en el PNCH se registraron valores de  $5.68 \pm 0,4$  y valores ácidos en la MOJ y en el PNIP de  $4.68 \pm 0.31$  y  $4.51 \pm 0.4$  respectivamente.

Aunque existen diferencias en cuanto a localización geográfica, distribución de vientos y cantidad de partículas existentes en el aire de las zonas de estudio mencionadas anteriormente, los resultados encontrados respaldan que las lluvias acidas no son exclusivas de zonas urbanas y también se presentan en áreas de conservación.



### 9.1 Evaluación del pH, SDT Y CE en las estructuras arbóreas

En *Pinus leiophylla* (Figura 13 y 14) el agua de lluvia no manifestó cambios significativos entre el pluviolavado (4.95) y el escurrimiento fustal (4.98), sino hasta llegar a la hojarasca; donde el pH se incrementó a 5.6. Estas consideraciones coinciden con el comportamiento encontrado en la prueba de Scheffer, lo cual revela que sólo existieron diferencias significativas con el pH del agua procedente de la Hojarasca (Intervalo de confianza de 95%, Valor  $P \leq 0.0083$ ) comparado con el que se presenta en el Claro (pH promedio=4.78), follaje (4.95) y fuste (4.98). Esto como resultado de que bajo la hojarasca se presentan iones alcalinos provenientes del lavado de las rocas y del arrastre de partículas del suelo que atenúan el pH ácido.

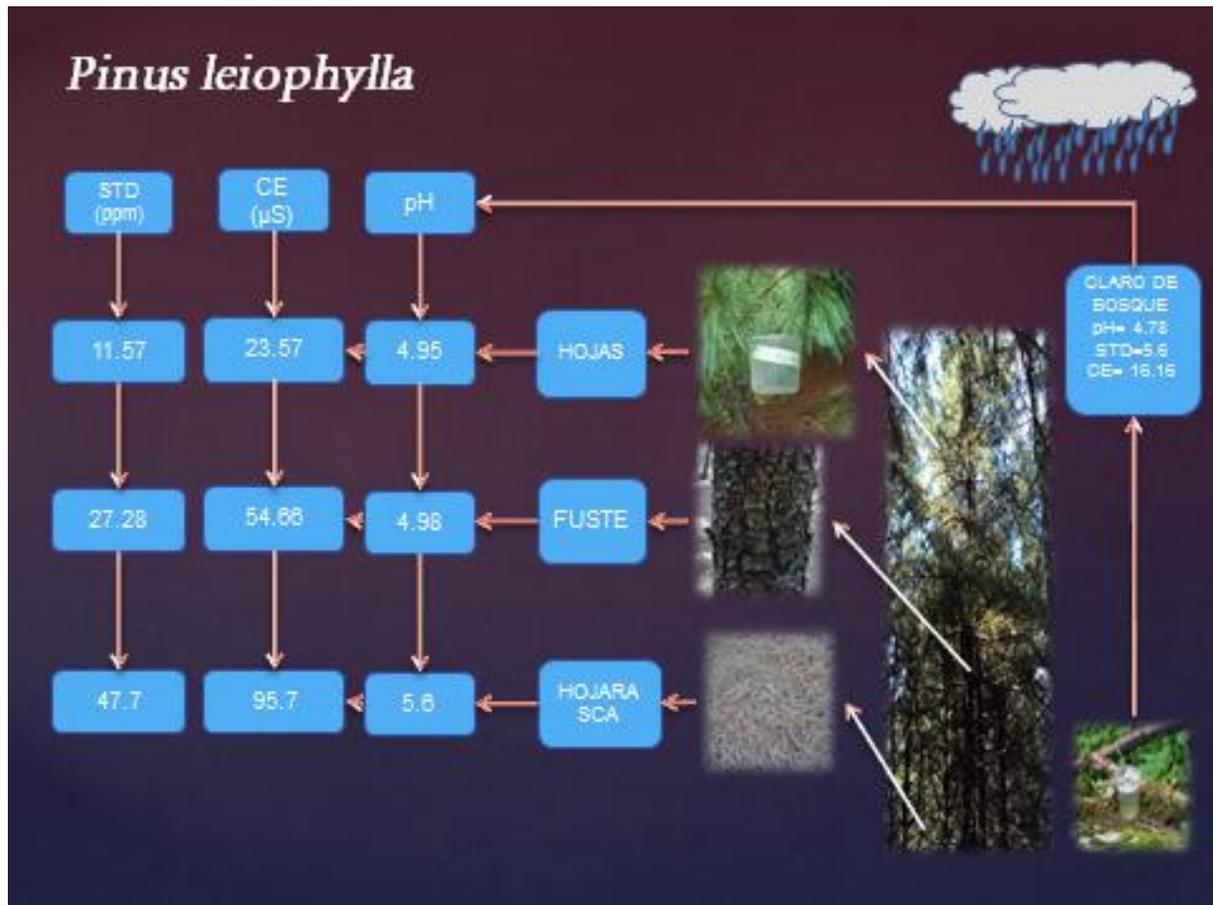


Figura 13. Diagrama de la variación promedio del pH, STD y CE para *Pinus leiophylla*.

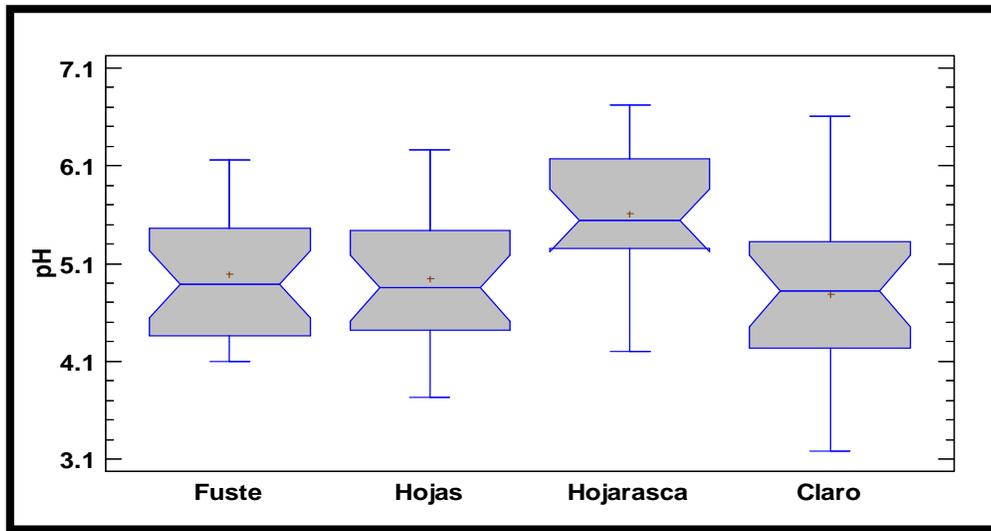
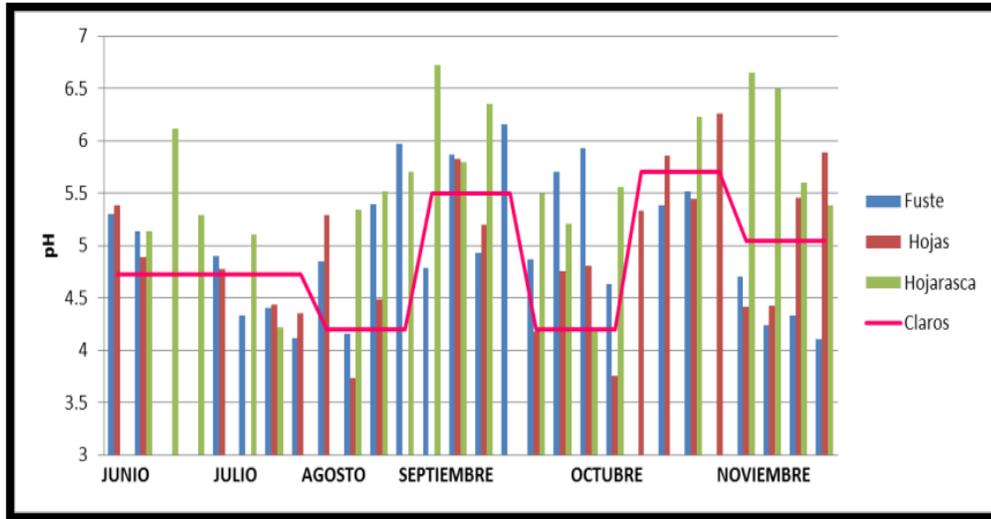


Figura 14. Variación y Análisis del pH del agua de lluvia por estructuras arbóreas para *Pinus leiophylla*

Santa Regina (1989) observó en una plantación de pino albar (*Pinus sylvestris* L.) la oscilación del pH del pluviolavado desde 5.1 en primavera hasta 6.2 en otoño durante el año de 1984; el pH del escurrimiento fustal por el contrario fue más bajo, siendo la media de 4.8 variando exactamente entre 4.6 y 5.1; en la zona de estudio durante el periodo de Junio a Noviembre del 2009 se observa que los valores de pH reportados para el pluviolavado (3.63–6.2) son menores, mientras que en el escurrimiento fustal (4.1-6.1) son mayores, lo que nos indica que existe una variación tanto en las estructuras arbóreas y además el comportamiento cambia durante los meses muestreados.

Para *Abies religiosa* como se observa en la Figura 16, únicamente el escurrimiento fustal (5.71) presenta diferencias significativas (Valor  $P \leq 0.0095$ ) con respecto al claro. Los pH registrados en *Abies religiosa* en el PNIP son más ácidos que los valores promedio reportados por Saavedra-Romero (2003) en una plantación de *A religiosa* en el Desierto de los Leones durante junio a octubre de 1998, donde las muestras de escurrimiento foliar presentaron un  $\text{pH} = 5.63 \pm 0.23$  y en el Claro del Bosque se registró un  $\text{pH} = 5.45 \pm 0.29$ .

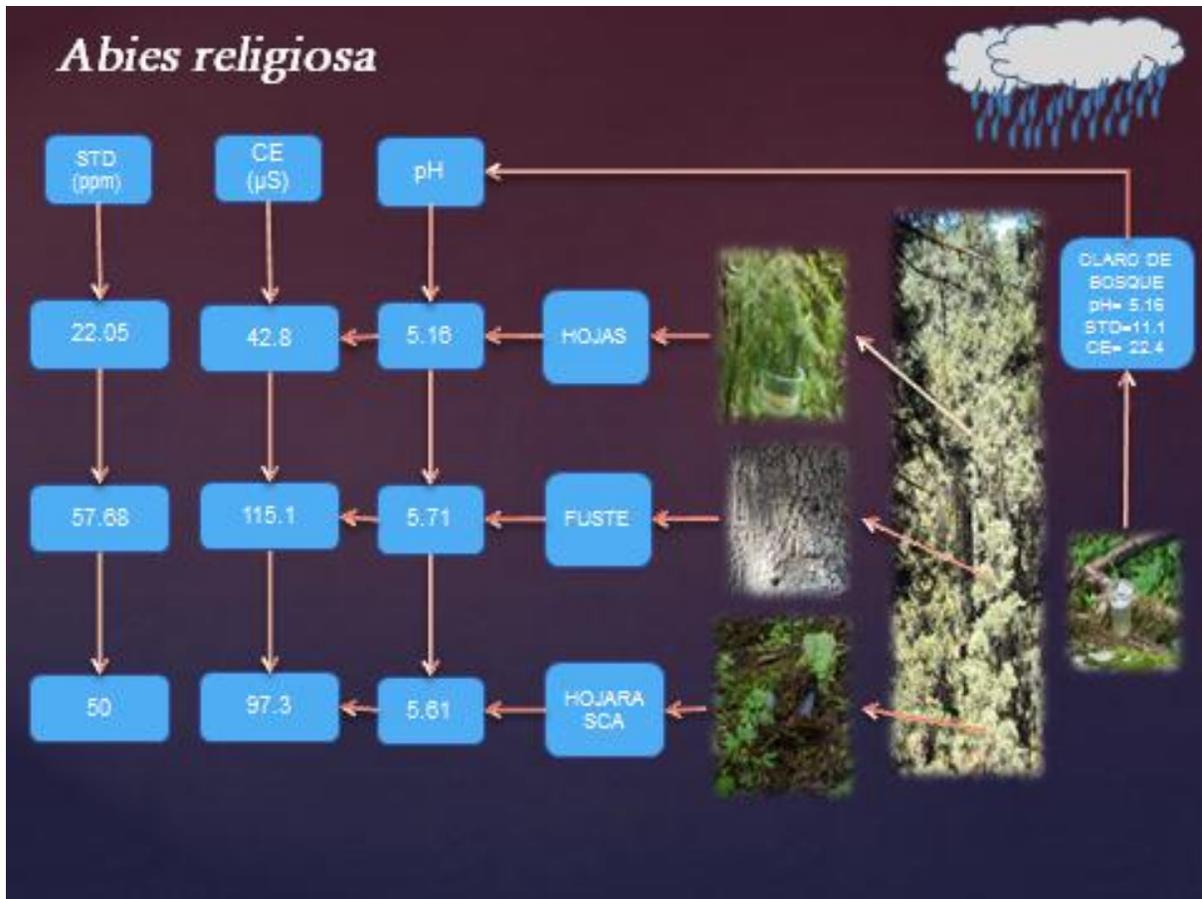


Figura 15. Diagrama de la variación promedio del pH, STD y CE para *Abies religiosa*

El valor del pH es resultado del lavado a las partículas ácidas en el depósito seco para las estructuras arbóreas además de los elementos resultado de la transpiración y excreción vegetal. En este sentido Wyers y Duyzer (1997) mencionan que el depósito seco en bosques de Netherlands contribuye del 10 al 20% al total de depósito atmosférico que es potencialmente ácido.

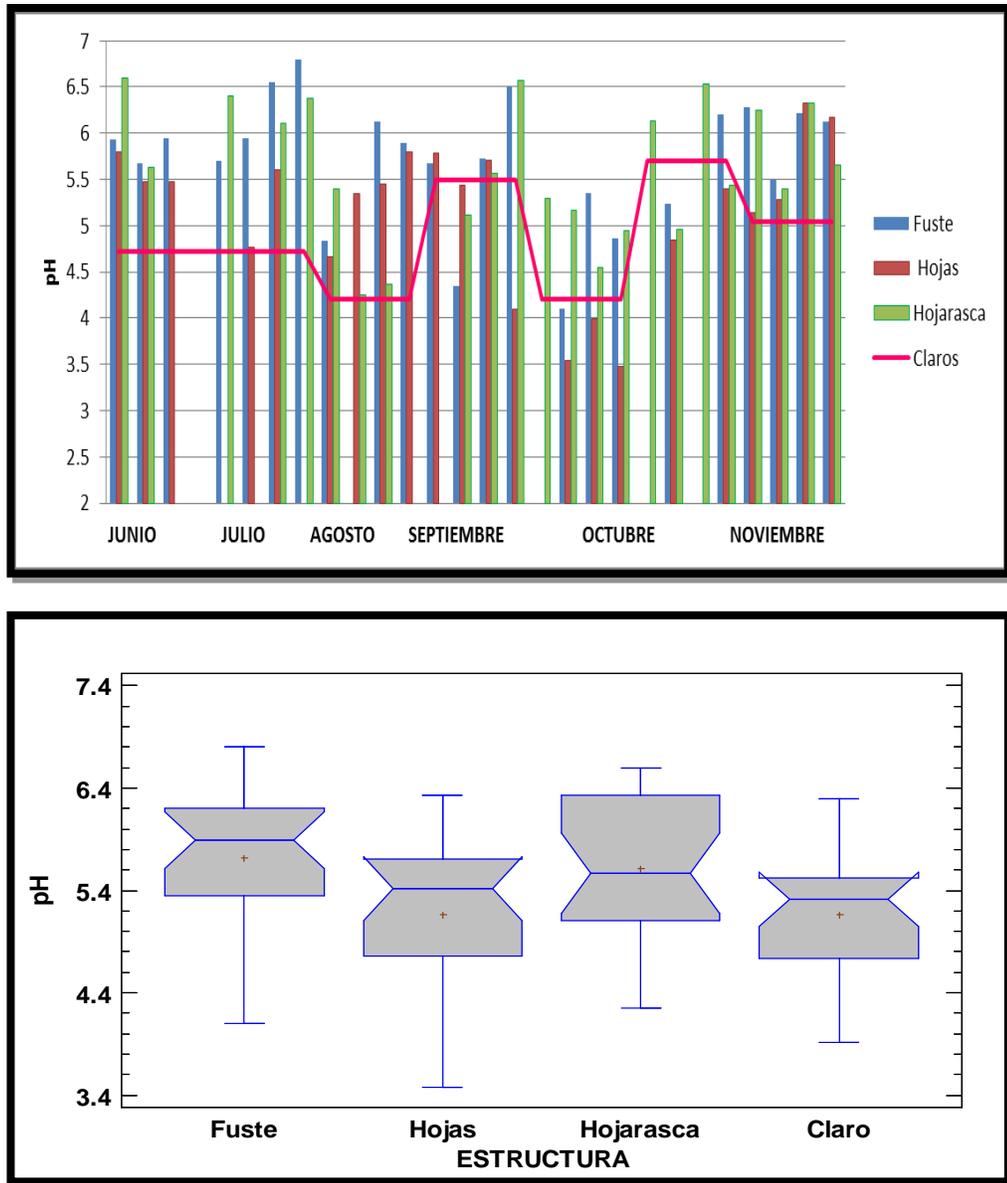


Figura 16. Variación y Análisis del pH del agua de lluvia por estructuras arbóreas para *Abies religiosa*.

Es importante considerar que la superficie de contacto en las hojas es mayor en el género *Abies* que en *Pinus*, lo cual representa mayor área de exposición para los contaminantes que se encuentran en el ambiente, por otra parte las cortezas presentan una formación disgregada en fragmentos escamiformes, pero difieren entre sí, ya que la corteza de *Abies* muestra mayor rugosidad y por lo tanto captura mayor partícula atmosférica entre sus espacios escamiformes con respecto a la de *Pinus*. Por lo tanto al fluir el agua de lluvia por las diferentes estructuras arbóreas el pH se modifica.



Se estima que especies con cortezas lisas retienen menor cantidad de agua, que aquellas con cortezas rugosas (Cárcamo, 2006). Por otro lado Pérez (2008) menciona que el índice del área de la hoja (LAI) de *A. religiosa* es de 2 a 5.6 veces mayor que el LAI de *Pinus hartwegii*.

El paso de la lluvia a través de las estructuras arbóreas también generó variaciones en los STD. Para *Pinus* en el Claro del bosque (5.6 ppm) con respecto al escurrimiento fustal (27.28 ppm) y la hojarasca de *Pinus* (47.7 ppm) se presentaron diferencias significativas (Valor  $P \leq 0.05$ ), entre las estructuras las variaciones de los STD entre el pluviolavado (11.57 ppm), el escurrimiento fustal (27.28 ppm), y el lavado que se presenta en la hojarasca son diferentes de manera significativa (Valor  $P \leq 0.05$ ) (Figura 17).

En *Abies* el lavado de las estructuras arbóreas también genera un incremento, que se consideró diferente de forma significativa a los STD que se encuentran en el claro (11.1 ppm) con el lavado que se realizó en fuste (57.68 ppm) (Valor  $P \leq 0.05$ ) y la hojarasca (50.16 ppm) (Valor  $P < 0.001$ ), el cambio en los STD que se observa en el pluviolavado (22.05 ppm) con respecto al que presenta el escurrimiento fustal (57.68) (Valor  $P \leq 0.007$ ) se considera significativo, existe una disminución de los STD del escurrimiento fustal hacia la hojarasca la cual no se considera significativa (Figura 17).

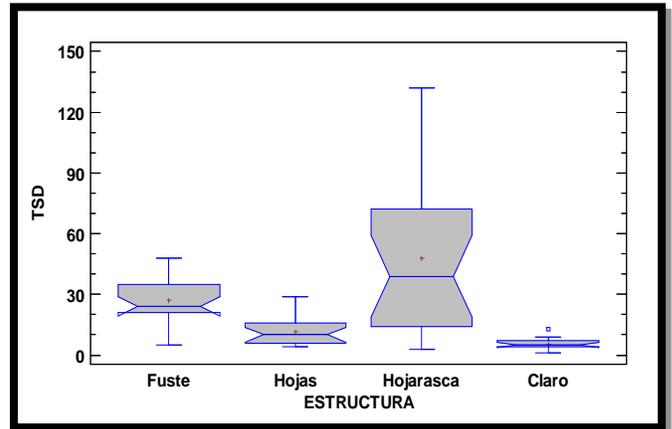
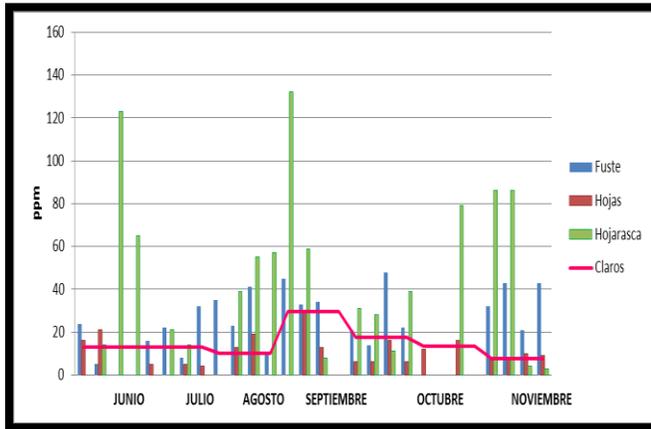
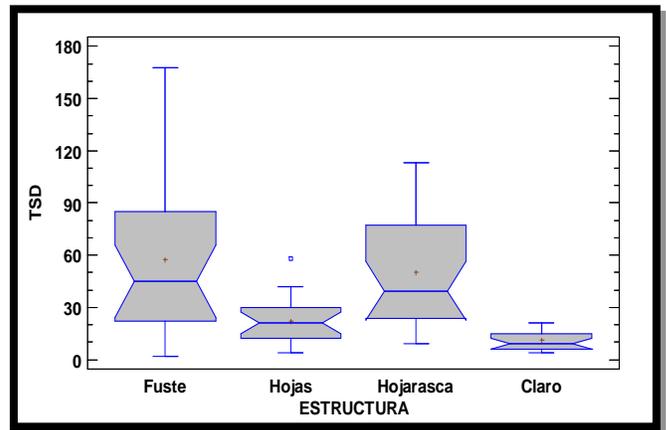
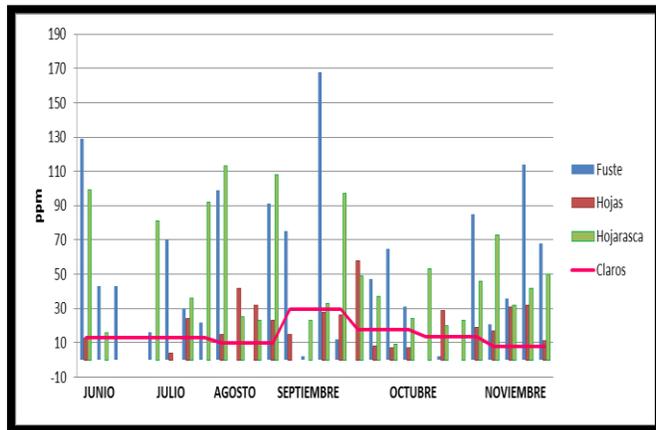
**Sólidos Totales Disueltos (*Pinus*)****Sólidos Totales Disueltos (*Abies*)**

Figura 17. Variación y Análisis de los SDT del agua de lluvia por estructuras arbóreas para *Pinus Leizophylla* y *Abies religiosa*.

La CE que se observa en *Pinus* presenta diferencias significativas entre el claro ( $16.16 \mu\text{S}/\text{cm}^2$ ) con respecto al escurrimiento fustal ( $54.66 \mu\text{S}/\text{cm}^2$ ) y el lavado en la hojarasca ( $95.75 \mu\text{S}/\text{cm}^2$ ) (Valor  $P \leq 0.05$ ). Además existen diferencias significativas en el cambio de la CE que se presenta en el pluvio lavado ( $23.57 \mu\text{S}/\text{cm}^2$ ), el escurrimiento fustal ( $54.66 \mu\text{S}/\text{cm}^2$ ) con respecto al escurrimiento en la hojarasca (Valor  $P \leq 0.026$ ).

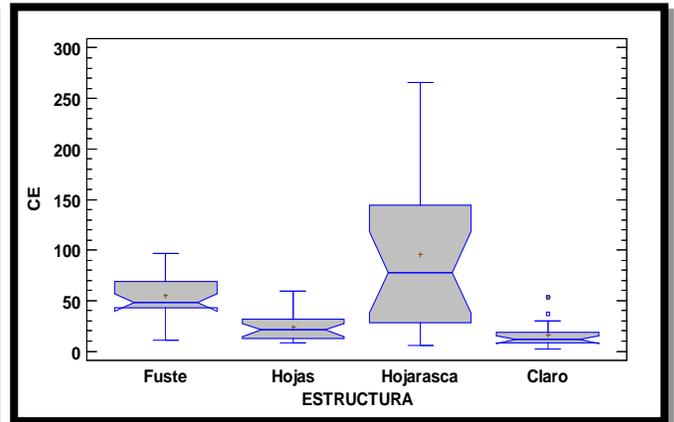
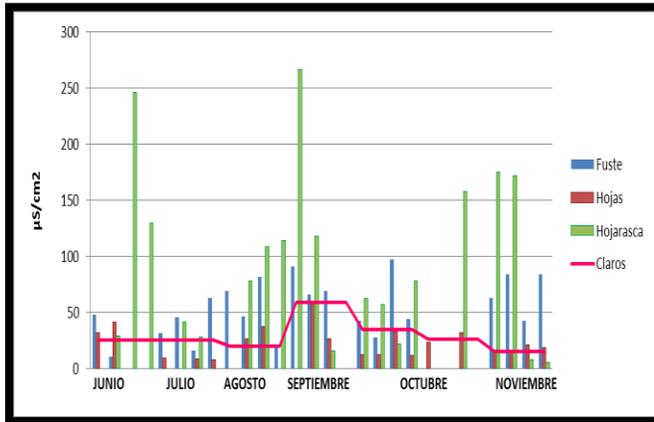
Para *Abies* se generó un cambio que se considera significativo en el claro ( $22.47 \mu\text{S}/\text{cm}^2$ ) con respecto al escurrimiento fustal ( $115.13 \mu\text{S}/\text{cm}^2$ ) y la hojarasca ( $97.33 \mu\text{S}/\text{cm}^2$ ) (Valor  $P \leq 0.05$ ), el cambio de la CE en el pluvio lavado ( $42.80 \mu\text{S}/\text{cm}^2$ ) con respecto al escurrimiento fustal se considera significativo (Valor  $P \leq 0.004$ ), se observó que en el escurrimiento fustal con respecto al escurrimiento del agua de lluvia por la hojarasca



presentó una disminución en la CE que se considera significativo (Valor  $P \leq 0.01$ ) (Figura 18).

El aumento de la disolución de iones y la capacidad de neutralización al depósito ácido es más evidente en *Abies religiosa* que en *Pinus leiophylla*, se infiere que la hojarasca modifica la composición del agua de lluvia gracias a la formación de sales que se van generando durante el lavado con el agua de lluvia.

### Conductividad Eléctrica (*Pinus*)



### Conductividad Eléctrica (*Abies*)

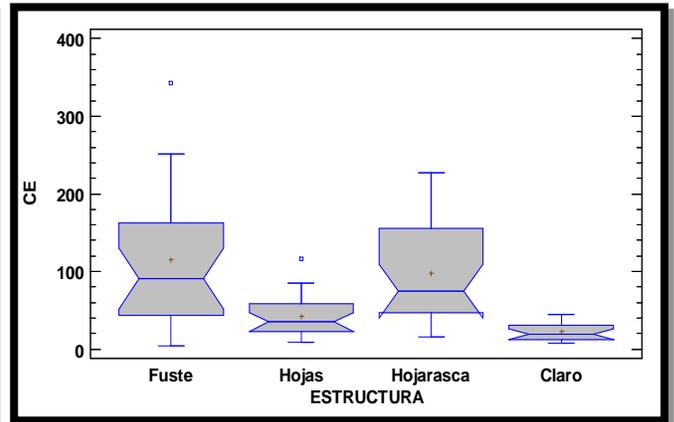
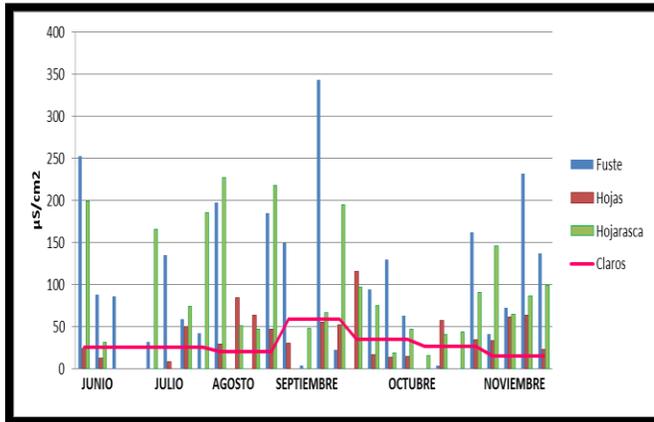


Figura 18 Variación y Análisis de la CE del agua de lluvia por estructuras arbóreas para *Pinus Leiophylla* y *Abies religiosa*.



## 9.2 Evaluación de la composición iónica del agua de lluvia

La evaluación de la composición iónica determinada a través de carbonatos, bicarbonatos, calcio y magnesio no se ha reportado en trabajos anteriores.

La alcalinidad (Figura 19).en los Claros se va incrementando conforme se lavan las estructuras, para *Pinus* no existen diferencias significativas. En *Abies* se observan diferencias significativas en el claro ( $6.62 \text{ mgL}^{-1}$ ) con respecto al escurrimiento fustal ( $21.11 \text{ mgL}^{-1}$ ) (Valor  $P \leq 0.05$ ), durante el escurrimiento la alcalinidad presenta un cambio en el escurrimiento fustal con respecto a el escurrimiento en la hojarasca ( $8.17 \text{ mgL}^{-1}$ ) la cual se considera significativa (Valor  $P \leq 0.001$ ).

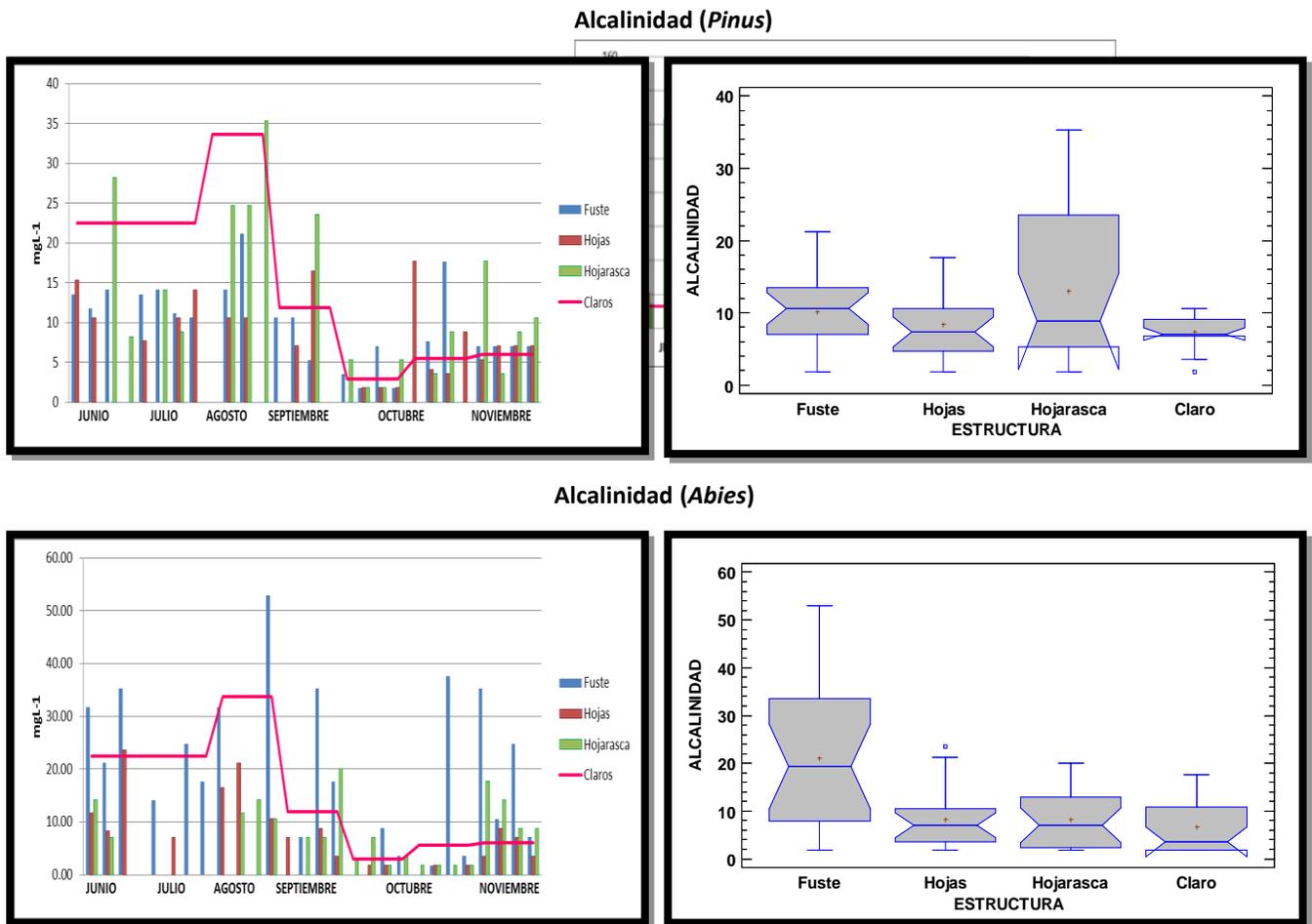


Figura 19 Variación y Análisis de la Alcalinidad del agua de lluvia por estructuras arbóreas para *Pinus Leiophylla* y *Abies religiosa*.



Tanto en la hojarasca de *Pinus* como en la de *Abies* se presume que existe una neutralización de iones  $H^+$  por la presencia de los bicarbonatos que se generan al realizar el lavado de las sales que son atrapadas en las estructuras arbóreas, esto estaría respaldando el comportamiento del pH que se presenta, siendo más alcalino en la hojarasca de *Abies*.

La Dureza de calcio (Figura 20) en *Pinus* presenta diferencias significativas en el escurrimiento fustal ( $122.39 \text{ mgL}^{-1}$ ) (Valor  $P \leq 0.016$ ) y la hojarasca ( $134.1 \text{ mgL}^{-1}$ ) (Valor  $P \leq 0.003$ ) con respecto al agua del claro ( $73.32 \text{ mgL}^{-1}$ ). La concentración que presenta el pluviolavado ( $84.36 \text{ mgL}^{-1}$ ) con respecto al escurrimiento fustal (Valor  $P \leq 0.036$ ) y el escurrimiento del agua de lluvia por la hojarasca (Valor  $P \leq 0.007$ ) se considera significativamente diferente. En *Abies* el comportamiento que presenta el claro ( $81.94 \text{ mgL}^{-1}$ ) con respecto al escurrimiento fustal ( $166.76 \text{ mgL}^{-1}$ ) y el lavado en la hojarasca ( $159.71 \text{ mgL}^{-1}$ ) presenta diferencias significativas (Valor  $P \leq 0.05$ ). Y el cambio del pluviolavado ( $110.87 \text{ mgL}^{-1}$ ) con respecto al escurrimiento fustal ( $166.77 \text{ mgL}^{-1}$ ) y el

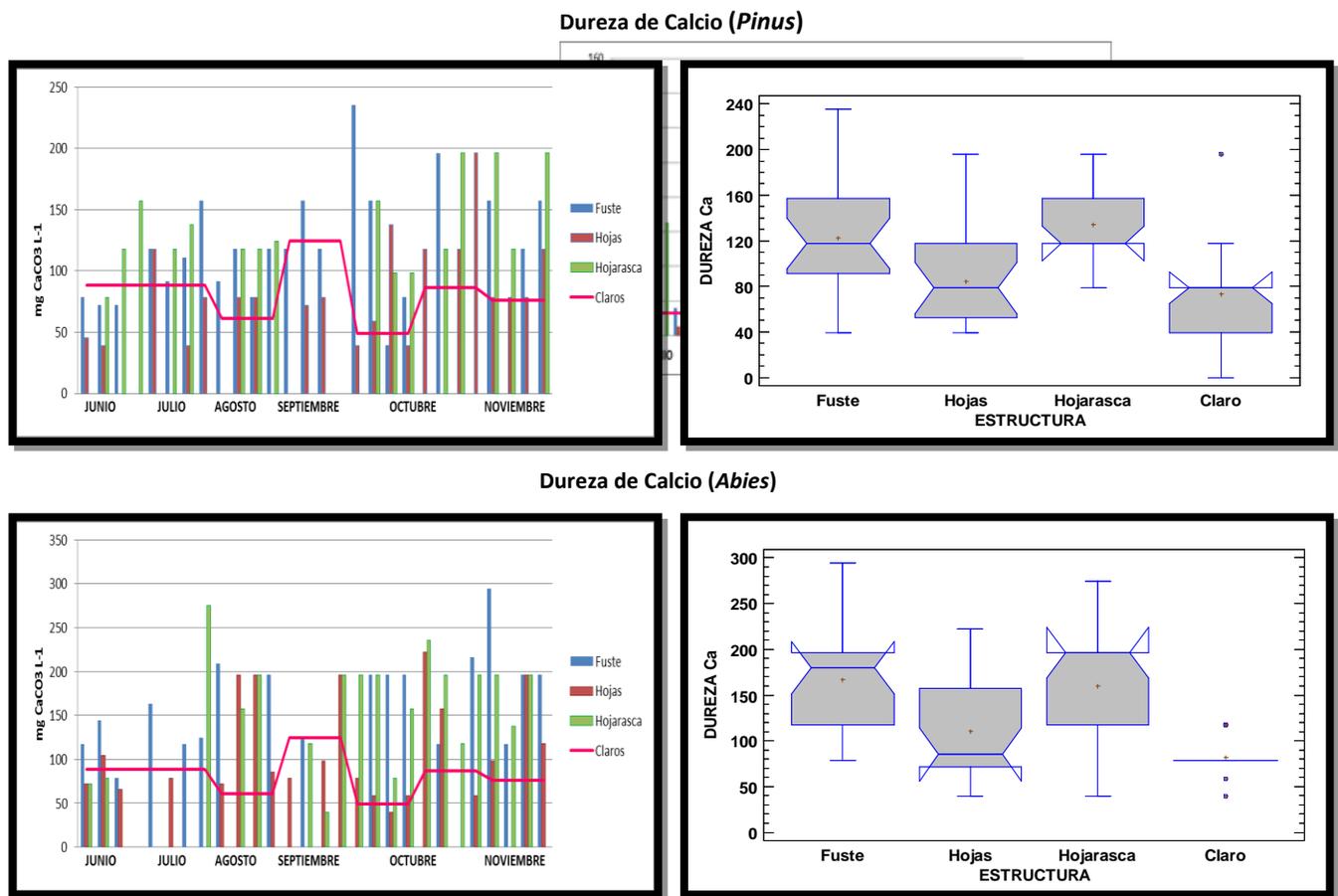


Figura 20 Variación y Análisis de la Dureza de Calcio del agua de lluvia por estructuras arbóreas para *Pinus Leiophylla* y *Abies religiosa*.

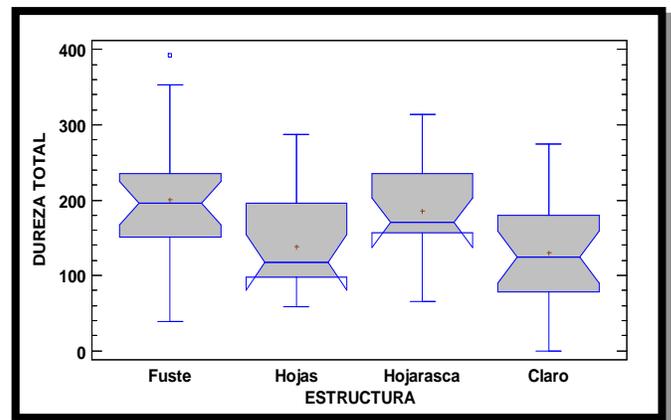
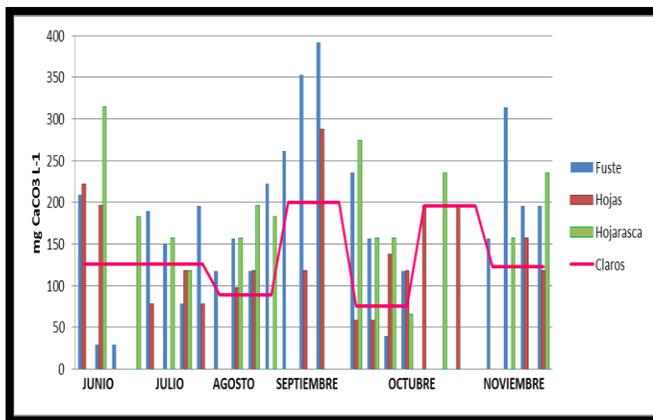


escurrimiento en la hojarasca ( $159.71 \text{ mgL}^{-1}$ ) se considera significativo (Valor  $P \leq 0.05$ ), aunque existe cambio en el escurrimiento fustal con respecto al escurrimiento en la Hojarasca no se considera significativo.

La Dureza Total en *Pinus* presenta cambios conforme la lluvia fluye por las estructuras, sin embargo estas no diferencias de forma significativa.

Para *Abies* se presentan diferencias significativas en el claro ( $129.55 \text{ mgL}^{-1}$ ) con respecto al escurrimiento fustal ( $307.03 \text{ mgL}^{-1}$ ) y el escurrimiento del agua de lluvia en la hojarasca ( $253.60 \text{ mgL}^{-1}$ ) (Valor  $P \leq 0.05$ ). La Dureza Total registrada en el pluviolavado ( $184.67 \text{ mgL}^{-1}$ ) con respecto al escurrimiento fustal (Valor  $P \leq 0.003$ ) presenta diferencias significativas, aunque existe un cambios en el escurrimiento fustal con respecto al escurrimiento por la Hojarasca, este no se considera significativo (Figura 21).

#### Dureza Total (*Pinus*)



#### Dureza Total (*Abies*)

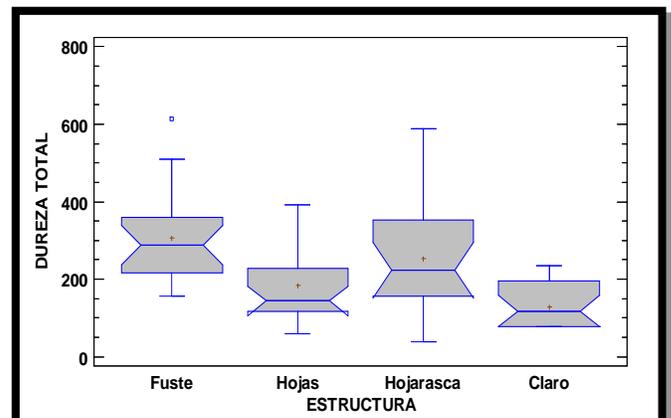
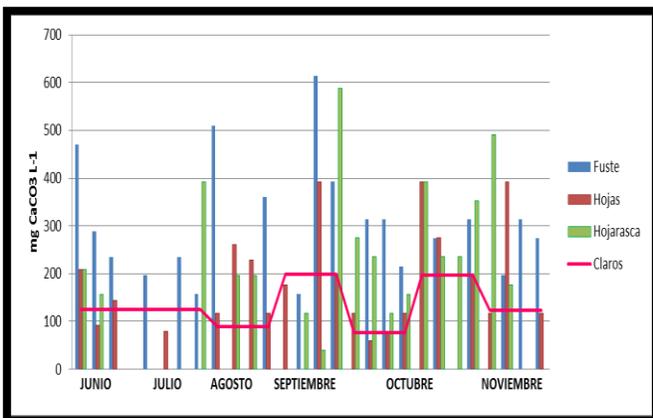


Figura 21 Variación y Análisis de la Dureza Total del agua de lluvia por estructuras arbóreas para *Pinus Leiophylla* y *Abies religiosa*.



Se observa que existe  $\text{Ca}^{2+}$  y  $\text{Mg}^{2+}$  depositados en seco en las estructuras y durante el flujo del agua de lluvia por las estructuras genera un lavado de estos cationes, lo cual demuestra que existe un aporte hacia el suelo. Se han realizado investigaciones sobre la composición química del agua de lluvia en donde se considera al  $\text{Ca}^{2+}$  y  $\text{Mg}^{2+}$  como elemento que son lavados por el agua de lluvia durante su flujo por las estructuras arbóreas.

Santa Regina (1989) realizó una estimación del retorno anual de elementos en una plantación de *P sylvestris* L. donde se observó que los aportes de Calcio y Magnesio fueron mayores en la lluvia del escurrimiento Fustal (0.34 mg/kg Calcio y 0.16 mg/kg Magnesio) que en el pluviolavado (0.30 mg/kg Calcio y 0.11mg/kg Magnesio). Por otro lado en Sao Paulo, Brasil se realizó la estimación de aporte de Calcio y Magnesio a través de la precipitación incidente (Escurrecimiento Fustal + Pluviolavado) en una plantación de *Eucalyptus grandis*, observando intervalos de concentración mayores (9.06- 9.67 Kg/ha-año para Calcio y 3.25-3.68 Kg/ha-año para Magnesio) que en áreas abiertas sin vegetación (5.09 kg/ha-año para Calcio y 1.74 Kg/ha-año para Magnesio) (Andrade, 1995).

La depositación seca de partículas (de origen alcalino) sobre la superficie foliar puede elevar el pH de los escurrimientos foliares, con respecto al agua del Claro del Bosque (Saavedra-Romero, 2003). La presencia de los carbonatos de Calcio y Magnesio presentes en el lavado de las estructuras arbóreas regula la acidez de la precipitación y al llegar al suelo explican el pH cercano a la neutralidad. Además de la presencia de  $\text{Ca}^{2+}$  y  $\text{Mg}^{2+}$  existen otros cationes en las estructuras arbóreas como potasio, sodio y amonio los cuales no fueron medidos en el presente estudio, pero pueden influir en el pH de la lluvia.

### 9.2.1 Cloruros Nitratos y Sulfatos

Debido a la importancia que tiene el saber que iones generan la acidez en la lluvia incidente, se determinaron  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$  y  $\text{Cl}^-$ .

Al comparar la concentración de Cloruros que presentan los claros ( $0.54 \text{ mgL}^{-1}$ ) con los flujos del agua de lluvia por las estructuras se observa que para *Pinus* incrementa la concentración, pero disminuye al llegar a la hojarasca ( $0.61 \text{ mgL}^{-1}$ ). Se considera significativo (Valor  $P \leq 0.016$ ) la diferencia entre el claro y el escurrimiento fustal ( $0.77 \text{ mgL}^{-1}$ ). Entre las estructuras, solo el incremento de concentración que se da entre el



pluviolavado ( $0.55 \text{ mgL}^{-1}$ ) y el escurrimiento fustal muestran diferencias significativas (Valor  $P \leq 0.016$ ), aunque existe una disminución de los cloruros en el paso del escurrimiento fustal con respecto al escurrimiento en la Hojarasca ( $0.61 \text{ mgL}^{-1}$ ), esta no se considera significativa. El flujo del agua de lluvia por las estructuras en *Abies* presenta cambios en la concentración de cloruros para el pluviolavado ( $0.59 \text{ mgL}^{-1}$ ), escurrimiento fustal ( $0.72 \text{ mgL}^{-1}$ ) y la hojarasca ( $0.69 \text{ mgL}^{-1}$ ), estas variaciones no son diferentes de manera significativa con los registrados en el claro ( $0.69 \text{ mgL}^{-1}$ ) y mucho menos entre estructuras.

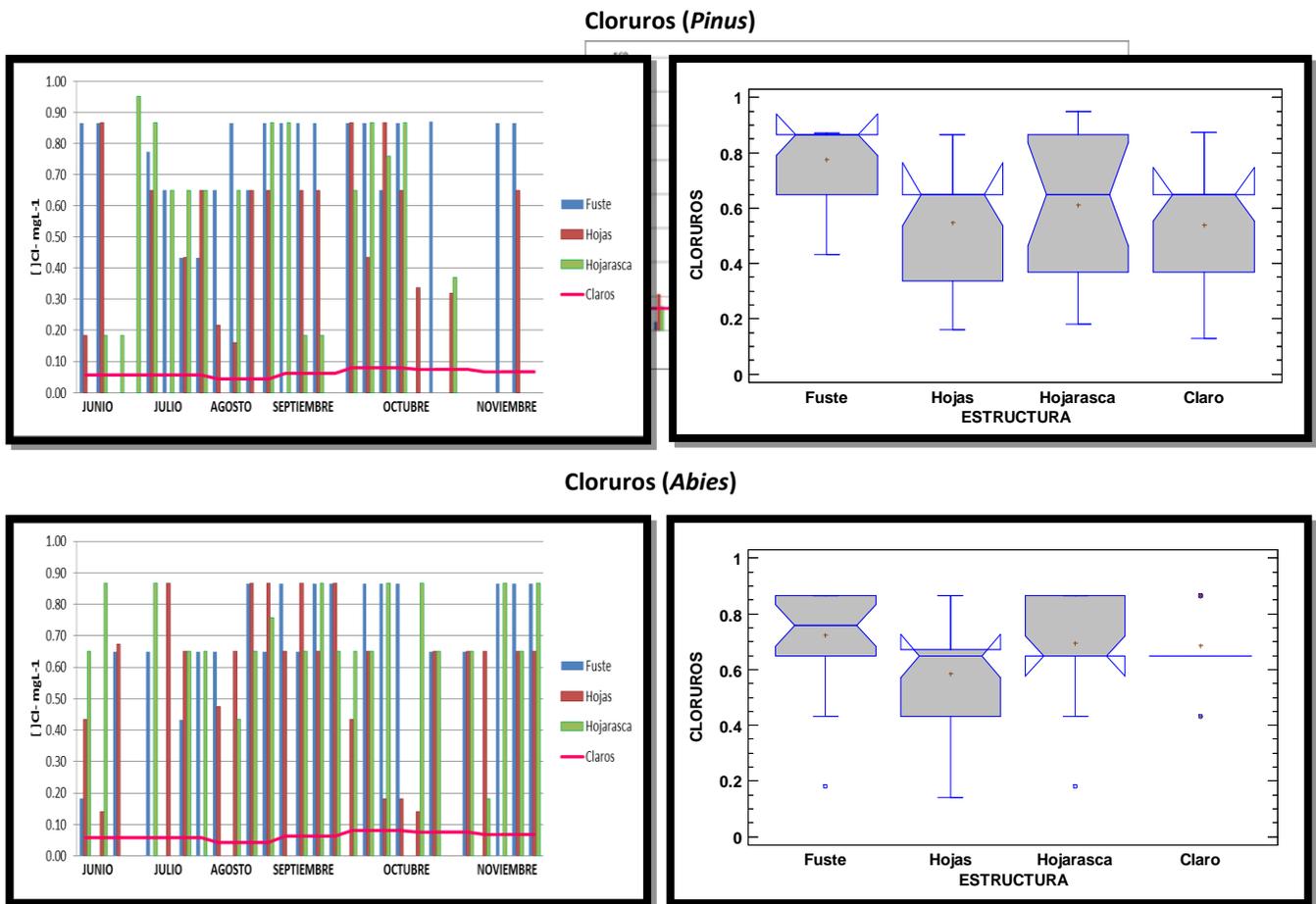


Figura 22. Variación y Análisis de los Cloruros del agua de lluvia por estructuras arbóreas para *Pinus Leiophylla* y *Abies religiosa*.

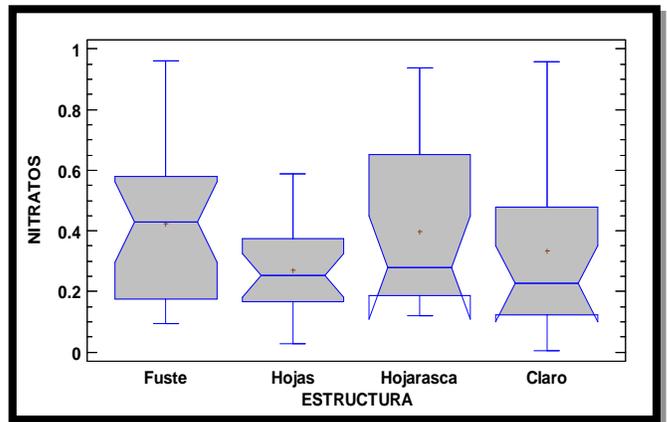
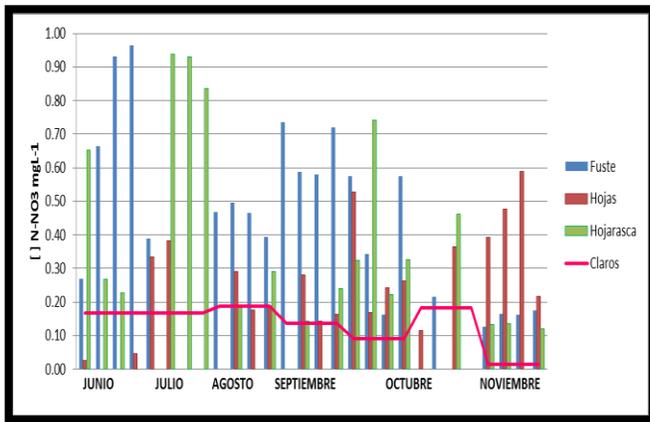
Para los nitratos se registró en claros una concentración de  $0.33 \text{ mgL}^{-1}$  y en *Pinus* generaron cambios en pluviolavado ( $0.27 \text{ mgL}^{-1}$ ) así como en el escurrimiento fustal ( $0.42 \text{ mgL}^{-1}$ ) y el escurrimiento en la hojarasca ( $0.40 \text{ mgL}^{-1}$ ), sin embargo estas variaciones de



concentración de Nitratos no fueron significativas ( $\alpha=0.05$ ). Mientras que en *Abies* la concentración de Nitratos se incrementa en el pluviolavado ( $0.41 \text{ mgL}^{-1}$ ) y el escurrimiento fustal ( $0.61 \text{ mgL}^{-1}$ ) pero disminuye cuando el agua de lluvia fluye por la hojarasca ( $0.46 \text{ mgL}^{-1}$ ). Únicamente se considera significativa (Valor  $P \leq 0.05$ ) las variaciones entre el escurrimiento fustal y el claro del Bosque ( $0.27 \text{ mgL}^{-1}$ ) (Figura 23).

Se infiere que durante el paso del agua de lluvia por las hojas de *Pinus leiophylla* existe asimilación de Nitratos, mientras que en *Abies Religiosa* no se observa esto; por lo que se considera que los requerimientos de Nitratos difieren entre especies.

### Nitratos (*Pinus*)



### Nitratos (*Abies*)

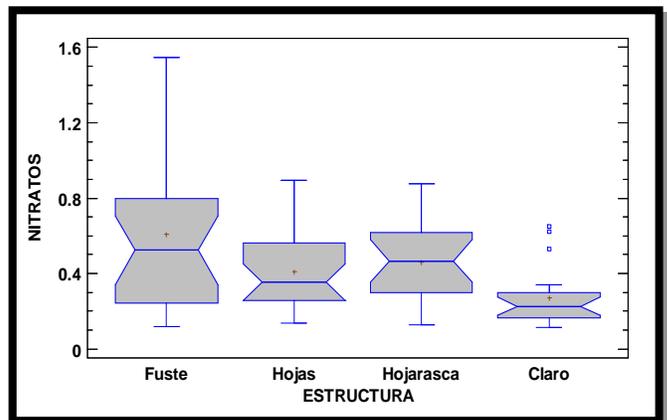
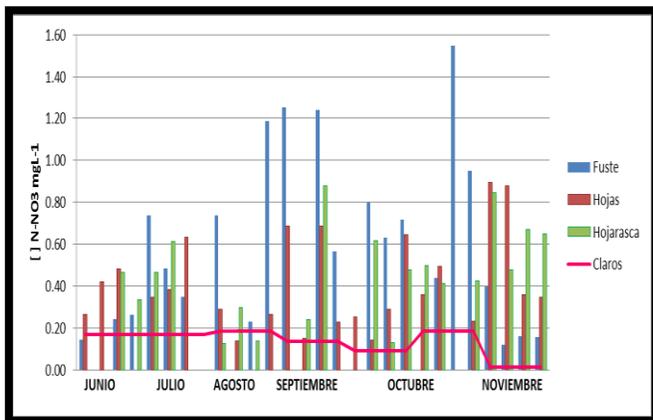


Figura 23. Variación y Análisis de los Nitratos del agua de lluvia por estructuras arbóreas para *Pinus Leiophylla* y *Abies religiosa*.



El comportamiento que muestran los  $SO_4^{-2}$  en *Pinus leiophylla* solo muestra diferencias significativas (Valor  $P \leq 0.024$ ) para el incremento entre el claro ( $0.08 \text{ mgL}^{-1}$ ) y el escurrimiento fustal ( $0.16 \text{ mgL}^{-1}$ ); el cambio de concentración de sulfatos que se presenta en el pluviolavado ( $0.08 \text{ mgL}^{-1}$ ) con respecto al escurrimiento fustal se considera significativo (Valor  $P \leq 0.017$ ), también existe un cambio de concentración de sulfatos cuando el agua de lluvia fluye por la hojarasca ( $0.14 \text{ mgL}^{-1}$ ) esta no se considera significativa. Para *Abies* las diferencias entre las concentraciones de Sulfatos durante el flujo del agua por las diversas estructuras arbóreas no fueron significativos (Figura 24).

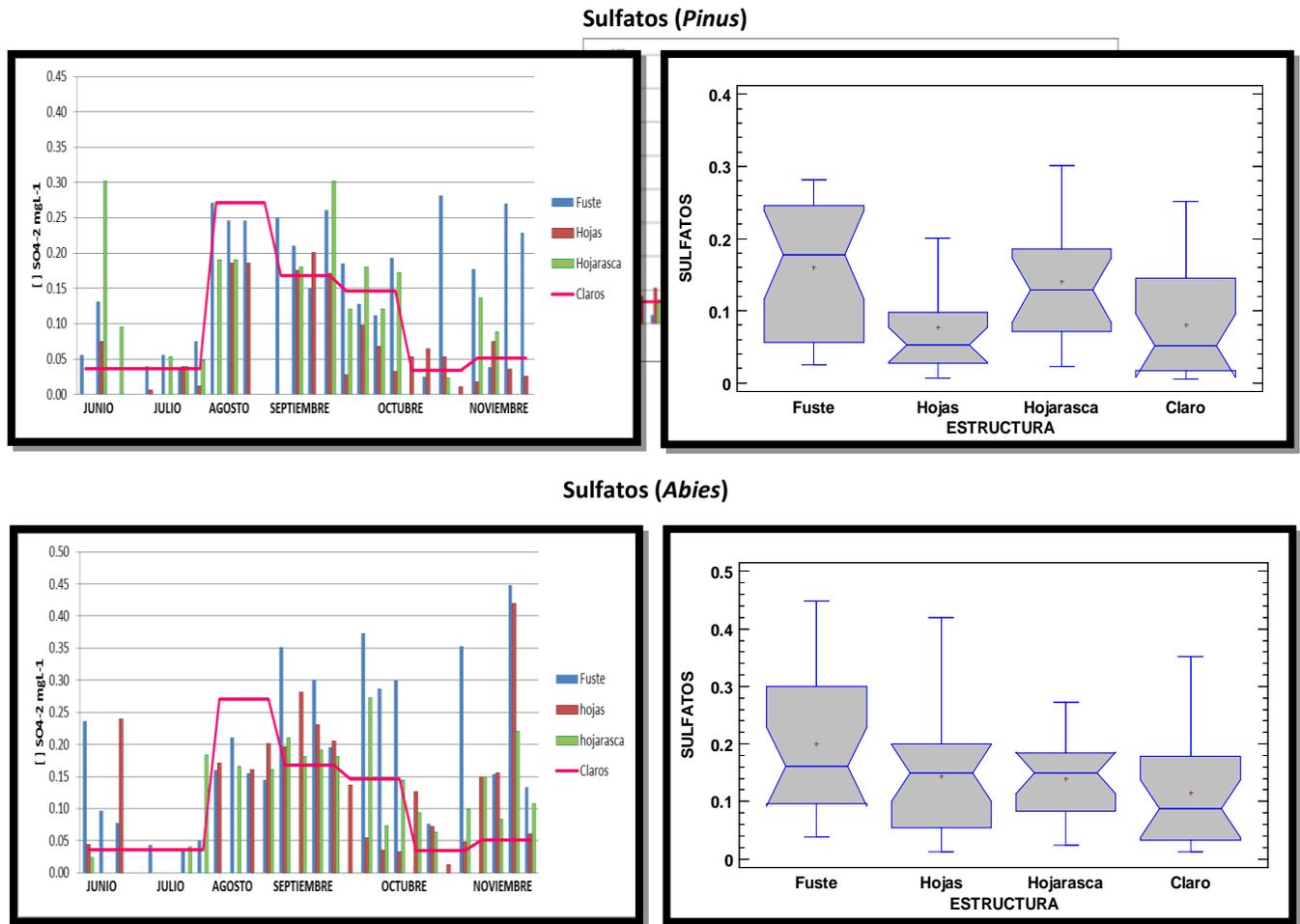


Figura 24. Variación y Análisis de los Sulfatos del agua de Lluvia por estructuras arbóreas para *Pinus Leiophylla* y *Abies religiosa*.



Sanhueza et al. 2005, reportan que los  $\text{SO}_4^{2-}$  y  $\text{NO}_3^-$  contribuyen en un 10 y 14.1% respectivamente a la acidez del agua de lluvia del Parque Nacional Canaima; siendo los ácidos orgánicos de origen biogénico los responsables en un 51% del pH ácido.

Para la mayoría de los iones hay una mayor concentración iónica como resultado del lavado a través de las estructuras arbóreas que en los claros del bosque, esto es debido a la acumulación del depósito seco captado por estas estructuras antes de la temporada de lluvias y el material lavado de la atmósfera por la lluvia (deposición húmeda).

### **9.3 Comparación experimental del efecto del follaje y corteza de los géneros *Abies* y *Pinus* en el nivel de acidez y composición iónica ( $\text{NO}_3^-$ , $\text{Cl}^-$ y $\text{SO}_4^{2-}$ ) en el agua.**

El diseño experimental se realizó con la finalidad de observar los cambios que se generan en la composición del agua cuando las estructuras arbóreas permanecieron en el agua para las variables analizadas con respecto a los tratamientos con tres diferentes tipos de agua y para cada uno de los géneros estudiados. Se utilizó como testigo el proceso realizado en agua destilada. Se solubilizó el material adherido a las estructuras arbóreas o aquel que se excretó por difusión. Antes de realizar el lavado de las estructuras arbóreas se midió el pH de cada tratamiento (SALL=6.32, AL=6.35, AD=5.5).

Para el follaje de *Pinus* en el AD (agua destilada) se reportó el pH con una media de 4.37, posteriormente aumento a 4.92 en la SALL (Simulación de Agua de Lluvia) al igual que en el AL (Agua del lugar) que fue de 5.13, en general en todos los tratamientos se consideraron ácidos. Los cambios de pH que generó el follaje fueron significativos entre el testigo con respecto a la SALL y el agua del lugar (Valor  $P \leq 0.05$ ). Aunque existe un aumento en el pH no se consideran significativos los cambios que hay entre la SALL y el AL.

Para la corteza de *Pinus* se observó el mismo comportamiento, para el AD se registró una media de 4.35, posteriormente aumento en la SALL a 4.92 y por último en el AL con 5.01, considerándose a los tres pH ácidos. Nuevamente los cambios que se presentan en la SALL (Valor  $P \leq 0.008$ ) y el AL (Valor  $P \leq 0.023$ ) con respecto al testigo se consideran significativos, sin embargo el cambio que se presenta en la SALL con respecto al AL no es significativo. (Figura 25).

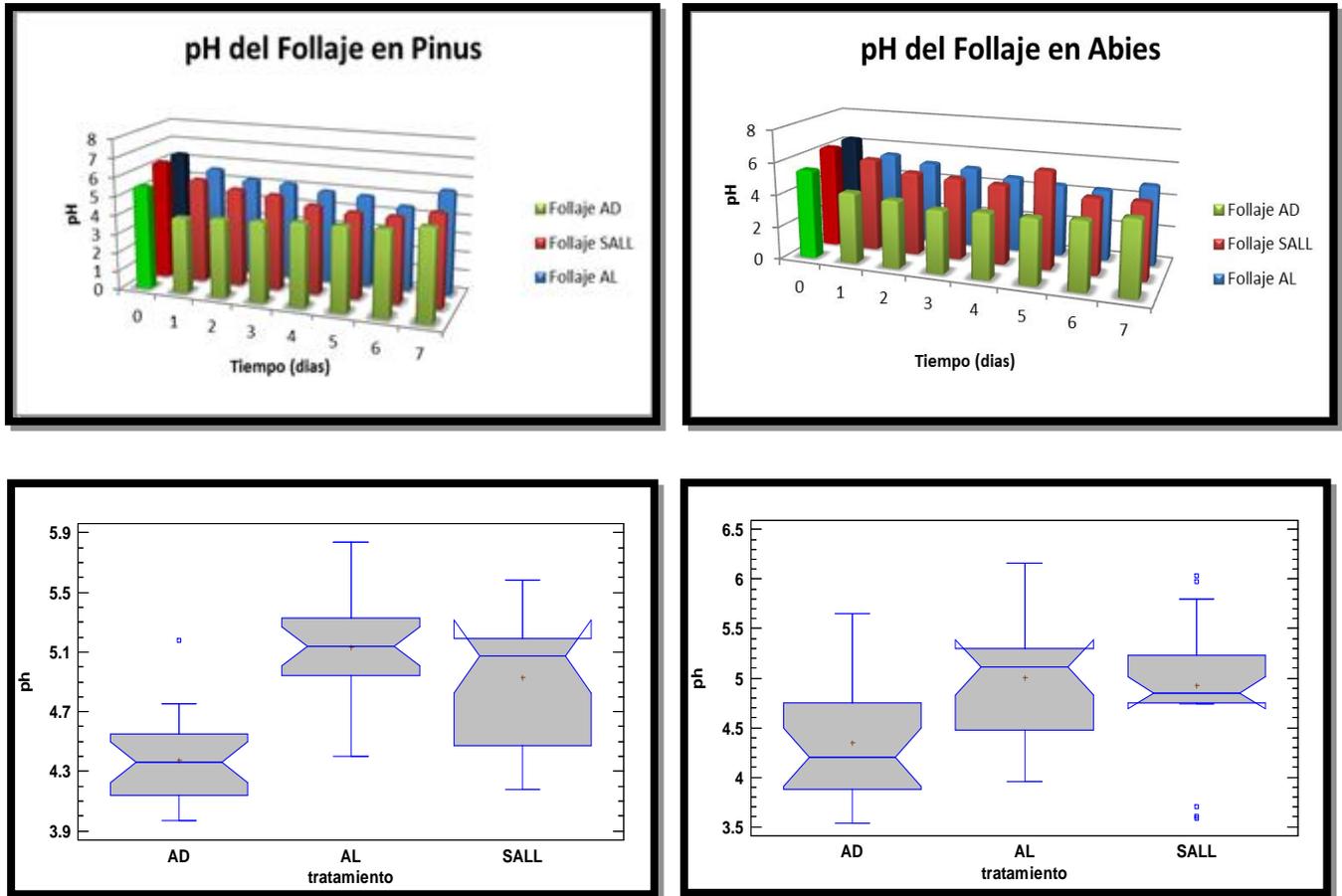


Figura 25 Variación y análisis del pH en los diferentes tratamientos de agua para las estructuras de *Pinus leiophylla*

En el follaje de *Abies* se observa que el pH del AD presenta una media de 4.13 y siendo diferente para la SALL y en el AL con 4.86 y 5.15 respectivamente, los pH en todos los tratamientos son considerados como ácidos. La diferencia de pH entre el AD con respecto a la SALL y el AL (Valor  $P \leq 0.05$ ) si es significativa.

En la corteza de *Abies* el comportamiento fue diferente, registrándose en el AD un pH de 5.73, en la SALL a 5.87 y en el AL con 5.80. Se observa que las estructuras de *Abies* en la SALL incrementan el pH conforme va pasando el tiempo del experimento. A pesar de haber variaciones en los tratamientos, estas no se consideran significativas.

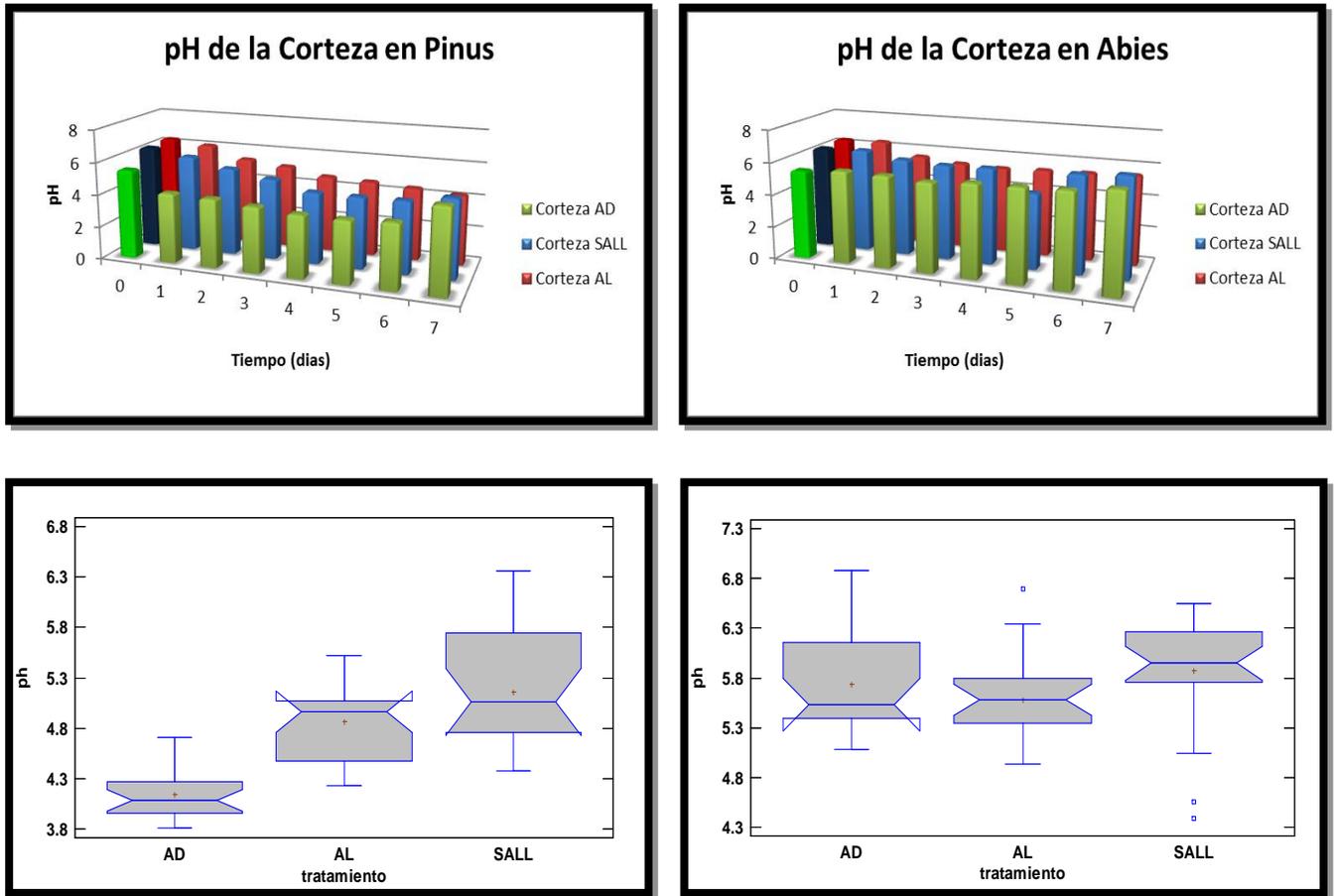


Figura 26 Variación y análisis del pH en los diferentes tratamientos de agua para las estructuras de *Abies religiosa*

En general el follaje de ambas especies genera una disminución en el pH para los diferentes tratamientos, a lo cual no sucede para la corteza en la que el pH tiende a la neutralización durante el tratamiento. En el monitoreo diario se observó que conforme pasa el tiempo el pH disminuye, en los primeros días se solubilizan los iones presentes en la deposición seca y acumulados por las estructuras y después de 7 días en el tratamiento el pH tiende a la alcalinidad o neutralización.

Poblete (2004) determinó el pH en la corteza de cuatro especies nativas chilenas, estos pH (arrayán=3.9, coigüe=4.7, canelo=6.1 y tepa=7.2) varían en forma importante dependiendo de la especie y la duración del tratamiento con agua destilada agitados por 24 horas.

Al igual que en campo en el diseño experimental se tomaron en cuenta las concentraciones de Nitratos, Cloruros y Sulfatos.



Para el follaje de *Pinus* se observó que en el tratamiento con AD la concentración de  $\text{NO}_3^-$  fue de una media de  $0.71 \text{ mgL}^{-1}$ , en la SALL fue de  $0.46 \text{ mgL}^{-1}$  y es menor en el tratamiento en el AL con  $0.21 \text{ mgL}^{-1}$ ; solo se considera significativa la diferencia entre el Testigo y el AL (Valor  $P \leq 0.004$ ). En la corteza de *Pinus* el tratamiento con AD presento una concentración de  $0.50 \text{ mgL}^{-1}$ , en la SALL se registró una concentración de  $0.37 \text{ mgL}^{-1}$  y en el tratamiento con él AL de  $0.27 \text{ mgL}^{-1}$ ; estas variaciones en la concentración de  $\text{NO}_3^-$  no se consideran significativos (Figura 27).

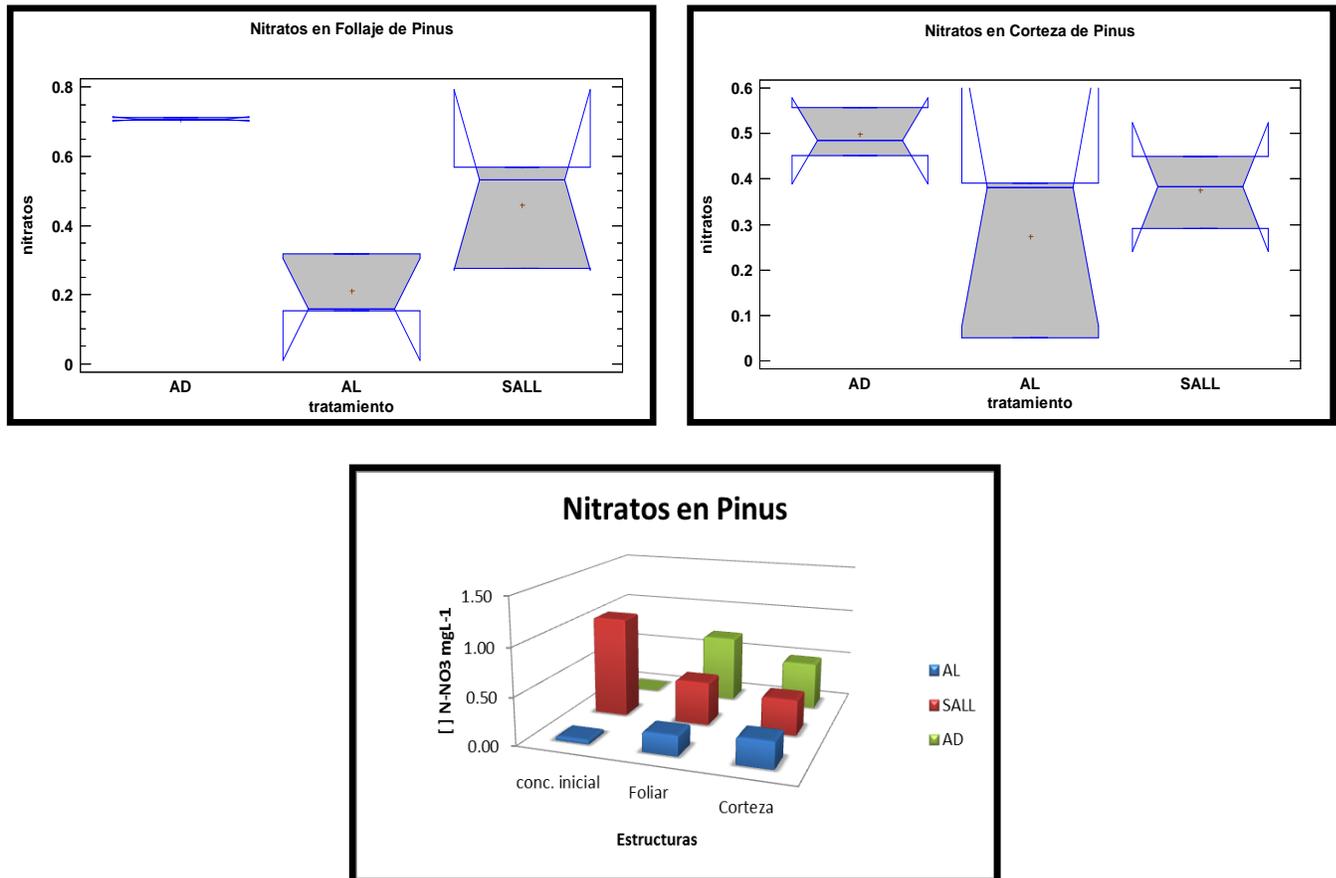


Figura 27 Variación y análisis de los Nitratos en los diferentes tratamientos de agua para las estructuras de *Pinus leiophylla*

En *Abies* el Follaje con el tratamiento en el AD presenta una concentración de  $\text{NO}_3^-$  de  $0.74 \text{ mgL}^{-1}$ , en AL de  $0.68 \text{ mgL}^{-1}$  al igual que en el tratamiento con la SALL es de  $0.66 \text{ mgL}^{-1}$ , aunque existen variaciones entre las concentraciones de  $\text{NO}_3^-$  no se consideran significativas.

Para la corteza los  $\text{NO}_3^-$  en el AD fueron de  $0.74 \text{ mgL}^{-1}$ , para el tratamiento con la SALL a  $0.37 \text{ mgL}^{-1}$  y en el tratamiento con AL a  $0.54 \text{ mgL}^{-1}$ . Estas variaciones no se consideran significativas (Figura 28).

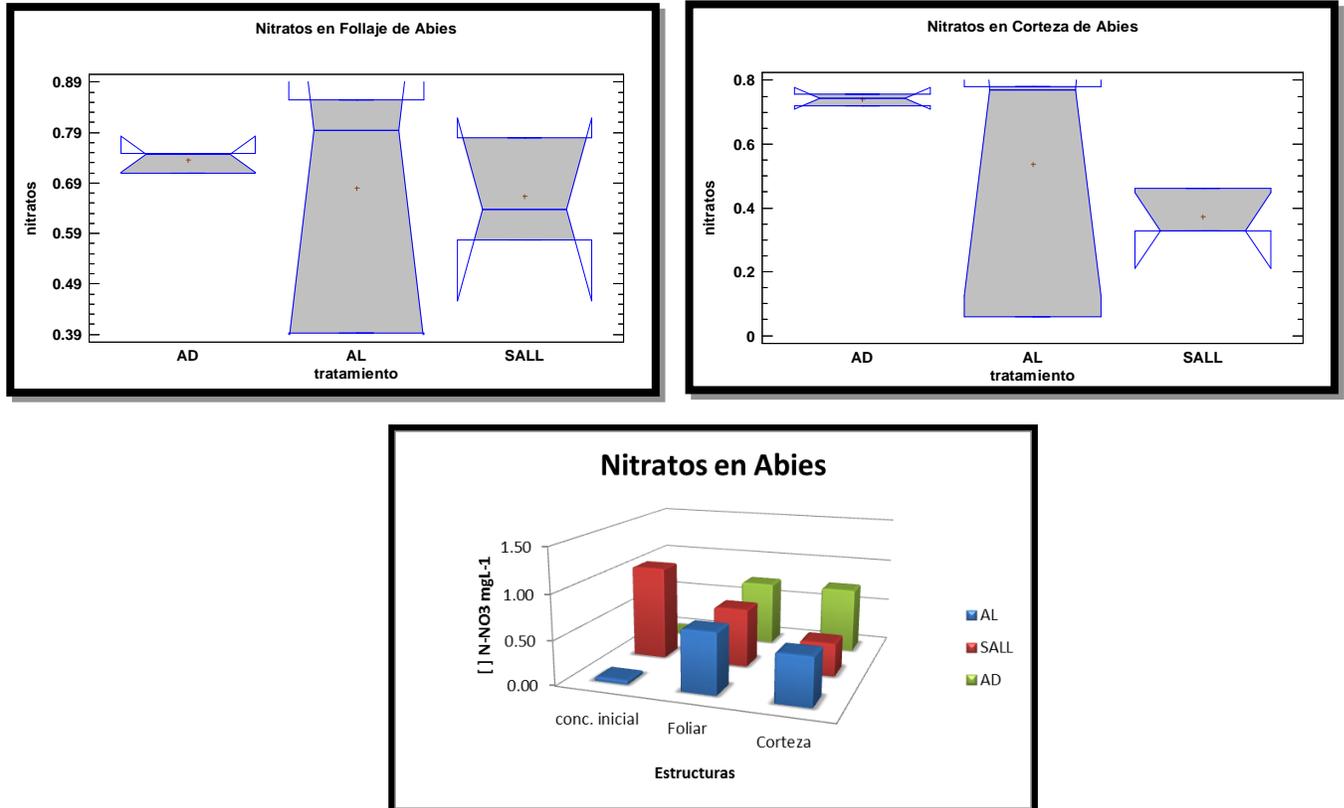


Figura 28 Variación y análisis de los Nitratos en los diferentes tratamientos de agua para las estructuras de *Abies religiosa*

Para los cloruros en el follaje de *Pinus* se observa que en el tratamiento con el AD se encontró una concentración de  $0.76 \text{ mgL}^{-1}$ , con la SALL de  $0.44 \text{ mgL}^{-1}$  y en el AL fue de  $0.33 \text{ mgL}^{-1}$ . Las concentraciones de  $\text{Cl}^-$  no fueron diferentes de forma significativa. El tratamiento que se le dio a la corteza con el lavado en AD registro una concentración de  $\text{Cl}^-$  de  $0.011 \text{ mgL}^{-1}$ , en la SALL fue de  $0.010 \text{ mgL}^{-1}$  y en el AL la concentración fue de  $0.013 \text{ mgL}^{-1}$ . Aunque se encuentran variaciones entre las concentraciones de cada tratamiento no se consideran significativos.

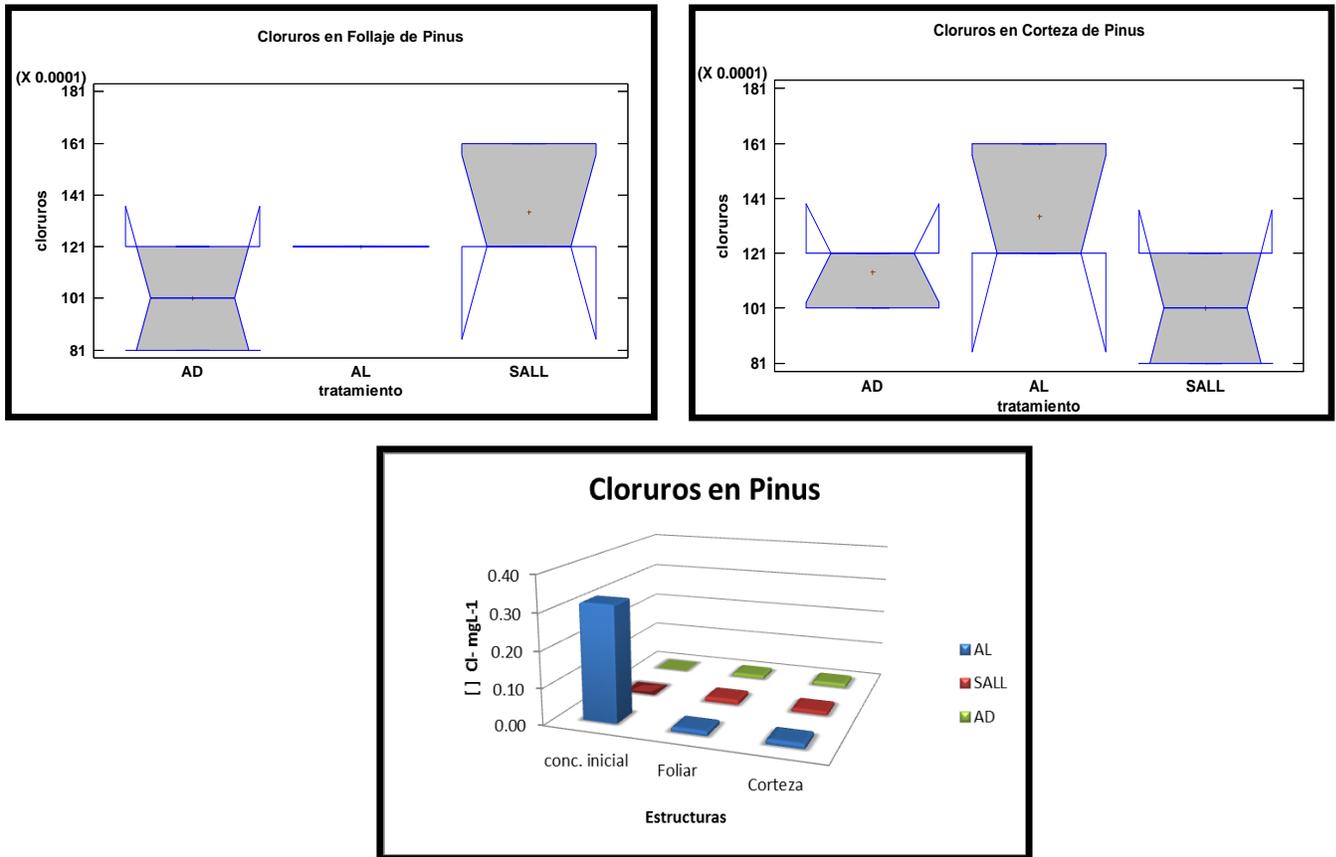


Figura 29 Variación y análisis de los Cloruros en los diferentes tratamientos de agua, para las estructuras de *Pinus leiophylla*

En *Abies* el tratamiento del Follaje con el AD tuvo una concentración de  $\text{Cl}^-$  de  $0.016 \text{ mgL}^{-1}$ , en La SALL se mantuvo en  $0.016 \text{ mgL}^{-1}$  pero en el AL el valor fue menor con  $0.014 \text{ mgL}^{-1}$ , sin ser significativas estas diferencias. Con la corteza en el tratamiento con el AD se registró una concentración de  $0.013 \text{ mgL}^{-1}$ , con la SALL de  $0.015 \text{ mgL}^{-1}$  y para el tratamiento con AL de  $0.009 \text{ mgL}^{-1}$ ; estas variaciones tampoco resultaron significativas.

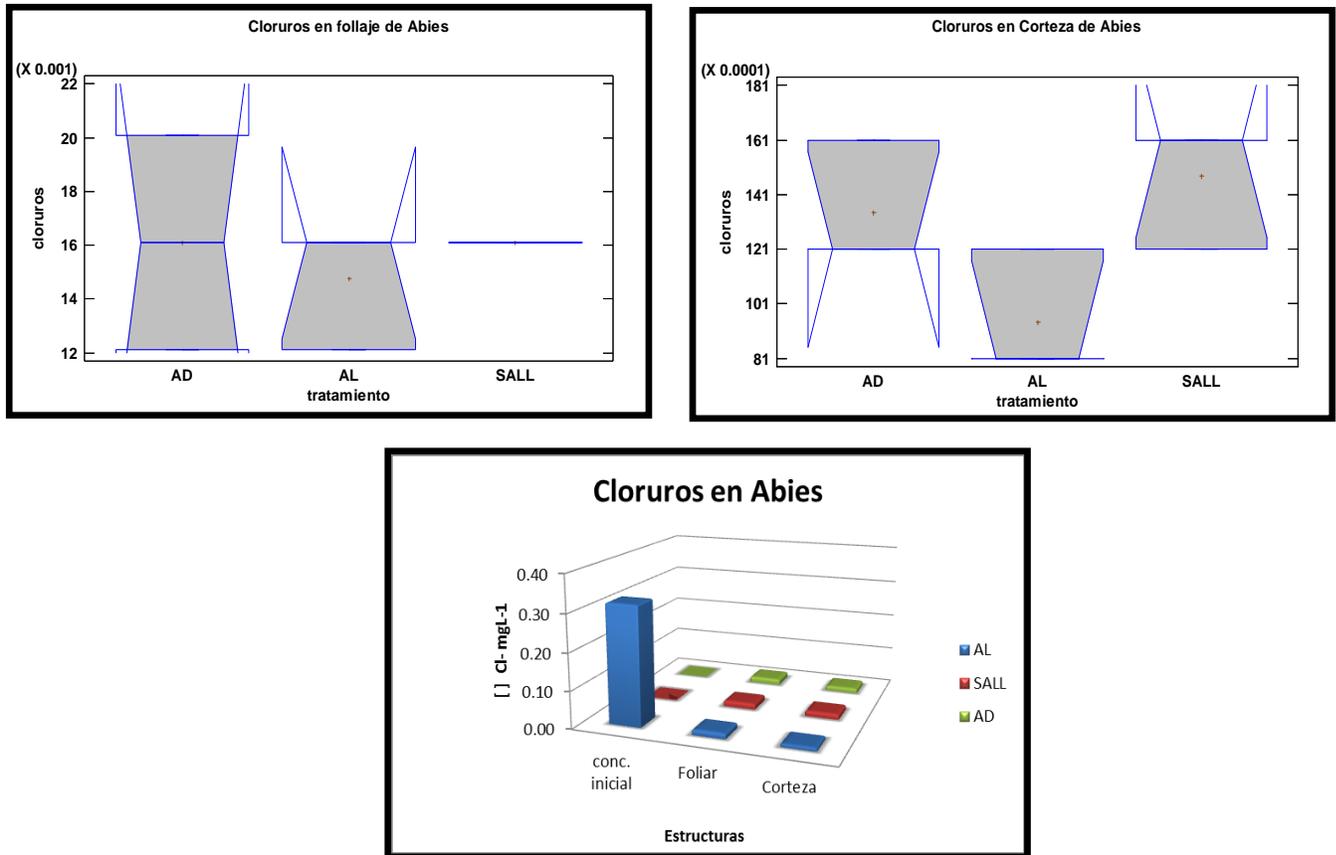


Figura 30 Variación y análisis de los Cloruros en los diferentes tratamientos de agua, para las estructuras de *Abies religiosa*

Los  $\text{SO}_4^{-2}$  en el lavado del follaje en *Pinus*, registraron una concentración en el AD de  $0.46 \text{ mgL}^{-1}$ , esta fue mayor en el tratamiento con la SALL  $0.77 \text{ mgL}^{-1}$  y en el tratamiento con AL fue de  $0.44 \text{ mgL}^{-1}$ ; las diferencias mostradas entre los tratamientos no fueron significativas. Con respecto al lavado en el AD la corteza presentó una concentración de  $\text{SO}_4^{-2}$  de  $0.76 \text{ mgL}^{-1}$ , en la SALL de  $0.44 \text{ mgL}^{-1}$  y en el lavado con AL fue de  $0.33 \text{ mgL}^{-1}$  pero ninguna de las variaciones se consideran significativas.

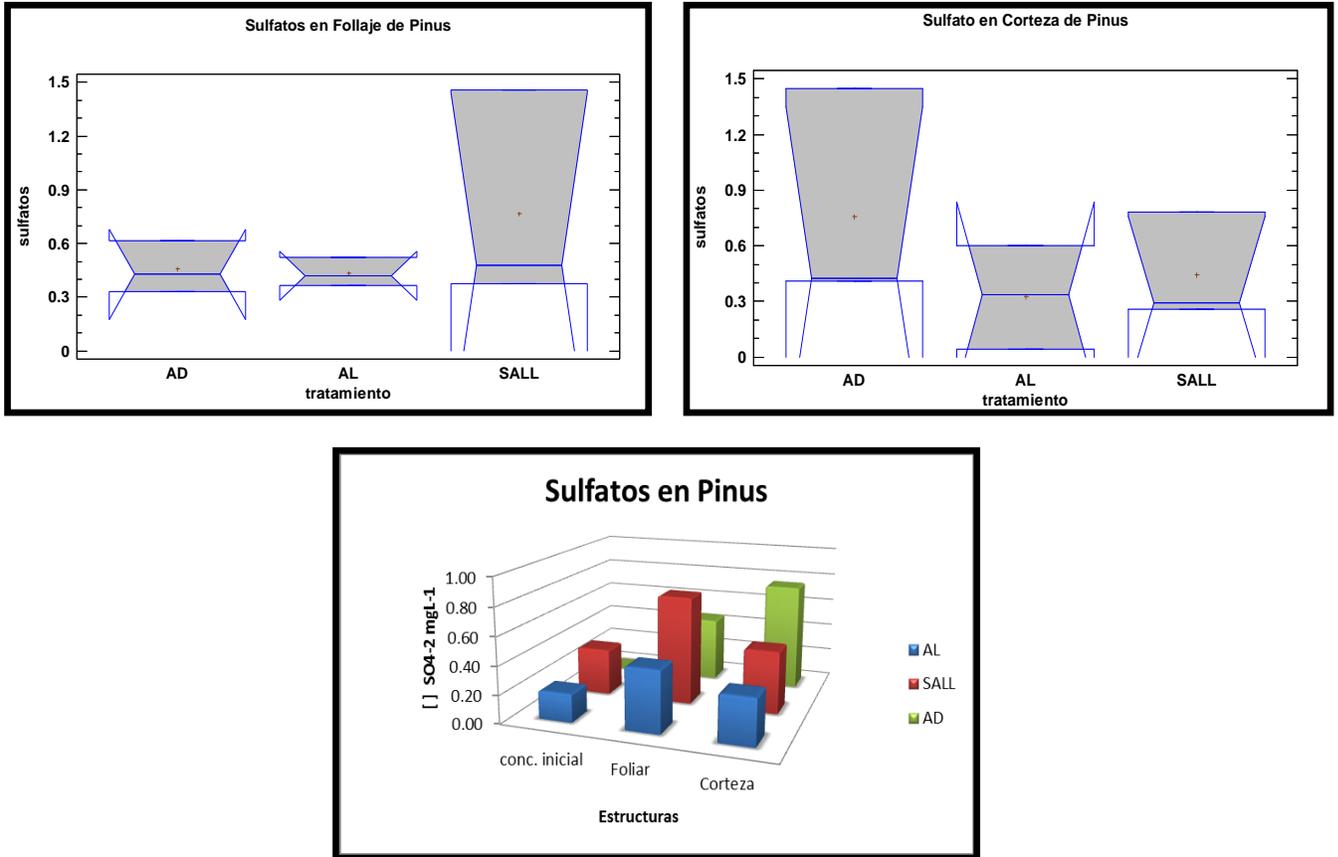


Figura 31 Variación y análisis de los Sulfatos en los diferentes tratamientos de agua, para las estructuras de *Pinus leiophylla*

El tratamiento con el AD en el Follaje de *Abies* la concentración de  $\text{SO}_4^{-2}$  fue de  $0.85 \text{ mgL}^{-1}$ , se presentó un valor de  $0.35 \text{ mgL}^{-1}$ , con la SALL y en la solución con AL  $0.43 \text{ mgL}^{-1}$ , pero no se consideran significativas las variaciones entre los tratamientos para esta estructura. En el mismo caso se encuentran la corteza de *Abies* se observó que en el lavado con el AD que arrojó una concentración de  $0.42 \text{ mgL}^{-1}$ , fue menor en la SALL con  $0.32 \text{ mgL}^{-1}$  y  $0.26 \text{ mgL}^{-1}$  en el AL las diferencias mostradas, no se consideran significativas.

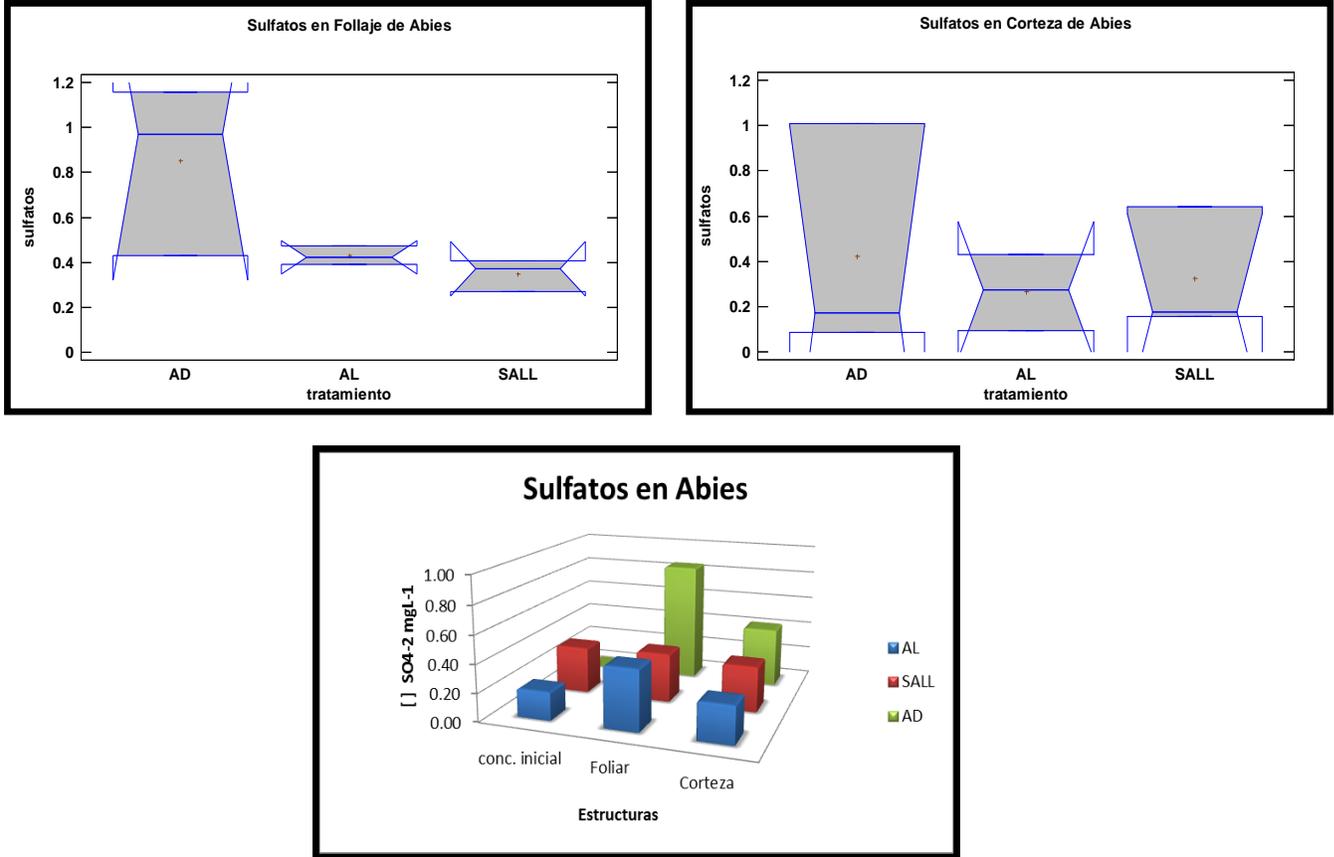


Figura 32 Variación y análisis de los Sulfatos en los diferentes tratamientos de agua, para las estructuras de *Abies religiosa*

Con los resultados observados se encuentra que al realizar el lavado de cada estructura en los diferentes tratamientos presentan diferencias en sus concentraciones, siendo mayores las concentraciones en el tratamiento con agua destilada ya que no presenta iones y por lo tanto se observa que la abundancia de los iones que se encuentran en los compuestos vegetales pasan al agua destilada, mientras que en los otros tratamientos al existir presencia de iones en la simulación del agua de lluvia y el agua del lugar se genera un equilibrio, lo que se observa en cualquiera de los tratamientos, para los iones que se presentan en las estructuras arbóreas. Los nitratos y sulfatos son los iones que contribuyen principalmente a la acidez del agua, además se observa que existe mayor concentración de ellos en las hojas, en comparación con la corteza.



#### 9.4 Comparación de resultados obtenidos en laboratorio y campo.

Se realizó una comparación entre los resultados observados para el follaje y la corteza de los dos géneros estudiados con respecto al agua de lluvia en campo y al lavado con la simulación del agua de lluvia.

El comportamiento del pH en el follaje de *Pinus* es similar entre los resultados obtenidos en los muestreos en campo y los que se observaron en el tratamiento con la SALL, registrándose pH ácidos de 4.98 y 4.92 respectivamente. Para la corteza se observa que en los muestreos en campo se obtiene un pH de 4.95 y en el laboratorio se registró un pH de 4.92 siendo este más ácido, aunque existe una variación entre el pH del follaje y la corteza estos no se consideran significativos. En el follaje de *Abies* se observa que para los muestreos en campo el pH registrado fue de 5.71 y en tratamiento experimental correspondiente se registró un pH promedio de 5.15, indicativo de mayor acidez, estas variaciones si fueron significativas (Valor  $P \leq 0.05$ ). En la corteza se observa que para los muestreos en campo se registró un pH de 5.16 y en el laboratorio con el tratamiento se identificó un pH de 5.87, con un comportamiento inverso al del follaje al ser más ácido en campo y siendo esta diferencia significativa (Valor  $P \leq 0.05$ ).

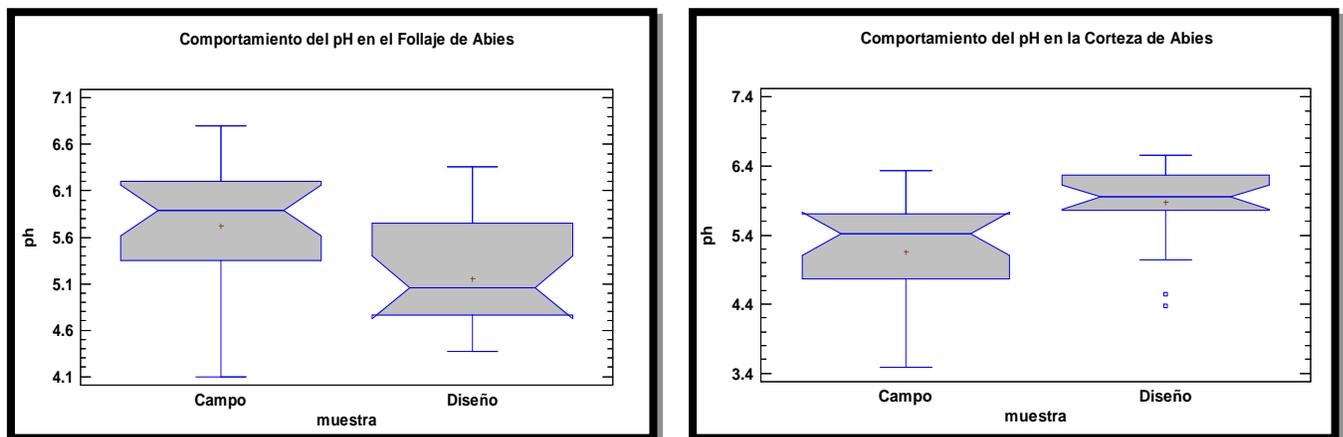


Figura 33 Comportamiento del pH en las estructuras arbóreas de *Abies* en Campo y el Diseño experimental.

La concentración de Cloruros en el follaje de *Pinus* (Figura 34) de acuerdo a resultados de campo fue de  $0.77 \text{ mgL}^{-1}$  y en el diseño experimental se registró una concentración de  $0.46 \text{ mgL}^{-1}$ , se observó que este comportamiento fue diferente de forma significativa (Valor  $P \leq 0.05$ ). La corteza mostró una concentración de  $\text{Cl}^-$  de  $0.55 \text{ mgL}^{-1}$  en el sitio y en laboratorio fue de  $0.37 \text{ mgL}^{-1}$ , aunque esta variación no se considera significativa. El



comportamiento del Cl<sup>-</sup> en el Follaje de *Abies* fue superior en campo ( $0.72 \text{ mgL}^{-1}$ ) que en laboratorio ( $0.66 \text{ mgL}^{-1}$ ), sin embargo la diferencia no fue significativa. Los cloruros provenientes de la corteza en campo fueron  $0.59 \text{ mgL}^{-1}$  y en el experimento de  $0.37 \text{ mgL}^{-1}$ , diferencia que tampoco fue significativa.

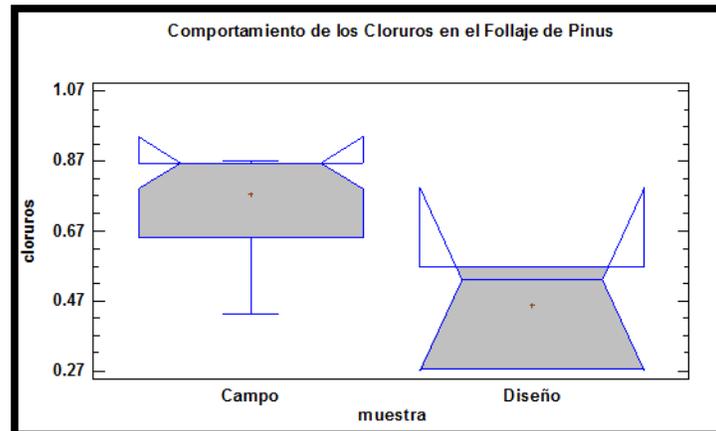


Figura 34 Comportamiento de los Cloruros en el Follaje de *Abies* en Campo y el Diseño experimental.

El registro de la concentración de nitratos en los dos géneros (*Pinus* y *Abies*) para ambas estructuras fue superior en campo (*Pinus*: Follaje  $0.42 \text{ mgL}^{-1}$  y corteza  $0.27 \text{ mgL}^{-1}$ ) (*Abies*: Follaje  $0.61 \text{ mgL}^{-1}$  y corteza  $0.041 \text{ mgL}^{-1}$ ) al compararlo con el tratamiento correspondiente (*Pinus*: Follaje  $0.013 \text{ mgL}^{-1}$  y corteza  $0.010 \text{ mgL}^{-1}$ ) (*Abies*: Follaje  $0.016$  y corteza  $0.015$ ), para los dos tipos de estructura las diferencias encontradas fueron significativas (Valor  $P \leq 0.05$ ).

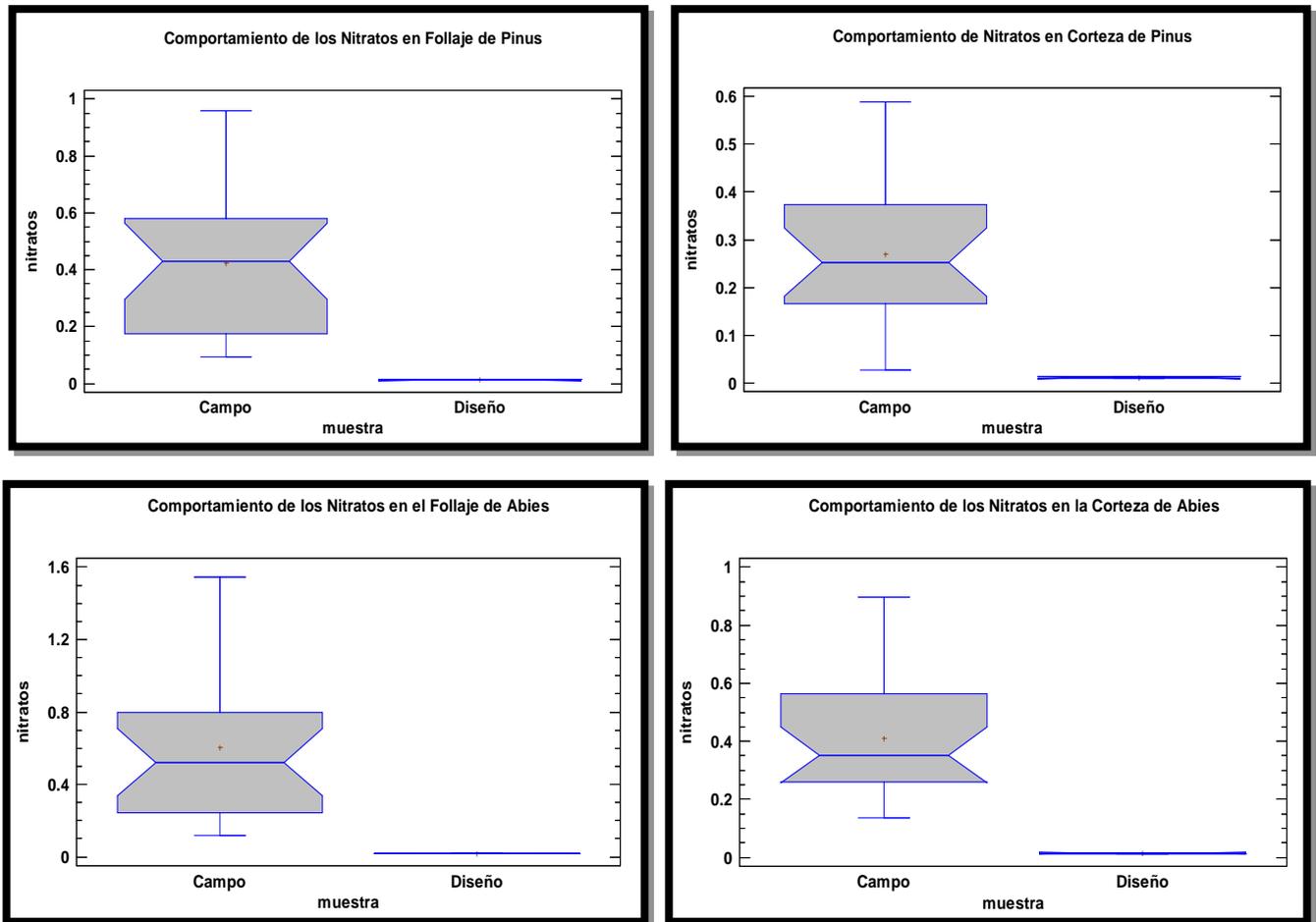


Figura 35 Comportamiento de los Nitratos en las Estructuras de *Pinus* y *Abies* en Campo y el Diseño experimental

En cuanto a los sulfatos se encontró que las muestras provenientes del follaje de *Pinus* en campo tuvieron concentraciones de  $0.16 \text{ mgL}^{-1}$  y en el experimento con SALL, presentan la concentración de los sulfatos disueltos fue de  $0.77 \text{ mgL}^{-1}$ . El comportamiento de la corteza en las muestras de campo ( $0.08 \text{ mgL}^{-1}$ ) también presenta menor concentración que en el experimento ( $0.44 \text{ mgL}^{-1}$ ), en ambos casos las diferencias marcadas fueron significativas (Valor  $P \leq 0.05$ ). Para *Abies* los sulfatos en el follaje en campo ( $0.20 \text{ mgL}^{-1}$ ) y experimento ( $0.35 \text{ mgL}^{-1}$ ), sin embargo estas diferencias no fueron significativas. Para la corteza los sulfatos presentaron concentraciones menores en campo ( $0.14 \text{ mgL}^{-1}$ ) que en el tratamiento respectivo ( $0.32 \text{ mgL}^{-1}$ ) y las diferencias si fueron significativas (Valor  $P \leq 0.05$ ).

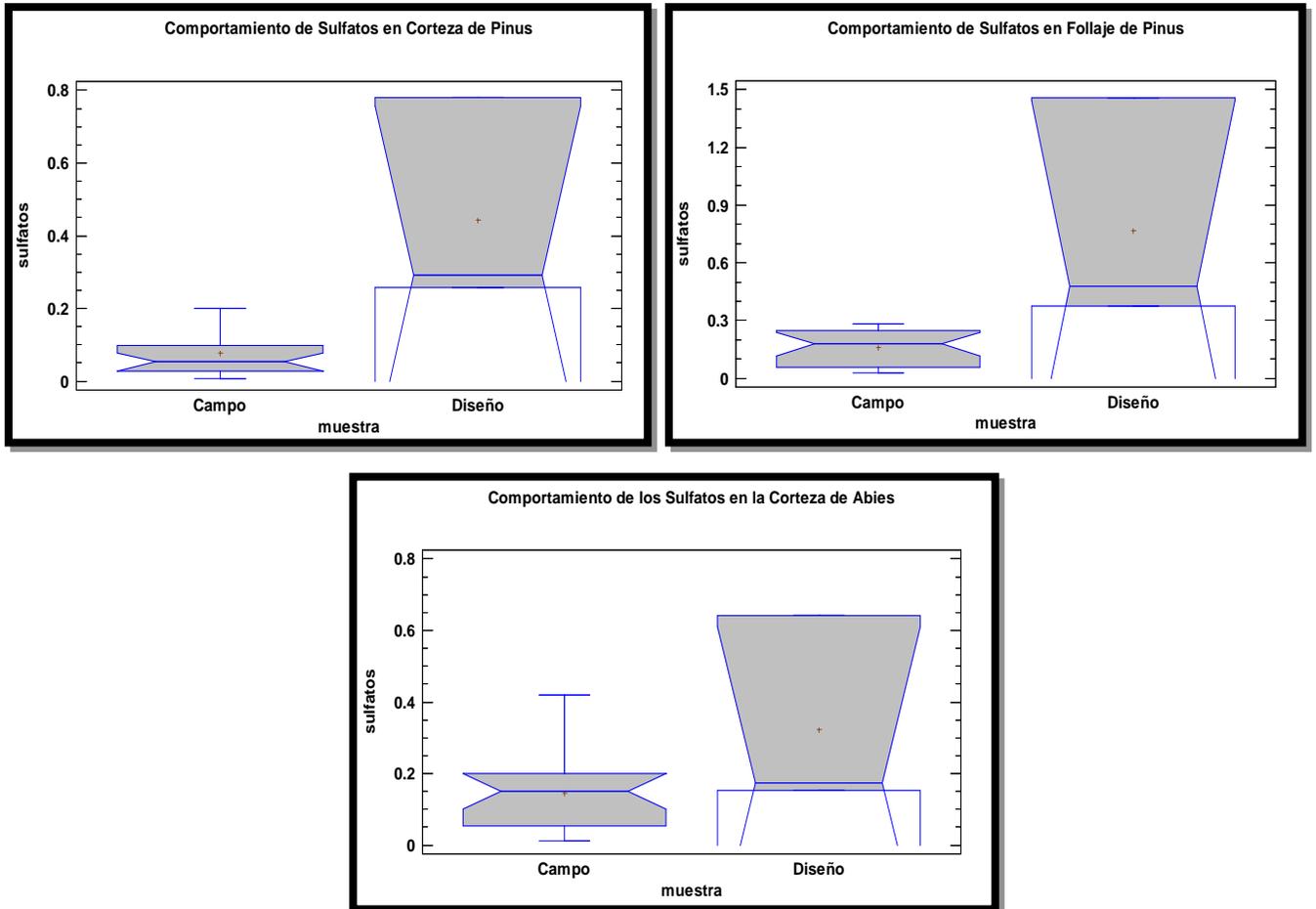


Figura 36 Comportamiento de los Sulfatos en las estructuras de *Pinus* y *Abies* en Campo y el Diseño Experimental.

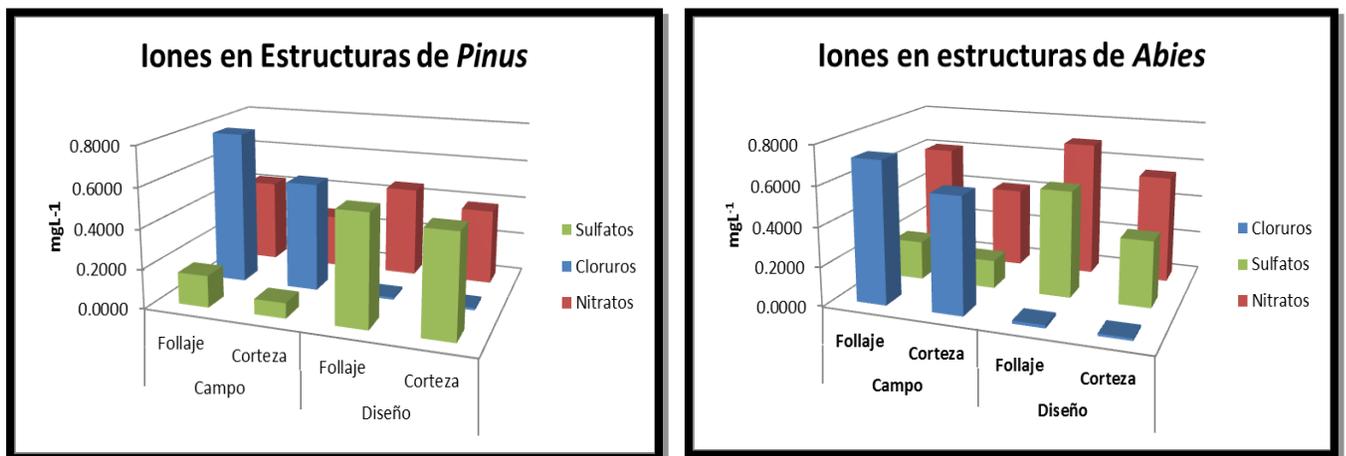


Figura 37 Comportamiento de los Iones ( $Cl^-$ ,  $NO_3^-$  y  $SO_4^{-2}$ ) en las estructuras de *Pinus* y *Abies* en Campo y el Diseño experimental.



Tanto en *Pinus* como en *Abies* la concentración de sulfatos en el experimento fue mucho mayor que la obtenida en campo, esto puede ser resultado de la excreción de sales sulfatadas a partir de las estructuras arbóreas como un mecanismo de defensa al ser cortadas, o a la disolución de mayor proporción de las sales adheridas a hojas y corteza en función del tiempo de contacto con el tipo de agua en el tratamiento, ya que en campo en tiempo de contacto se limite al de flujo antes de entrar al sistema de conducción.



## 9. CONCLUSIONES

- El pH del agua de lluvia que llega a los claros del bosque, indica la presencia de lluvia ácida durante el periodo de estudio, debido a la presencia de iones  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{NO}_3^-$  y  $\text{Cl}^-$ , presentes en las partículas atmosféricas.
- No existe una tendencia clara de incremento del pH de la precipitación pluvial, conforme avanza la época de lluvia.
- El lavado de las estructuras arbóreas durante un lapso de 7 días, genera una variación importante del pH en los tratamientos con diferentes tipos de agua, los primeros tres días disminuye el pH en los tratamientos y posteriormente tiende a la neutralización.
- Las hojas y corteza de *Abies* por su tamaño y morfología, presentan mayor superficie de contacto, mayor área de exposición y por lo tanto mejor captura de partículas atmosféricas, lo que favorece el incremento del pH en la solución producto de la intercepción con las estructuras este género.
- El flujo del agua de lluvia al ser interceptado por las estructuras arbóreas, incrementa el pH de la siguiente forma Hojas-Hojarasca-Fuste, tanto para *Pinus* como para *Abies*.
- Las concentraciones de los iones estudiados en el agua de lluvia, en las muestras colectadas bajo las estructuras arbóreas, fueron más altas con respecto a las concentraciones de las muestras colectada en áreas abiertas; esto indica que se da un lavado de los elementos depositados en seco y lixiviación de los nutrientes de la copa y fuste, con la transferencia consecuente para el suelo. Por lo tanto la vegetación modifica la composición iónica del agua de lluvia.
- Las concentraciones de nutrientes presentaron diferencias significativas entre ambos géneros:
  - *Abies* es más sensible de acuerdo a sus estructuras y presenta para nitratos los máximos valores en la solución proveniente del fuste y las hojas. Es posible que en *Pinus* se presente una pronta asimilación de este nutriente y como consecuencia su solución presente menores concentraciones de forma significativa.



- Los sulfatos en *Abies* presentaron mayor concentración únicamente en el fuste, mientras que *Pinus* tuvo mayores concentraciones en las Hojas
- Los Cloruros estuvieron presentes en mayor proporción en el fuste para *Pinus* y en el follaje para *Abies* .
- Al realizarse el lavado en las estructuras arbóreas se genera un ingreso de iones fácilmente asimilables para las especies arbóreas, lo cual nos estaría indicando un proceso de autofertilización hacia los suelos.
- El realizar el análisis del agua de lluvia libre y a través de su flujo por las estructuras arbóreas, estas desempeñaron el papel de biomonitores adecuados, por su sensibilidad y exposición al depósito atmosférico, como una vía que permite establecer el estado del ecosistema, con bajo costo y de manera eficaz.

#### **RECOMENDACIONES:**

Para estudios posteriores es importante considerar que la ubicación geográfica, la intensidad y duración del periodo de lluvias, así como el patrón de vientos son factores que inciden directamente en las características físicas y químicas del agua de lluvia. Otro factor a considerar en futuras ocasiones sería las dimensiones de los árboles que se eligen para la colecta del agua en las diversas estructuras y el tiempo de colecta de las muestras.

Todo esto con el fin de observar de una mejor manera el comportamiento de la contaminación atmosférica en los ecosistemas.



## LITERATURA CITADA

- Andrade G., Da Silva H., Ferreira C., Bellote A., (1995), Contribución del agua de lluvia en la oferta de nutrientes minerales para *Eucalyptus grandis*, Brasil, pp. 47-51.
- APHA, AWWA, WPCF (1992). Métodos Normalizados para el análisis de aguas potables y residuales, 17ª Edición; Ed. Díaz de Santos, Washington 1195 pp.
- Báez, A. P., R. Belmont, G.P. Belmont y H. Padilla. 1989. Nutrient contribution by bulk precipitation to soils in an agricultural area. Contaminación ambiental. 5:5-18.
- Báez, A. P., R. Belmont, G. P. Belmont y H. Padilla., (1993), Variation the chemical composition of wet precipitation, using a sequential sampling: urban-rural areas comparison. *Atmósfera* 6: 163-174.
- Barrientos D. L., Campillo R. R., Méndez A. E., (1994), La acidez del suelo y su efecto sobre la fijación simbiótica de nitrógeno en leguminosas forrajeras. *Agricultura técnica abril-junio, Chile.* 54 (2): 118-123.
- Bellot J., Escarre A., (1989), Contribución del Quimismo del Agua de Lluvia, de la deposición seca y la Lixiviación sobre la Química de los flujos de translocación y escorrentía cortical en el Encinar Mediterráneo, *Options Méditerranées- Série-Séminaires*, 3: 211-214.
- Bini C. Bresolin F., (1998). Soil acidification by rain in forest ecosystems: A case study in northern Italy, *The Science of the total Environment*, 222:1-15.
- Bravo H. Soto R., Sosa R. Sánchez P., (2003), Efecto de la lluvia ácida en el material constituyente de los monumentos mayas mexicanos”. *Ingeniería Investigación y Tecnología* IV (4 ): 195-206.
- Bredemeier M. (1988). Forest Canopy Transformation of Atmospheric Deposition. *Water, Air and Soil Pollution* 40: 121-138.
- Calderon M. S., Poor N. D., Campbell S. W., Tate P., (2008), Rainfall scavenging coefficients for atmospheric nitric acid and nitrate in a subtropical coastal environment. *Atmospheric Environment* 42: 7757–7767.



Calva V.G, Flores V.C, (1991), Un fenómeno degradatorio de los bosques del valle de México, la lluvia ácida, Laboratorio de Contaminación Atmosférica, ENEP.

Calva-Vázquez, G., M. L. de la Isla de Bauer, H. Padilla-Gordon, J. J. Vargas-Hernández y A. Velázquez-Martínez. (2006), La corteza arbórea como biomonitor del depósito ácido en la Cuenca de México.

Campos A., Lincon L., Gomes R., et al. (2002). Monitoreo de contaminantes atmosféricos en la ciudad de Chihuahua (Norte de México) como una herramienta para la gestión de la calidad del aire. *Revista Latinoamericana de Recursos Naturales*, 4 (3): 357-366.

Cárcamo, D. P. (2006). Redistribución de precipitaciones en bosques de sucesión avanzada de Coihue-Mañío-Tepa, en la cordillera de Los Andes, Décima Región. Tesis de Ingeniera. Facultad de Ciencias Forestales, Universidad Austral de Chile.

Caselli M. (1992). La contaminación atmosférica. Causas y fuentes. Efectos sobre el clima, la vegetación y los animales. Editores siglo vintiuno, México, 192 pp.

Chadwick, O. A., L. A. Derry, P. M. Vitousek, B. J. Huebert y L. O. Hedi. 1999. Changing sources of nutrients during four million years of ecosystem development. *Nature* 397: 491-497.

Chadwick J. M. and Kuylenstierna C, I., Johan, (1999). The relative sensitivity of ecosystems in Europe to Acidic Depositions. A preliminary assessment of the sensitivity of aquatic and terrestrial Ecosystems. *Perspectives in Energy*, 1: 71-91.

Charlson R.J., Rodhe H. (1982). Factors controlling the acidity of natural rainwater, *Nature*, 295: 683-685.

Chávez-Aguilar, G., A. Gómez-Guerrero, J. Vargas-Hernández y W. R. Horwath. (2006), Absorción foliar de nitrógeno por depósito húmedo simulado en follaje nuevo de *Abies religiosa* (H.B.K.) Schl et Cham. *Agrociencia* 40:373-381.

Cinderby S., Cambridge M. H., Herrera R., Hicks K. W., Kuylenstierna Y. C. J., Murray F. and Olbrich K. (1998). Global Assessment of Ecosystem Sensivity to Acidic Deposition. *58*, 6: 1-12.



- Delgado, H., G. Carrasco, P. Cervantes, R. Cortés y R. Molinero. (1995). Patrones de viento en la región del volcán Popocatepetl y ciudad de México. *Atmósfera*: 295-302.
- De Mello W.Z. y De Almeida M.D. (2004). Rainwater chemistry at the summit and southern flank of the Itatiaia massif, Southeastern Brazil. *Environ. Pollut.* 129, pp. 63-68.
- Dietz, J., D. Hölscher y C. Leuschner. (2006). Hendrayanto Rainfall partitioning in relation to forest structure in differently managed montane forest stands in Central Sulawesi, Indonesia. *Forest Ecology and Management* 237:170–178.
- Driscoll T. C., Driscoll M. K., Michell J. M. and Randal J. D. (2003). Effects of acidic deposition on forest and aquatic ecosystems in New York State. *Environmental Pollution*, : 327-336.
- Farías A. P., Sandoval H. L., Ventura R.E., (2007), Intercepción de lluvia por *Lysiloma microphylla* en el municipio de Querétaro, Qro. Universidad Autónoma de Queretaro, pp. 1-4.
- Frank N. Kemmer. (1995). *Manual del Agua*. Ed. Mc Graw Hill, México.
- Freydier, R., Dupre, B., Lacaux, J.P. (1998). Precipitation chemistry in intertropical Africa. *Atmospheric Environment*, 32: 749 – 765.
- García E., (1973), *Modificaciones al sistema de clasificación climática de köppen*, Instituto de Geografía, Universidad Nacional Autónoma de México, México 243 pp.
- Guilherme C. A., Helton D. S., Ferreira A. C., Bellote A. B., (1995), Contribución del agua de lluvia en la oferta de nutrientes minerales para *Eucalyptus grandis*, *BOSQUE* 16(1): 47-51
- González, E.M.I., 2005, “Variación anatómica foliar de *Abies religiosa* (H. B. K.) Schlecht. & Cham. y *Pinus hartwegii* Lindl. (Pinaceae) en tres sitios contrastantes”. Tesis de Licenciatura (Biología) Facultad de Estudios Superiores Zaragoza (UNAM).”
- Henry J. Glyan (1999), *Ingeniería Ambiental*, Ed. Prentice Hall, México, 800 pp.
- Herrera M.J. (2009), Determinación de la Concentración de Aniones en muestras de precipitación total colectadas en San José, Costa Rica, *Contaminación Ambiental*, 25 (2): 65-72.



- Hubber, A., y A. Iroumé. 2001. Variability of anual rainfall partitioning for different sites forest cover in Chile. *Journal of Hidrology*. 248: 78-92.
- Klumpp A., Domingos M., Morales R M., (1998) Effects Of Complex Air Pollution On Tree Species Of The Atlantic Rain Forest Near Cubatao, Brazil, *Chemosphere*, 36 : 89-94
- Liu H. F., Lipták G. B., (2000), *Air pollution*. Lewis Publishers, Now York USA, 242 pp.
- López L.A.B, (2010) Variación del pH de agua de lluvia en Bosques Templados Húmedos, Tesis de Licenciatura, Universidad Nacional Autónoma de México Facultad de Estudios Superiores Zaragoza, 64 pp.
- Macdonald B. C., White I., Anstrom M. E., Kene A. F.,(2007), Discharge of weathering products from acid sulfate soils after a rainfall event, Tweed River, eastern Australia. *Applied Geochemistry*, 22: 2695–2705.
- Maravilla G. R, Gómez A.S, Villalobos P.R.; (2001); Intercambio de cromátidas hermanas en Vicia faba como bioindicador del efecto del agua de lluvia de la Ciudad de México., *Revista internacional de contaminación ambiental*, 17 (3):157-164.
- Martín Del P A.L., Aceves F., Espinasa R., Aguayo A., Inguaggiato S., Morales P., Cienfuegos E., (2002), Influence of volcanic activity on spring water chemistry at Popocatepetl Volcano, Mexico, *Chemical Geology*, Elsevier science 190: 207– 229.
- Moreno G., Gallardo J. F., Bussotti F. 2001, Canopy modification of atmospheric deposition in oligotrophic *Quercus pirenaica* forests of an unpolluted región (central – western Spain), *Forest Ecology and Management*, Elsevier : 47-60.
- Nebel J.B., Wright T.R., 1999. *Ciencias Ambientales. Ecología y desarrollo sostenible*. 6ª ed., Ed. Pearson, México, pp. 400-405.
- Norton A. S. 1977. Charges in Chemical Processes in Soils Caused by Acid Precipitation. *Water, Air, and Soil Pollution* (7):389-400.
- NMX-AA-008-SCFI-2000. Determinación de pH.
- NMX-AA-093-SCFI-2000. Determinación de conductividad eléctrica.
- NMX-AA-074-1981 Determinación del Ión-Sulfato



NMX-AA-073-SCFI-2001. Determinación de Cloruros totales

NMX-AA-079-SCFI-2001. Determinación de Nitratos.

OMM, "Atlas Internacional de Nubes", Volumen I: "Manual de observación de nubes y otros meteoros" Publicaciones de la OMM, N° 407, Ginebra, 1993

Oyarzun C. E., Godoy R, Leiva S, (2002), Depositación atmosférica de Nitrógeno en un transecto valle longitudinal- cordillera de Los Andes, centro-sur de Chile, Revista Chilena de Historia Natural 75: 233-243.

Pérez S. M (2008). The effects of canopy cover on throughfall and soil chemistry in two forest sites in the México city air basin. *Atmósfera*, Enero 21:83-100.

Poblete H, (2004), Acidez de la corteza de algunas especies nativas chilenas, *Bosques*, 25(3): 73-78.

Prinz. B. (1985), Effects of air pollution on forest, *Air pollution control association*. 35(9)

Raiswell R.W., Brinblecombe P., Dent D. L., Liss P.S., (1983). *Química ambiental*. Ediciones Omega, Barcelona pp.23, 27,30.

Rzedowski, J., (1978). *Vegetación de México*. Ed. Limusa. México.

Rzedowski, J., (2006), *Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad*. México. 1ra. Edición digital.

Rojas S, (2001), Evaluación del riesgo e impacto ecológico por el efecto de los flujos piroclásticos en el volcán Popocatepetl. Proyecto S.S. para título de biólogo. Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Xochimilco. México, 75 pp.

Romero S.L., Alvarado R. D., Vargas H. J., Tejeda H. T., 2003, Análisis de la Precipitación Pluvial en Bosques de *Abies religiosa* (HBK.) Schltdl. et Cham., EN EL SUR DE LA CIUDAD DE MÉXICO. *Agrociencia* 37: 57-64.

Rubio A. M., Rivero V., Paez M., 2001, Remoción de contaminantes por lluvias y rocíos en la región metropolitana, *Boletín Sociedad Chilena. Química* 46: 1-7.

Saavedra, L.L., 1993, "Análisis Espacio-Temporal de la depositación Acida, utilizando como biomonitor de exposición la corteza arbórea de especies perennes del Parque



Nacional Desierto de los Leones. Tesis de Licenciatura (Biología) Facultad de Estudios Superiores Zaragoza (UNAM).”

Saavedra R., S.L., R. D. Alvarado, H. J. Vargas y H. T. Tejeda. (2003). Análisis de la precipitación pluvial en bosques de *Abies religiosa* (hbk.) schltl. et cham., en el sur de la ciudad de México. *Agrociencia* 37: 57-64.

Sánchez L., Morales J., Velásquez H., et al. 2009. Composición Iónica y Niveles de Acidez de las lluvias en Maracaibo, Venezuela, entre 1989 y 2001, *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 25 (3): 169-179.

Sanhueza E, M. Santana, L. Donoso y M. Pacheco (2005), Química atmosférica en la Gran Sabana III: composición iónica y características ácido-base de las lluvias; *Interciencia*, 30(10):618-626.

Santa Regina I., Gallardo J., 1989. Intercepción, pluviolavado y escorrentía cortical en uan plantación de *Pinus sylvestris* de la Cuenca de Candelario (centro-oeste de España), *Bosque*, 10 (1): 19-27.

San Jose, J. y R. Montes. 1992. Rainfall partitioning by a semideciduous forest grove in the savannas of the Orinoco Llanos, Venezuela. *Journal of Hydrology*. 132: 249-262.

Seinfeld, J. H. y S. N. Pandis. 2006. Atmospheric chemistry and physics: from air pollution to climate change. 2ª edición. Publicación Wiley & Sons. Estados Unidos de América. 1203 pp.

SIRE (Sistema de Información para la Reforestación en México) 2007. CONABIO, PRONARE, Paquetes tecnológicos.

Stoker, H.S. y S.F., Seager. 1981. Química ambiental. Contaminación del aire y del agua. Editorial Blume. Barcelona. 320 pp.

Torres G. A., Galvan G. L., 1999, Lluvia ácida, GDF, SMA : 1-27.

Velasco H. E., 2002, Lluvia ácida en los Bosques del Poniente del Valle de México, XXVIII Congreso Interamericano de Ingeniería Sanitaria y Ambiental, Cancún, México, 23 al 27 de Octubre.



Wyers, G. P. y J. H. Duyzer. 1997, Micrometeorological measurement of the dry Deposition flux of sulphate and nitrate Aerosols to coniferous forest. *Atmospheric Environment* 31: 333-343.

Xiao-Yan, L., Y. Zhi-Peng, Li. Yue-Tan, y H. Lin. 2009. Connecting ecohydrology and hydrogeology in desert shrubs: stemflow as a source of preferential flow in soils. *Hydrology Earth System Sciences*. 13: 1133–1144.

Zhu J. y Liu Z. (2003). Long-range persistence of acid deposition. *Atmospheric Environ.* 37: 2605-2613.

#### DIRECCIONES ELECTRONICAS

Comisión Nacional De Áreas Naturales Protegidas, en línea: <http://iztapopo.conanp.gob.mx/> ; consultado el 2 de Diciembre de 2009.

Secretaría del Medio Ambiente del D.F., en línea: <http://www.sma.df.gob.mx>, consulta el 10 de Diciembre de 2009.

SMA, 2008. Informe de la calidad del aire en la zona metropolitana del Valle de México: estado y tendencias 1990-2007. Dirección de Monitoreo Atmosférico, Secretaría del medio ambiente. <http://sma.df.gob.mx/simat>. (consultado en el mes de Agosto de 2010).