



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO  
FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES ZARAGOZA

**VARIACIÓN DEL pH DE AGUA DE LLUVIA EN  
BOSQUES TEMPLADOS HÚMEDOS**

**TESIS**

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE

**BIÓLOGA**

PRESENTA

**LÓPEZ LÓPEZ ALMA BELLA**

DIRECTOR DE TESIS: Biól. Eloisa Guerra Hernández

20 DE ABRIL DE 2010





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.

## **D E D I C A T O R I A**

A mi papa Rubén López Ortiz; por su amor incondicional, por su fortaleza, y en quién en las adversidades siempre puedo encontrar tranquilidad.

A mi preciosa mami, Agripina López López; porque en ella encontré a una mujer fuerte, y que su estima sobrepasa largamente a la de las piedras preciosas, por su apoyo, confianza y amor.

A mis hermanos Rubén López López (mi flaquito) y Sandra Isabel López López, de quienes he aprendido la nobleza de corazón y que el amor es preciso que siempre se manifieste. Y en quienes siempre encuentro apoyo y confianza.

Muy cerca y detrás de mis logros siempre han estado ustedes.

LOS AMO

*El fundó la tierra sobre sus bases, no será jamás removida.  
Hizo la luna para los tiempos,  
el sol conoce su ocaso... ¡muchas son tus obras oh Jehová!  
¡Todas ellas hiciste con sabiduría!, la tierra está llena de tus beneficios.  
Sal. 104.*

*El hace cosas grandes e inescrutables maravillas que no tienen cuento;  
mira a la tierra y ella tiembla, toca a los montes y humean.  
¿Quién visitó por él la tierra? ¿Y quién puso por orden todo el mundo?  
Mira a los cielos, y ve y considera que las nubes son más altas que tú.  
El reduce las gotas de las aguas, al derramarse la lluvia según el vapor,  
las cuales destilan las nubes, goteando en abundancia.  
Debajo de los cielos todo lo dirige, el hace grandes cosas que nosotros no entendemos:  
A la nieve dice desciende, también a la lluvia y a los aguaceros da su fortaleza.  
¿Has conocido las diferencias de las nubes, las maravillas del Perfecto en sabiduría?  
¿Extendiste tú con él los cielos, firmes como un espejo sólido?  
... por más que el hombre razone quedará abismado  
Job 35-37.*

## **A G R A D E C I M I E N T O S**

A Dios del universo que no deja de sorprenderme ¡¡nunca!! ¡¡Está en todo!! ¡¡No se le escapa nada!!

Gracias Señor por la enorme bendición de mis padres, hermanos, amigos, porque me rodeas solo seres hermosos y la oportunidad de estudiar esta maravillosa carrera.

A toda mi familia, de quien siempre he tenido su apoyo y cariño (En este apartado están mis primas, tías, primos...)

A la Universidad Nacional Autónoma de México y Facultad de estudios superiores Zaragoza: por su generosidad, grandeza y sobre todo por sentir el orgullo de ser parte de esta gran comunidad universitaria.

Al jurado, a los profesores: Efraín Ángeles Cervantes, Eloisa Guerra Hernández, Germán Calva Vázquez, Gerardo Cruz Flores y Juan Manuel Valderrábano Gómez por enriquecer el contenido de este trabajo.

A la Maestra Eloisa Guerra Hernández, por su ¡¡¡paciencia!!! que debo confesar fue bastante, apoyo y dirección en este trabajo, y enseñarme el compromiso y responsabilidad que conlleva.

Al Maestro Efraín Ángeles Cervantes, por su ¡¡¡paciencia!!!, por compartirme sus conocimientos, porque me ha enseñado a cuestionarme y llenarme dudas y además a sido un amigo que estimo.

Al Dr. Gerardo Cruz Flores, mi doctor..., porque es una persona llena de calidez humana y nobleza, que inspira admiración y respeto. De quién siempre tengo algo que aprender aun sin que diga nada y a quién aprecio mucho.

A Juan Manuel Valderrábano Gómez, bueno... confesare que con los mapas ayudaste... un poco. De verdad gracias por tu ¡¡¡paciencia!!! y apoyo. Por tu revisión exhaustiva y minuciosa que mejoró este trabajo y porque además me has brindado tu amistad, sabes que te quiero mucho.

A mis amigos y hermanos... Cesia ¡te amo nena!; mi niño, sabes que te quiero ¡¡¡horrores!!!; mi hermano Adrian a quien quiero un ¡montón!, es decir ¡mucho!; chencho, aunque sea un puntito a parte, leo y carmelito a quienes aprecio enormemente.

A mi arita, carito, lupita, saben que las amo; maguito, ¡beyi! porque sé que me estimas y por tu amistad sincera, ¡corderito! porque detrás de esa coraza hay un alma dulce que me dejaste conocer.

A Manuelito, ¿qué puedo decir?, compartimos la misma pena, pero el final del día fue mucho mejor, gracias por compartir conmigo este trabajo, por tu cuidado, compañía y paciencia en campo.

A mi buen amigo Roberto, gracias porque sé que siempre puedo contar contigo, ¡¡gracias!!! de verdad.

A todos mis amigos que sé que son una bendición en mi vida y de quienes he aprendido mucho. Bueno, pues quisiera nombrar a todos, saben que los quiero mucho, y sé que con un cariño sincero recibí su apoyo y sobre todo su amistad.

| <b>ÍNDICE</b> |   | <b>Página</b> |
|---------------|---|---------------|
|               | RESUMEN   | 1             |
| 1.            | INTRODUCCIÓN  | 3             |
| 2.            | ANTECEDENTES  | 5             |
| 3.            | MARCO TEÓRICO   | 7             |
| 3.1           | El agua de lluvia y su interacción con el sistema suelo-vegetación-atmósfera  | 7             |
| 3.1.1         | Procesos involucrados en el depósito húmedo   | 7             |
| 3.1.2         | Modificación del pH del agua de lluvia (lluvia ácida)   | 8             |
| 3.2           | Influencia de las características estructurales de los bosques sobre la composición del agua de lluvia                              | 9             |
| 3.2.1         | Intercepción del dosel  | 11            |
| 3.2.2         | Escurrimiento fustal  | 11            |
| 3.2.3         | Flujo bajo la hojarasca   | 12            |
| 3.3           | El agua de lluvia asociada a daños y perturbación dentro de los ecosistemas   | 12            |
| 3.4           | El agua de lluvia como fuente de nutrimentos de los ecosistemas   | 14            |
| 3.5           | La vegetación como purificador de la atmósfera y sistema autorregulador de su ambiente  | 15            |
| 4.            | JUSTIFICACIÓN   | 17            |
| 5.            | HIPÓTESIS   | 17            |
| 6.            | OBJETIVOS   | 18            |
| 7.            | MATERIALES Y MÉTODOS  | 19            |
| 7.1           | Descripción de las áreas de estudio   | 19            |
| 7.2           | Parque Nacional IztaPopo (PNIP)   | 19            |
| 7.3           | Parque Nacional El Chico (PNCH)   | 20            |
| 7.4           | Localidad de La Mojonera (MOJ)  | 22            |
| 7.5           | Descripción de los bosques evaluados  | 23            |
| 7.6           | Fase de campo   | 28            |
| 7.6.1         | Toma de muestras de agua de lluvia y escurrimientos superficiales   | 28            |
| 7.6.2         | Toma de muestras de suelo y de tejido vegetal   | 30            |
| 7.7           | Fase de laboratorio   | 30            |
| 7.7.1         | Análisis químico del agua   | 30            |
| 7.7.2         | Análisis químico del suelo y tejido foliar  | 30            |
| 7.8           | Análisis de datos   | 31            |
| 8.            | RESULTADOS Y DISCUSIÓN  | 32            |
| 8.1           | Evaluación del agua de lluvia en los claros del bosque (CB)   | 32            |
| 8.2           | Evaluación en el Parque Nacional IztaPopo   | 36            |
| 8.2.1         | Variación química del agua de lluvia en el flujo del follaje, fuste y hojarasca de <i>Pinus leiophylla</i> y <i>Abies religiosa</i> | 36            |

---

|       |   |    |
|-------|---|----|
| 8.2.2 | Relación de los nutrimentos del agua de lluvia, suelo y tejido foliar   | 39 |
| 8.3   | Evaluación en el Parque Nacional El Chico   | 41 |
| 8.3.1 | Variación química del agua de lluvia en el flujo del follaje, fuste y hojarasca de <i>Abies religiosa</i> y <i>Cupressus lusitanica</i> | 41 |
| 8.3.2 | Relación de los nutrimentos del agua de lluvia, suelo y tejido foliar   | 44 |
| 8.4   | Localidad de la Mojonera  | 45 |
| 8.4.1 | Variación química del agua de lluvia en el flujo del follaje, fuste y hojarasca de <i>Fagus grandifolia</i> y <i>Pinus patula</i> .     | 45 |
| 8.4.2 | Relación de los nutrimentos del agua de lluvia, suelo y tejido foliar   | 49 |
| 8.5   | Variación de pH del agua de lluvia en dos momentos en la localidad de La Mojonera   | 50 |
| 8.6   | Variación de pH del agua de lluvia en bosque de <i>Pinus leiophylla</i> del PNIP y <i>Pinus patula</i> en la localidad de La MOJ        | 52 |
| 8.7   | Variación de pH del agua de lluvia en Bosque de <i>Abies religiosa</i> del PNIP y PNCH  | 53 |
| 8.8   | Comportamiento del pH del agua de lluvia en el ecosistema   | 55 |
| 9.    | CONCLUSIONES  | 58 |
| 10.   | BIBLIOGRAFÍA  | 60 |

## ÍNDICE DE FIGURAS

|            |   |    |
|------------|---|----|
| Figura 1.  | pH del agua de lluvia en diferentes regiones del mundo.   | 4  |
| Figura 2.  | Procesos implicados en el depósito húmedo.  | 7  |
| Figura 3.  | Componentes del ciclo hidrológico en un ecosistema forestal y redistribución del agua de lluvia.  | 10 |
| Figura 4.  | Posibles causas del decline forestal.   | 14 |
| Figura 5.  | Mapa de Ubicación del Parque Nacional Iztapopo.   | 20 |
| Figura 6.  | Mapa de Ubicación del Parque Nacional El Chico  | 21 |
| Figura 7.  | Mapa de ubicación de La Mojonera Zacualtipán  | 22 |
| Figura 8.  | Bosque de <i>Abies religiosa</i> en el PN El Chico.   | 23 |
| Figura 9.  | Hoja de <i>Abies religiosa</i>  | 24 |
| Figura 10. | Bosque de <i>Pinus leiophylla</i> en el PN-IztaPopo y Bosque de <i>Pinus patula</i> en la MOJ   | 24 |
| Figura 11. | Hoja de <i>Pinus leiophylla</i> y hoja de <i>Pinus patula</i>   | 25 |
| Figura 12. | Bosque de <i>Cupressus lusitanica</i> en el PN El Chico   | 26 |
| Figura 13. | Hoja de <i>Cupressus lusitanica</i>   | 26 |
| Figura 14. | <i>Fagus grandifolia</i> en la Mojonera, Zacualtipán Hgo  | 27 |
| Figura 15. | Hoja de <i>Fagus grandifolia</i>  | 27 |
| Figura 16. | Flujo del agua de lluvia y de muestras de agua colectadas   | 28 |
| Figura 17. | Muestreo y análisis del agua colectada en campo   | 29 |
| Figura 18. | Toma de muestras de suelo y tejido foliar   | 30 |
| Figura 19. | Tratamiento de las muestras de agua en el laboratorio   | 30 |
| Figura 20. | Tratamiento en el laboratorio de las muestras de tejido foliar y suelo  | 31 |
| Figura 21. | Variación de pH, conductividad eléctrica, sólidos totales disueltos y nutrimentos del agua de lluvia en los CB                                    | 35 |
| Figura 22. | Diagrama de la variación del pH del agua de lluvia en el PNIP   | 36 |
| Figura 23. | Variación de pH, conductividad eléctrica, sólidos totales disueltos y nutrimentos del agua de lluvia al pasar por la cubierta forestal en el PNIP | 38 |
| Figura 24. | Diagrama de la variación del pH del agua de lluvia en el PNCH   | 41 |
| Figura 25. | Variación de pH, conductividad eléctrica, sólidos totales disueltos y nutrimentos del agua de lluvia al pasar por la cubierta forestal en el PNCH | 43 |
| Figura 26. | Diagrama de la variación del pH del agua de lluvia en la MOJ  | 45 |
| Figura 27. | Variación de pH, conductividad eléctrica, sólidos totales disueltos y nutrimentos del agua de lluvia al pasar por la cubierta forestal en la MOJ  | 48 |
| Figura 28. | Variación de pH, CE y STD durante dos períodos de recolección en la localidad de la Mojonera  | 51 |



|            |   |    |
|------------|---|----|
| Figura 29. | Variación de pH, CE y STD del flujo del agua de lluvia al pasar por la vegetación en un bosque de <i>Pinus</i> en el PNIP y la MOJ      | 52 |
| Figura 30. | Variación de pH, CE y STD del flujo del agua de lluvia al pasar por la vegetación en un bosque de <i>A. religiosa</i> en el PNIP y PNCH | 54 |
| Figura 31. | Comparación del pH del agua de lluvia al pasar por el FO, FU y HOJ del bosque de <i>A. religiosa</i> del PNIP y del PNCH                | 56 |

### ÍNDICE DE CUADROS

|            |   |    |
|------------|---|----|
| Cuadro 1.  | Caracterización de los sitios de estudio y del agua de lluvia en los claros del bosque                | 32 |
| Cuadro 2.  | Diferencia mínima significativa (LSD) de Fisher   | 33 |
| Cuadro 3.  | Nutrientes del tejido foliar de <i>P. leiophylla</i> y <i>A. religiosa</i>                            | 39 |
| Cuadro 4.  | pH y nutrientes del suelo bajo <i>P. leiophylla</i> y <i>A. religiosa</i>                             | 39 |
| Cuadro 5.  | Intervalos de calidad del suelo propuestos para el PN Zoquiapan y Anexas                              | 39 |
| Cuadro 6.  | Intervalos de estadio nutrimental propuestos para <i>Pinus</i> y <i>A. religiosa</i> del PN IztaPopo. | 39 |
| Cuadro 7.  | Nutrientes del tejido foliar de <i>A. religiosa</i> y <i>C. lusitanica</i>                            | 44 |
| Cuadro 8.  | pH y nutrientes del suelo bajo <i>A. religiosa</i> y <i>C. lusitanica</i>                             | 44 |
| Cuadro 9.  | Nutrientes del tejido foliar de <i>F. grandifolia</i> y <i>P. patula</i>                              | 49 |
| Cuadro 10. | pH y nutrientes del suelo bajo <i>P. leiophylla</i> y <i>A. religiosa</i>                             | 49 |
| Cuadro 11. | Características de los cuerpos superficiales de agua.   | 57 |

## RESUMEN

Existen tendencias controvertidas acerca de la lluvia, cuando tiene un carácter ácido se considera perjudicial para los bosques, por otro lado el depósito húmedo forma parte de un proceso natural de limpieza de la atmósfera y de aporte de nutrimentos al ecosistema. La interacción del agua de lluvia con la vegetación modifica su composición original. La finalidad de este trabajo fue evaluar el efecto de la vegetación sobre el pH del agua lluvia; en bosques templados del PN IztaPopo (PNIP), PN El Chico (PNCH) y La Mojonera (MOJ). Se instalaron colectores 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) que se utilizaron como testigo. Se tomaron muestras de agua de los escurrimientos superficiales cercanos, de tejido foliar y de suelo. En las muestras de agua se midió el pH, STD (sólidos totales disueltos), CE (conductividad eléctrica),  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$  y  $\text{PO}_4^{3-}$ ; en el suelo y follaje se determinó N, P,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{K}^+$  y  $\text{Na}^+$ . En el PNCH no se registró lluvia ácida (5.68) a diferencia del PNIP y la MOJ (4.51 y 4.68), éste último sitio presentó alta concentración de sulfatos ( $11.03 \text{ mg L}^{-1}$ ); en el PNIP fueron significativamente mayores la CE y STD. El pH se varió en mayor proporción en el follaje y la hojarasca, en esta la CE y los STD aumentaron en todos los sitios; en los escurrimientos superficiales el pH fue cercano a la neutralidad. Los  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$  y  $\text{PO}_4^{3-}$  disminuyeron en el follaje con respecto a los CB. Los nutrimentos del tejido foliar se encontraron en niveles suficientes y altos, con excepción del N; por lo existe un importante aporte de nitratos del agua de lluvia. El pH del suelo mostró niveles moderados de acidez. Se concluye que la vegetación modificó el pH de la lluvia, *P. patula* incrementó significativamente la acidificación de la lluvia, en tanto que *C. lusitanica*, *F. grandifolia* y *A. religiosa* la reducen; por lo que la vegetación es un factor regulador del pH, ecológicamente importante y diferencial en el agua de lluvia.

*Palabras clave: Lluvia ácida, bosques templados húmedos, pH*

## ABSTRACT

There are controversial trends about the rain, when it has an acidic character is considered detrimental to the forests, on the other way, the wet deposition is part of a natural process of cleansing of the atmosphere and the contribution of nutrients to the ecosystem. The interaction of the rainwater with the vegetation modifies its original composition. The purpose of this study was to evaluate the effect of vegetation on the pH of rainwater, in temperate forests IztaPopo PN (PNIP), PN El Chico (PNCh) and La Mojonera (MOJ). Collectors were installed in rainwater: *Pinus leiophylla*, *Abies religiosa*, *Cupressus lusitanica*, *Pinus patula* and *Fagus grandifolia*; under the foliage, stem, litter of the tree-lined and forest clearings (CB) used as control. Water samples were taken near the surface runoff of soil and leaf tissue. In the water samples was measured by pH, TDS (total dissolved solids), EC (electrical conductivity),  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$  and  $\text{PO}_4^{3-}$ ; in soil and foliage were determined N, P,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{K}^+$  and  $\text{Na}^+$ . In PNCH the acid rain were not recorded (5.68) unlike the PNIP and MOJ (4.51 and 4.68), the latter site contained high concentration of sulfate ( $11.03 \text{ mg L}^{-1}$ ); in PNIP were significantly higher EC and TDS. The pH was varied in greater proportion in the foliage and litter in the EC and TDS increased in all sites, in surface runoff pH was close to neutral. The  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$  and  $\text{PO}_4^{3-}$  in the leaves decreased in comparison to the CB. The leaf tissue nutrients were found at levels high and sufficient, with the exception of N, so there is a significant contribution of rainwater nitrate. Soil pH showed moderate levels of acidity. We conclude that the vegetation changed the pH of rain; *P. patula* significantly increased acidification of rain, while *C. lusitanica*, *F. grandifolia* and *A. religiosa* reduce it, and so the vegetation is a controlling factor of pH, ecologically important and differential in rainwater.

*Words key: acid rain, temperate humid forests, pH.*

## ***El simbolismo de la lluvia, por Rene Guenon***

*La lluvia desciende desde los ríos del cielo,  
sus caminos son ondulados y fluidos.  
La lluvia que cae del firmamento puede causar asombro poético,  
interpretación simbólica o una indagación científica  
sobre las causas físicas que la generan,  
las frescas gotas con las que el cielo fertiliza la tierra.*

### **1. INTRODUCCIÓN**

Las lluvias forman un puente entre atmósfera, vegetación, suelo y sistemas hídricos, 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 y el pH del agua de lluvia.

El pH muestra la actividad de los iones de hidrogeno, cuando éste es menor de 5.6 en el agua de lluvia se dice que es ácida. La depositación ácida ha sido señalada, hipotéticamente, como una de las causas del decline forestal a escala mundial, afectando grandes extensiones de las superficies boscosas (Moreno *et al.*, 2001; Herrera y Rodríguez, 2009).

Debido a ello el pH y la composición química de la precipitación son evaluados a nivel internacional en varias estaciones de monitoreo como: el 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 1). En México su estudio se realiza por la Red de Depósito Atmosférico (REDDA) de la ZMVM (Torres, 1999).

El efecto del depósito ácido no explica por sí mismo el fenómeno de mortalidad del arbolado. Además los bosques desempeñan una función vital en la captación, conservación, purificación y renovación de los recursos hídricos (Llorens y Domingo, 200

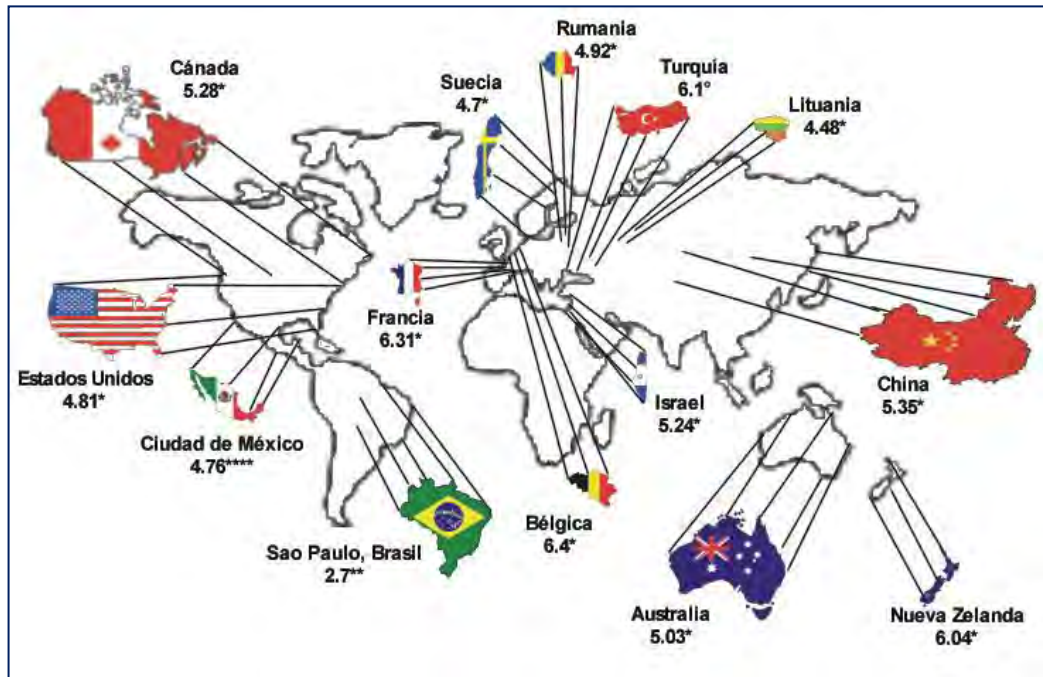


Figura 1. pH del agua de lluvia en diferentes regiones del mundo (Tomado de Torres, 1999).

La composición química de la lluvia es alterada cuando es interceptada por la vegetación, los iones arrastrados o contenidos en la precipitación son modificados durante su pasaje a través del follaje, fuste y hojarasca (Moreno *et al.*, 2001).

La lluvia además de representar un recurso hídrico, es un factor de vitalidad; sin embargo, también llega a ser un factor de alteración al bosque por acidez y porta gran relevancia al evaluar las interacciones atmósfera-biosfera y los ciclos biogeoquímicos (Sanhueza *et al.*, 2005).

Por otra parte se sabe que la mayoría de las plantas son capaces de moderar la toxicidad del  $\text{SO}_2$  y  $\text{NO}_x$  por procesos activos y pasivos (Larcher, 2003); y pueden modificar los patrones de ciclaje de nutrientes en los ecosistemas naturales. Nuevas investigaciones muestran que el efecto de la vegetación podría ser más importante que factores abióticos; tales como el clima, en el control de la fertilidad del ecosistema (Hobbie, 1992).

Los bosques regulan la cantidad y calidad del agua que ingresa a ellos, como precipitación; en este contexto surge la necesidad de evaluar los cambios que sufre el agua de lluvia en su composición química y pH al interactuar con la vegetación en estos ecosistemas.

## 2. ANTECEDENTES

La mayoría de los estudios de deposición húmeda, tanto en México como a nivel mundial se han enfocado principalmente sobre áreas pobladas, zonas con mayor grado de contaminación y a sus efectos en el ecosistema (Klumpp *et al.*, 1998; Moreno *et al.*, 2001; Herrera y Rodríguez, 2009). Las primeras evidencias que se registraron por lluvia ácida son la acidificación de los lagos de Escandinava, Suecia, Finlandia y Dinamarca, y hasta los años 80' se empiezan a realizar estudios de carácter ecológico (Nebel y Wright, 2002).

En México existen pocos trabajos relacionados sobre la composición química de la lluvia y generalmente se han realizado en ambientes urbanos (Torres y Galván, 1999; Velasco *et al.*, 2002). El monitoreo del agua de lluvia inicia en 1987 en la ZMCM, desde entonces se efectúan mediciones de parámetros químicos: conductancia específica, sulfatos ( $\text{SO}_4^-$ ), nitratos ( $\text{NO}_3^-$ ), calcio ( $\text{Ca}^{++}$ ), potasio ( $\text{K}^+$ ) y magnesio ( $\text{Mg}^{++}$ ); ya que son los iones que tienen mayor representatividad en la química del agua de lluvia y son vigilados alrededor del mundo por las diferentes estaciones (Torres y Galván, 1999). Pocos investigadores se han orientado a estudiar la capacidad de autorregulación de los bosques ó al estudio de la modificación química causada por la vegetación, sobre el agua de lluvia.

Saavedra-Romero *et al.*, (2002) analizan la precipitación pluvial en el Parque Nacional Desierto de los Leones, D. F. Realizaron mediciones en el agua de lluvia recolectada de los claros del bosque (CB) y del escurrimiento foliar (EF) en bosques de Oyamel, a pesar de encontrar diferencias significativas entre ambos flujos de agua no es constante en todo el tiempo de muestreo.

Asimismo el depósito húmedo ácido se asocia a ambientes urbanos y con influencia sobre áreas cercanas; sin embargo, algunos estudios realizados en sitios urbanizados y sobre los que aparentemente no existe influencia de la contaminación atmosférica han revelado valores de pH bajos. Báez *et al.*, (1993) comparan la composición química del agua de lluvia de la ciudad de México (4.31-7.11) y otra localizada a 80 Km (4.46-5.40), los resultados muestran un intervalo más ácido en el área alejada de la ciudad. Además, en otras investigaciones no se indica una relación entre el decline forestal y la presencia de precipitación ácida.

Una investigación realizada con diferente depósito atmosférico en el PN Desierto de los Leones (DL), especificado como alto depósito; y en el PN Zoquiapan (ZOQ), denominado como bajo depósito, se encontró alto depósito de N y S en el DL; no obstante, existe consumo de amonio por parte del follaje de ambos sitios. Incluso el alto depósito en el flujo foliar del bosque de *Abies religiosa* contribuye de manera significativa

con N, C, P, Ca y Mg al suelo forestal; por lo que concluyen que no existen efectos perjudiciales obvios de este depósito (Pérez-Suárez *et al.*, 2008).

Peña (2006) relaciona el deterioro de la copa debida a la contaminación atmosférica, con las variaciones del estado nutricional del follaje en bosques de *Abies religiosa* y *Pinus hartwegii*. Los resultados no mostraron correspondencia entre el grado de daño de la copa y la variación en el contenido de nutrimentos.

Por otra parte González (2005) al analizar la anatomía foliar de *Abies religiosa*, encontró alteraciones en el grosor de la cutícula y la densidad de estomas causado principalmente por ozono; pero no se observó ningún daño en la epidermis, hipodermis, mésofilo y haces vasculares, y en *Pinus hartwegii* no se altera ningún elemento celular. Por otro lado en *Abies religiosa* no se encontraron diferencias anatómicas contrastantes entre hojas recolectadas y las provenientes del herbario (de los años 50' y 60').

*¿Qué provecho tiene el hombre de todo su trabajo con que se afana debajo del sol?  
¿Qué es lo que fue lo mismo que será? ¿Qué es lo que ha sido hecho?  
Lo mismo que se hará: y nada hay nuevo debajo del sol. Ec.: 1.9*

### 3. MARCO TEÓRICO

#### 3.1 El agua de lluvia y su interacción con el sistema suelo-vegetación-atmósfera

La atmósfera está constituida por sustancias que se transforman continuamente a través de reacciones químicas, además del intercambio continuo de materia entre el sistema aire-agua-suelo (Stoker y Seager, 1981). El depósito húmedo y seco es el camino por el cual los gases y las partículas son removidos de la atmósfera e incorporados a la superficie de la Tierra.

El depósito húmedo se refiere a procesos naturales que remueven los compuestos del aire a través de: nubes, gotas, niebla, nieve y lluvia (Seinfeld y Pandis, 2006). El agua de lluvia representa un importante regulador de la remoción húmeda y su composición química está determinada principalmente por tres mecanismos: condensación del vapor de agua sobre núcleos de condensación; captura de contaminantes por la nube (*rainout*); y procesos de lavado bajo la nube (*washout*) (Báez *et al.*, 1993).

##### 3.1.1 Procesos involucrados en el depósito húmedo

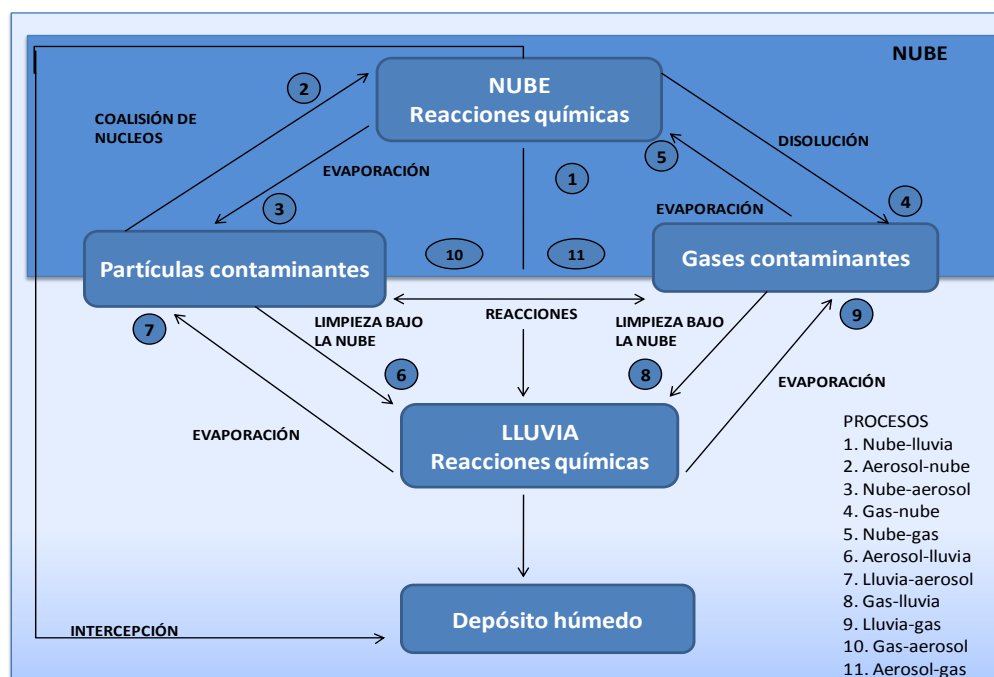


Figura 2. Procesos involucrados en el depósito húmedo (Tomado de Seinfeld y Pandis 2006).



A través del agua de lluvia los elementos minerales de la atmósfera se incorporan a los ecosistemas terrestres y acuáticos, como iones disueltos y núcleos de condensación, o por arrastre de partículas suspendidas en el aire (Andrade *et al.*, 1995).

El estudio de la lluvia es uno de los procesos atmosféricos más complejos, tiene un rango amplio de influencia a microescala ( $10^6$  m) y macroescala ( $10^6$  m). Involucra transformaciones e interacciones desde su formación, dentro de la nube, bajo la nube y cada uno de ellos diferente (Figura 2) (Sienfield y Pandis, 2006; Herrera y Rodríguez, 2009).

En la Figura 2 se muestra un esquema general complejo y heterogéneo de los procesos que tienen lugar en la formación del depósito húmedo y por tanto de su composición. La determinación de la constitución química del agua de lluvia provee un mayor entendimiento de los tipos de fuentes que contribuyen a la química de ésta y permiten comprender los patrones de dispersión de los contaminantes atmosféricos a nivel local y global; así como el impacto de su depósito sobre los ecosistemas.

### 3.1.2 Modificación del pH del agua de lluvia (lluvia ácida)

La lluvia en el momento de su formación presenta un pH neutro; sin embargo, en la atmósfera una pequeña cantidad de  $\text{CO}_2$  se disuelve en las gotas de lluvia, formando  $\text{H}_2\text{CO}_3$ , donde el H presenta poca tendencia a desprenderse como ion positivo, por lo tanto el pH de agua de lluvia varía de la neutralidad, hasta un valor de 5.6 (Liu y Lipták, 2000).

El incremento de contaminantes atmosféricos como los  $\text{SO}_2$  y  $\text{NO}_x$  ocasiona la disminución del pH del agua de lluvia, lo que genera lluvia ácida (SMA, 2007).

Estos óxidos entran a la tropósfera proveniente de fuentes naturales y antropogénicas, la oxidación por el radical hidroxilo los convierte en ácido sulfúrico y nítrico, que se disuelven con facilidad en agua o se adhieren a partículas que caen con la precipitación ácida. Sin embargo, los efectos atribuidos por la lluvia ácida, son el resultado de la combinación del depósito húmedo y seco (Torres y Galván, 1999; Rubio *et al.*, 2001; Nebel y Wright, 2002).

Las **fuentes naturales de los óxidos de N y S**, contribuyen con grandes proporciones de contaminantes: al año se emite de 50 a 70 millones de toneladas de azufre (de volcanes, espuma de mar y procesos microbianos) y de 30 a 40 millones de toneladas de óxidos de nitrógeno (de relámpagos, quema de biomasa y procesos microbianos). Las fuentes antropogénicas se calculan entre 100 y 130 millones de toneladas de dióxido de azufre y de 60-70 de óxidos de nitrógeno (Nebel y Wright, 2002).

Dentro de las principales **fuentes antropogénicas**, la formación de  $\text{NO}_2$  (bióxido de nitrógeno) en la atmósfera resulta de la oxidación del  $\text{NO}$  (monóxido de nitrógeno) generado por el uso de combustibles fósiles por fuentes fijas y móviles, aunque también se producen durante la fabricación de ácido nítrico, el uso de explosivos, uso de gas LP y en el proceso de soldadura (Caselli, 1992). El bióxido de azufre se halla presente en el petróleo, en el fraccionamiento del crudo, combustóleo, gas oleo y el carbón contiene un porcentaje que varía de 0.5 a 2.5%.

Otra fuente proviene de los metales que se encuentran asociados al azufre en forma de sulfuros y de la calefacción doméstica, lo cual significa que la concentración de  $\text{SO}_2$  depende de la estación y del clima (Stoker y Seager, 1981; Caselli, 1992). Sin embargo son varios los grupos químicos que se involucran en la formación de los ácidos atmosféricos, intervienen grupos de iones de tipo orgánico e inorgánico: ácidos carboxílicos, ésteres, alcoholes, aromáticos, aldehídos, fenoles, aminas que se ubican en el depósito orgánico. Los ácidos en fase gaseosa:  $\text{HNO}_3$ ,  $\text{HCl}$ ,  $\text{H}_2\text{SO}_4$ ,  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{H}_2\text{S}$  y en forma de aerosol como sulfatos, nitratos, conforman el depósito inorgánico (Sienfield y Pandis, 2006), responsables del pH del agua de lluvia.

### 3.2 Influencia de las características estructurales del bosques sobre la composición del agua de lluvia

La ecohidrología es un campo que intenta interconectarse dentro del continuo suelo-planta-atmósfera, lo cual permite comprender las interacciones entre el suelo, agua y los factores biológicos. La vegetación juega un papel importante en los procesos ecohidrológicos; ya que afecta la distribución vertical y horizontal de la precipitación dentro de la comunidad arbórea (Xiao-Yan *et al.*, 2009).

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 con el nombre de redistribución de precipitaciones (Cárcamo, 2006; Llorens y Domingo, 2007; Xiao-Yan *et al.*, 2009), las cuales son piezas fundamentales del ciclo hídrico, ya que permiten la purificación, circulación espontánea y continua del agua (San José y Montes, 1992; Llorens y Domingo, 2007).

En el ciclo hidrológico de un bosque se presentan varias fases (Figura 3): precipitación de masa, precipitación incidente o total (claro del bosque), intercepción que puede ser evaporada, absorbida o filtrada (flujo de la copa, *throughfall* ó precipitación penetrante), escurrimiento fustal (flujo del tallo ó *stemflow*), precipitación directa e

infiltración (flujo bajo la hojarasca) (Spurr, 1982; Cárcamo, 2006; Llorens y Domingo, 2007; Xiao-Yan *et al.*, 2009).

**Precipitación de masa.** Es la precipitación incidente (depósito húmedo) y la precipitación seca (depósito seco), que determinan la contribución de nutrimentos al ecosistema de la atmósfera al suelo (Spurr, 1982).

**Precipitación incidente o total.** 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).

**Precipitación directa.** Se define como el agua que llega al suelo a través de las aperturas en el dosel, la lluvia atraviesa la copa sin entrar en contacto con ella *trascolación libre*, y junto con el goteo de las hojas y ramas constituye la *trascolación* o precipitación directa (Spurr, 1982).

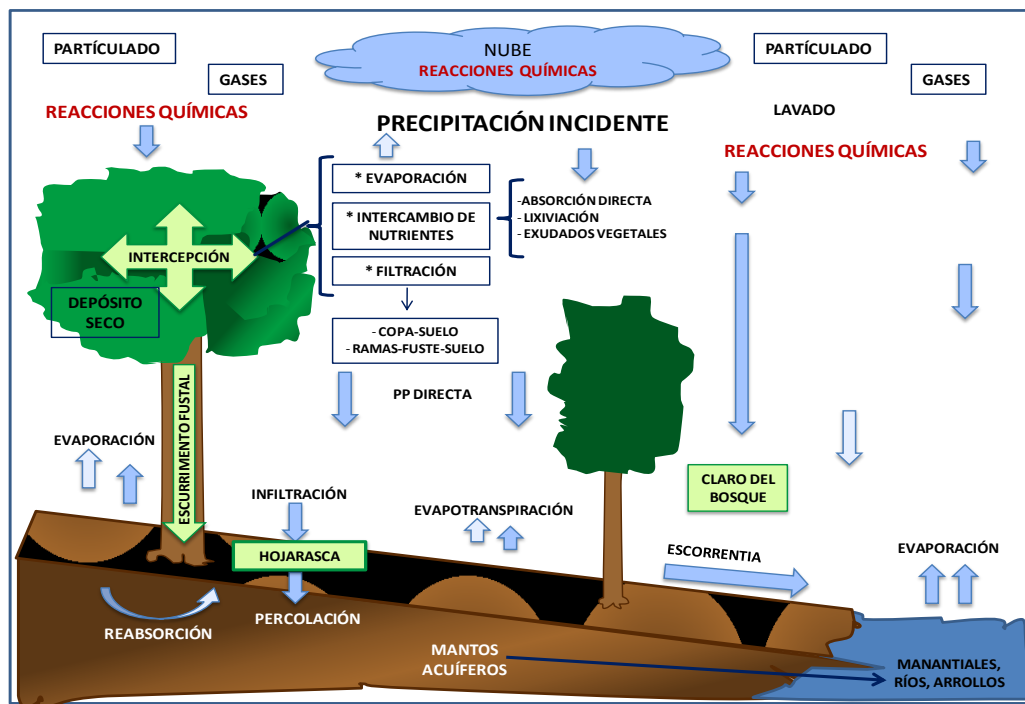


Figura 3. Componentes del ciclo hidrológico en un ecosistema forestal, y redistribución del agua de lluvia (Adaptado de Cárcamo, 2006).

Los factores que determinan la precipitación directa están relacionados con la magnitud y frecuencia de las precipitaciones y con las características del bosque que modifican la concentración y flujo de los solutos (Kyoung-Jin *et al.*, 2000; Dietz *et al.*, 2006; Farías *et al.*, 2007; Wuyts *et al.*, 2008).

### 3.2.1 Intercepción del dosel

Es la parte del volumen precipitado que queda atrapado en las hojas y tallos de la cobertura vegetal (Farías *et al.*, 2007). La lluvia al ser interceptada por la vegetación puede seguir las siguientes vías (Figura 3): almacenarse en la copa y parte de ella ser absorbida, evaporarse (pérdidas por intercepción) siendo devuelta a la atmósfera ó circular por las ramas hasta la base del tallo (escorrentía cortical) ó gotear desde la copa (flujo bajo la copa).

La humedad que cae a través de la corona del dosel (precipitación penetrante) es precisamente donde se da un intercambio de nutrimentos. La concentración y composición del flujo de la copa depende del depósito seco, lixiviación del dosel, exudados de la vegetación y actividad biológica (Spurr, 1982; Navar *et al.*, 2009).

Las características de la lluvia como intensidad, frecuencia, duración, dirección, ángulo y tamaño de la gota, influyen significativamente en el proceso de intercepción, se identifica una serie de elementos que participan en la capacidad de retención del dosel, como: la estructura del bosque, la composición florística, la arquitectura de las especies, el crecimiento de epífitas y líquenes, el estado fenológico y el estado sanitario (Farías *et al.*, 2007; Wuyts *et al.*, 2008).

Se han registrado valores de intercepción por especie arbórea entre 15 y 60% de la precipitación (Farías *et al.*, 2007), en bosques deciduos el flujo bajo la copa representó del 74.1-81.1% de la precipitación incidente (San José y Montes, 1992; Dietz *et al.*, 2006), Hubber e Iroumé, (2001) realizaron estudios en diferentes bosques donde la precipitación penetrante representó del 55-85%; por lo que el potencial de intercepción de una comunidad vegetal nos permite valorar su aporte en la regulación del ecosistema (Cárcamo, 2006).

### 3.2.2 Escurrimiento fustal

El escurrimiento fustal corresponde al agua que fluye por los troncos y que alcanza el suelo en forma directa (Spurr, 1982; Llorens y Domingo, 2007; Yan-Li *et al.*, 2009). Este llega al suelo en la base de los árboles, el agua es vertida como un embudo a la raíz del árbol donde puede filtrarse de forma preferencial. Representa una pequeña fracción de la precipitación total que incide en un área boscosa, pero su producción tiene influencia significativa en la generación de escorrentía, humedad del suelo y solución química del suelo (Llorens y Domingo, 2007; Xiao-Yan *et al.*, 2009).

Los valores de este escurrimiento generalmente son menores al 5% de la precipitación anual pero pueden llegar a representar hasta 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 Irouné, 2001), el valor medio máximo para regiones templadas es aproximadamente del 11.3% (Xiao-Yan *et al.*, 2009).

El escurrimiento fustal 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. Se estima que especies con cortezas lisas retienen menor cantidad de agua, que aquellas con cortezas rugosas (Cárcamo, 2006).

### 3.2.3 Flujo bajo la hojarasca

Finalmente, antes de que el flujo del agua de lluvia llegue a la capa superficial del suelo debe penetrar la hojarasca, la escorrentía cortical se infiltra por la interface mantillo-raíz-suelo hasta estratos más profundos. La infiltración se favorece cuando los suelos forestales se caracterizan por una buena cubierta de mantillo, formado por restos orgánicos de las plantas y los animales que se encuentran sobre la superficie del suelo o enterrado en el mismo suelo mineral.

La presencia de hojarasca tiene incidencia en la cantidad y calidad del flujo del agua y sobre la estructura del suelo; cuando el mantillo superficial es removido de los suelos de textura fina la energía de las gotas de lluvia destruye las estructuras superficiales del suelo, la infiltración del agua de lluvia es marcadamente baja (Spurr, 1982). La composición de la hojarasca dependerá de las especies orgánicas que constituyan el mantillo, densidad, y grado de descomposición (Kaspari *et al.*, 2008).

### 3.3 El agua de lluvia asociada a daños y perturbaciones dentro de los ecosistemas

**Importancia de la precipitación en los bosques.** 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 diferentes actividades humanas. Actualmente existen dos tendencias del efecto del depósito húmedo.

Se considera que provoca sobre los ecosistemas forestales efectos negativos y decaimiento del vigor del arbolado.

- Influencia sobre el suelo: El pH ácido da lugar a la toxicidad por Al y Fe, provocando disponibilidad limitada de Ca, Mg, Mo y P (Spurr, 1982; Egli, 1999).

Los ápices radicales y las raíces laterales se adelgazan, las ramificaciones finas y pelos radicales se reducen. A nivel celular se afecta la estructura y funcionamiento de la membrana, síntesis de DNA, mitosis y elongación celular (Ramírez *et al.*, 2002). Suelos con un pH menor a 5 tienden a mostrar una disminución en las actividades de la población microbiana, ya que las condiciones óptimas se presentan en un pH cercano a la neutralidad (Ramos y Zuñiga, 2008).

- Influencia sobre la vegetación: cuando el pH en la humedad atmosférica es menor a 3.5 se puede erosionar la cutícula y dañar el parénquima de las hojas e inactivar algunas enzimas y cloroplastos (Bini y Bresolin, 1998); los síntomas incluyen pérdida de hojas y ramas, necrosis foliar, clorosis y descortezamiento (Saavedra-Romero *et al.*, 2003). El SO<sub>2</sub> en las plantas interfiere con la formación y funcionamiento de la clorofila (Caselli, 1992).

Klumpp, *et al.*, (1997) reportan acumulación de elementos tóxicos como fluoruros y sulfuros en las hojas, además de que el daño depende de la especie. *Tibouchina pulcra* y *Miconia pyrifolia* son especies acumuladoras de Al; en tanto que *Cecropia glazioni* presentó valores altos de nitrógeno.

En otros estudios realizados en *Alternanthera philoxeroides* se demostró que con concentraciones moderadas de contaminantes ácidos (SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>) generados por plantas eléctricas se estimula el efecto de CO<sub>2</sub> en el crecimiento de la planta y acumulación de biomasa (Cheng-Yuan *et al.*, 2009).

- Influencia sobre los sistemas acuáticos: induce a cambios en la química del agua. Perjudica a las algas, macrofitas acuáticas, zooplancton, benton, y provoca disminución en la población de peces (Nebel y Wright, 2002).

Los bosques son ecosistemas sensibles y susceptibles a disturbios causados por influencia abiótica, biótica y también de origen antropogénico. El decline de los bosques está distribuido en diferentes sitios y con síntomas muy variables.

Los factores que han dañado a los árboles se presentan como: pérdida de nutrientes minerales por lixiviación a causa de lluvias ácidas, consumo insuficiente de nutrientes minerales del suelo, suministro insuficiente de agua, epidemias de bacterias y hongos, manejo inapropiado de los bosques, entre otros; que han contribuido al abatimiento de los bosques.

Por lo tanto la combinación del estrés climático, edáfico y biótico, mas los efectos de contaminación, dan como resultado complejos e incomprensibles síntomas, siendo todos responsables de la condición del bosque (Figura 4) (Larcher, 2003).

Sin embargo, los efectos de la precipitación ácida sobre el crecimiento y la composición de los bosques podrían no evidenciarse de inmediato, debido a la complejidad del ecosistema forestal (Spurr, 1982).

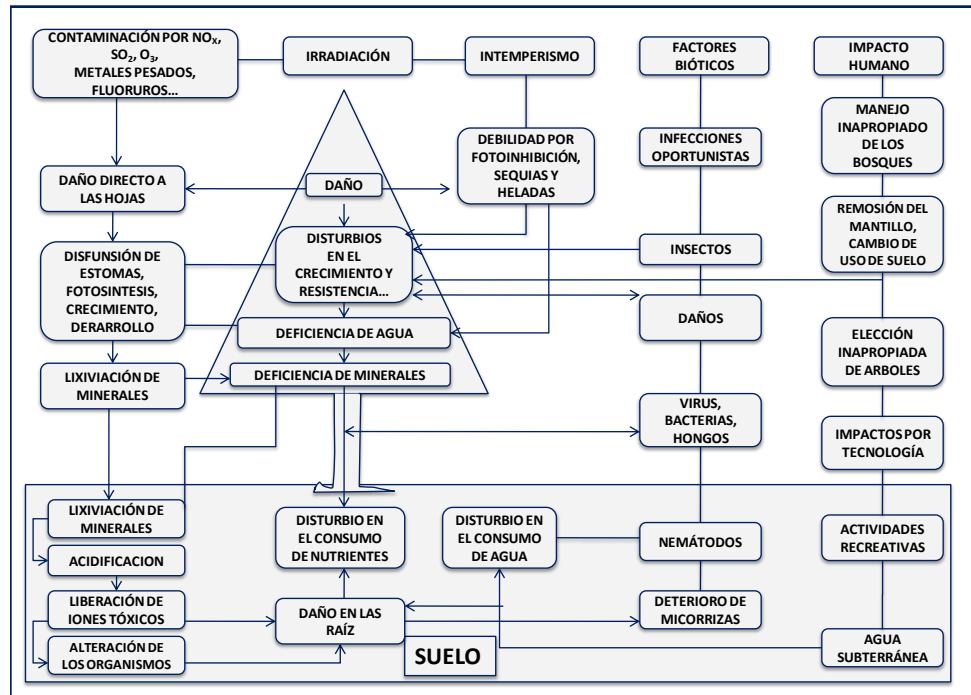


Figura 4. Posibles causas del declive forestal. La contaminación, irradiación e intemperismo causan daño sobre los sistemas forestales, al igual que las actividades humanas y otros factores bióticos y abióticos. Cada uno con incidencia sobre otro, de tal forma que todo el ecosistema se encuentra ligado y cuando alguno es perturbado se afecta a todo el bosque (Modificado de Larcher, 2003).

### 3.4 El agua de lluvia como fuente de nutrientes de los ecosistemas

Chadwick *et al.*, (1999) señalan que el origen de los nutrientes en el ecosistema inicialmente derivan de la roca que 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), además de ser un fertilizante para los 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).

Además los nutrimentos solubles llegan directamente al suelo y a la raíz, dando como resultado su potencial disponibilidad, mayor 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 elementos en áreas con deficiencia (Báez *et al.*, 1989).

### **3.5 La vegetación como purificador de la atmósfera y sistema autorregulador de su ambiente**

La vegetación posee los medios para regular alteraciones provocadas por los cambios en el suministro y disponibilidad de los nutrientes, siempre y cuando no se supere su capacidad de autorregulación. De hecho, el flujo caulinar y escurrimiento fustal son importantes vectores de nutrimentos o de contaminantes de la atmósfera al suelo; por ejemplo el flujo de N y S puede incrementarse del 30-50% (Bellot y Escarre, 1989; Bini y Bresolin, 1998; Navar *et al.*, 2009).

#### **Mecanismo de resistencia de las plantas al estrés.**

La mayoría de las plantas son capaces de moderar la toxicidad de diferentes elementos por varios procesos activos y pasivos. Algunas características y diseño de respuesta de las plantas proveen un medio de producción contra el estrés causado por SO<sub>2</sub> y NO<sub>x</sub>.

Los mecanismos específicos para evitar los efectos tóxicos y acidificación son factores químicos y bioquímicos naturales; donde se incluye una alta capacidad buffer, al incrementar el consumo de cationes alcalinos del suelo, uso del metabolismo como desintoxicación, nutrientes lixiviados por el follaje que incluyen principalmente: K, Ca y Mg (Larcher, 2003).



Los bosques son efectivos en limpiar y retener solutos atmosféricos, debido al área de superficie y resistencia aerodinámica; estos mecanismos permiten a los árboles desarrollarse en suelos pobres e incrementar con ello la sucesión de especies que requieren más nutrimentos (Andrade *et al.*, 1995; Moreno *et al.*, 2001).

Los nutrimentos que pasan a través del flujo de la copa, fuste y hojarasca, se encuentran disponibles directamente, sin la intervención de cualquier proceso de descomposición, por tanto se consideran importantes vías en el ciclado interno de los bosques (Dezzeo y Chacón, 2006).

Cuando el agua de lluvia atraviesa la cubierta forestal, su cantidad así como su composición química sufre alteraciones debidas principalmente a dos factores: a) El lavado de los elementos depositados en seco sobre el follaje y corteza; y b) por los cambios que se producen 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.

La cubierta vegetal puede ser considerada como un sistema de autorregulación; bajo condiciones limitadas la vegetación es capaz de minimizar la lixiviación de las hojas y ramas, ó tomar los nutrientes de la precipitación (Andrade *et al.*, 1995; Moreno *et al.*, 2001).

Un regulador de los contaminantes atmosféricos es la lluvia; la lluvia ácida es por lo tanto una consecuencia directa de los procesos de autolimpieza de la atmósfera (Herrera y Rodríguez, 2009; Sánchez *et al.*, 2009). Existe un equilibrio entre la precipitación que cae sobre los bosques y que es modificada durante una breve interacción con la superficie de la vegetación, la composición del flujo caulinar y escurrimiento del fuste está gobernada por la compleja interacción entre procesos atmosféricos, hidrológicos y bioquímicos (Moreno *et al.*, 2001).

#### 4. JUSTIFICACIÓN

En México los estudios sobre la composición química del agua de lluvia son escasos y en su mayoría se han realizado en áreas urbanas y/o industrializadas. La lluvia ha sido estudiada en períodos largos de recolección que van de semanas a meses; se ha analizado la precipitación pluvial en bosques de *Abies religiosa* en el sur de la Ciudad de México, donde los períodos de recolección fueron de dos meses (Saavedra-Romero *et al.*, 2002).

En el mismo año Velasco, considera la composición del agua de lluvia en los bosques del Poniente el valle de México con períodos de colecta de una semana.

Existen en México pocos estudios en zonas con menor grado de contaminación, como son áreas protegidas o de conservación y no se han considerados los efectos de la interacción de la lluvia con la superficie foliar, fuste y hojarasca; y su relación con los nutrientes foliares y de suelo.

Por lo anterior se considera importante realizar estudios sobre la composición del agua de lluvia en la precipitación libre y después de su interacción con el dosel, fuste y hojarasca, en zonas de conservación y llevando a cabo la recolección de muestras de forma inmediata o al día siguiente de la precipitación pluvial. Asimismo existen tendencias opuestas acerca del depósito húmedo, se ha hablado de sus efectos negativos y benéficos en los ecosistemas. Por ello es necesario conocer los cambios que tiene el agua de lluvia por su paso a través de la vegetación, para entender su dinámica.

## 5. HIPÓTESIS

La lluvia ácida se encuentra asociada a ambientes urbanos y zonas industriales, en los ecosistemas naturales en donde esta influencia es menor como los bosques templados húmedos, se espera que la precipitación sea menos ácida.

El agua de lluvia al ser interceptada y entrar en contacto con las diferentes estructuras de los árboles realizará un continuo intercambio de nutrientes y compuestos, que modificará su composición química y pH.

## 6. OBJETIVOS

### OBJETIVO GENERAL

Evaluar el efecto de la vegetación sobre la composición del agua de lluvia y su pH, en tres sitios diferentes: La Mojonera, Municipio de Zacualtipán; PN El Chico, Hidalgo y PN Izta-Popo, Estado de México.

### OBJETIVOS PARTICULARES

- Determinar el pH del agua de lluvia incidente en bosques templados húmedos.
- Determinar la variación del pH y la composición química (nitratos, fosfatos, sulfatos y cloruros) del agua de lluvia en su flujo a través del follaje, fuste y hojarasca de *Pinus leiophylla*, *Abies religiosa*, *Cupressus lusitanica*, *Fagus grandifolia* y *Pinus patula*.
- Comparar el comportamiento del agua de lluvia en diferentes fechas de muestreo en la localidad de la Mojonera, Zacualtipán, Hidalgo.
- Comparar el comportamiento del agua de lluvia en los bosques de *Abies* y *Pinus* de dos sitios diferentes.
- Determinar la relación entre la composición química del agua de lluvia con la concentración de nitrógeno, fósforo, calcio, magnesio, sodio y potasio del tejido vegetal y del suelo.

*Todo lo que viniera a tu mano por hacer,  
hazlo según tus fuerzas; porque en el sepulcro a donde tú vas;  
no hay obra, ni industria ni ciencia ni sabiduría. Ec.: 9.10*

## 7. MATERIALES Y MÉTODOS

### 7.1 Descripción de las áreas de estudio

Se eligieron sitios de muestreo en áreas boscosas alejadas de las zonas urbanas. Los bosques de coníferas representan uno de los principales tipos de vegetación, donde el bosque de pino (*Pinus*) es el de mayor importancia, seguido del bosque de oyamel (*Abies*) y de cedros (*Cupressus*). Un tipo de vegetación muy particular son los bosques de haya (*Fagus*), que se considera son de distribución boreal, y por ello representan un relicto de bosques fríos y muy húmedos.

La mayor parte del estado de México y de Hidalgo forman parte de la región del Pánuco que corresponde a la vertiente del Golfo de México y es considerada como una de las más importantes del país, tanto por su superficie, que la ubica en el cuarto lugar a nivel nacional, como por el volumen de sus escurrimientos, que le otorgan el quinto lugar (INEGI, 2002); por lo que se consideró trabajar en las ANP de esta cuenca: PN- IztaPopo, PN- El Chico y un Bosque de *Fagus grandifolia* var. *mexicana*, ubicado en la Mojonera, Zacualtipán, estado de Hidalgo.

### 7.2 Parque Nacional IztaPopo (PNIP)

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. Abarca una superficie de 25,679 hectáreas, un rango altitudinal que va de los 3600 a los 5452 msnm; presenta una precipitación media anual de 970.6 mm y temperatura media anual de 14.6 °C. Sus geoformas (sierra, conos volcánicos y laderas) son de origen volcánico, predominando rocas basálticas y andesíticas.

El PN es actualmente uno de los más importantes remanentes de bosques de coníferas y praderas de alta montaña en el centro del país, la vegetación está representada por los géneros *Pinus* y *Abies*. El género *Pinus* se encuentra a lo largo de todo el gradiente altitudinal, mientras que el *Abies* se localiza entre los 3000 y 3500 m. La importancia el parque radica en la extensión de bosques, más de 21,000 hectáreas de bosque conservado que representan 52.72% de la superficie total del parque.

Las unidades de suelo presentes en el área del parque son litosoles, regosoles, andosoles, cambisoles y fluvisoles; los suelos presentes en el parque están asociados con su origen volcánico. Es importante resaltar que los recursos hídricos que nacen en el PN son originados principalmente por el deshielo de los glaciares y la precipitación pluvial. (CONANP, 2008).

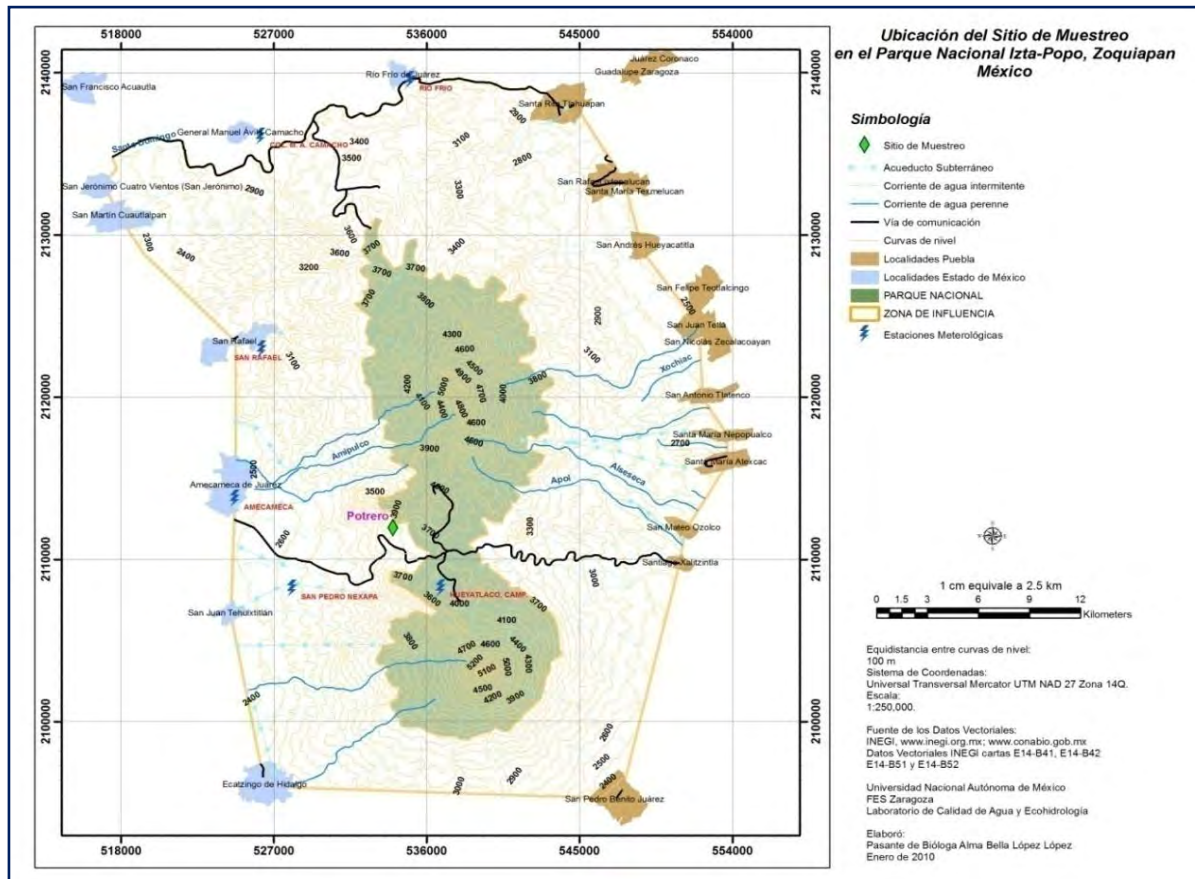


Figura 5. Mapa de ubicación del sitio de muestreo en el PNIP Fuente del Polígono del Parque Nacional: Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas. Realizado con el SIG ArcMap 9.2.

### 7.3 Parque Nacional El Chico (PNCH)

Se encuentra ubicado geográficamente entre los 20°10'10" y los 20° 13'25" latitud norte y los 98°41'50" y 98° 46'02" longitud este, con una superficie escarpada con altitudes entre 2320 y 3090 msnm.

Los suelos andosol húmico, ocríco y vítrico son derivados de cenizas volcánicas, en su mayoría húmicos por su alto contenido de materia orgánica. El clima es templado húmedo, con temperatura media anual entre los 12 y 18 °C, precipitación media anual de 1382 mm con lluvias en verano e influencia de monzón y neblinas frecuentes. La especie arbórea más representativa es el oyamel (*Abies religiosa*) en menor proporción encino (*Quercus sp.*), pino (*Pinus sp.*), cedro (*Cupressus sp.*) y tlaxcal (*Juniperus sp.*). Los motivos

que sustentaron la protección del área fue la presencia de 6 géneros de coníferas de los 9 representados en México; tales como *Abies*, *Cupressus*, *Juniperus*, *Pinus*, *Pseudotsuga* y *Taxus*.

El Parque recibe la influencia de dos grandes provincias bióticas (Neovolcánica y Sierra Madre Oriental). Por ello la vegetación del Parque es una de las más ricas al norte del Valle de México.

El predominio de las montañas condiciona el descenso de la presión atmosférica y la temperatura e influye en otras variables físico-químicas. La disposición de las montañas en el territorio de forma perpendicular al flujo predominante de los vientos cargados de humedad del Golfo de México, condiciona la formación de varios anillos o pisos altitudinales que van desde un piso inferior tropical cálido en las llanuras al norte y noreste del Estado hasta otro superior por encima de los 2900 m semifrío con heladas y nevadas estacionales en áreas de la Sierra de Pachuca, en las porciones norte y noreste, aunque los vientos húmedos del Golfo propician abundantes lluvias, ésta sierra y la de Pachuca actúan como barrera orográfica, debido a que los vientos descargan su humedad en las laderas norte y este de las mismas.

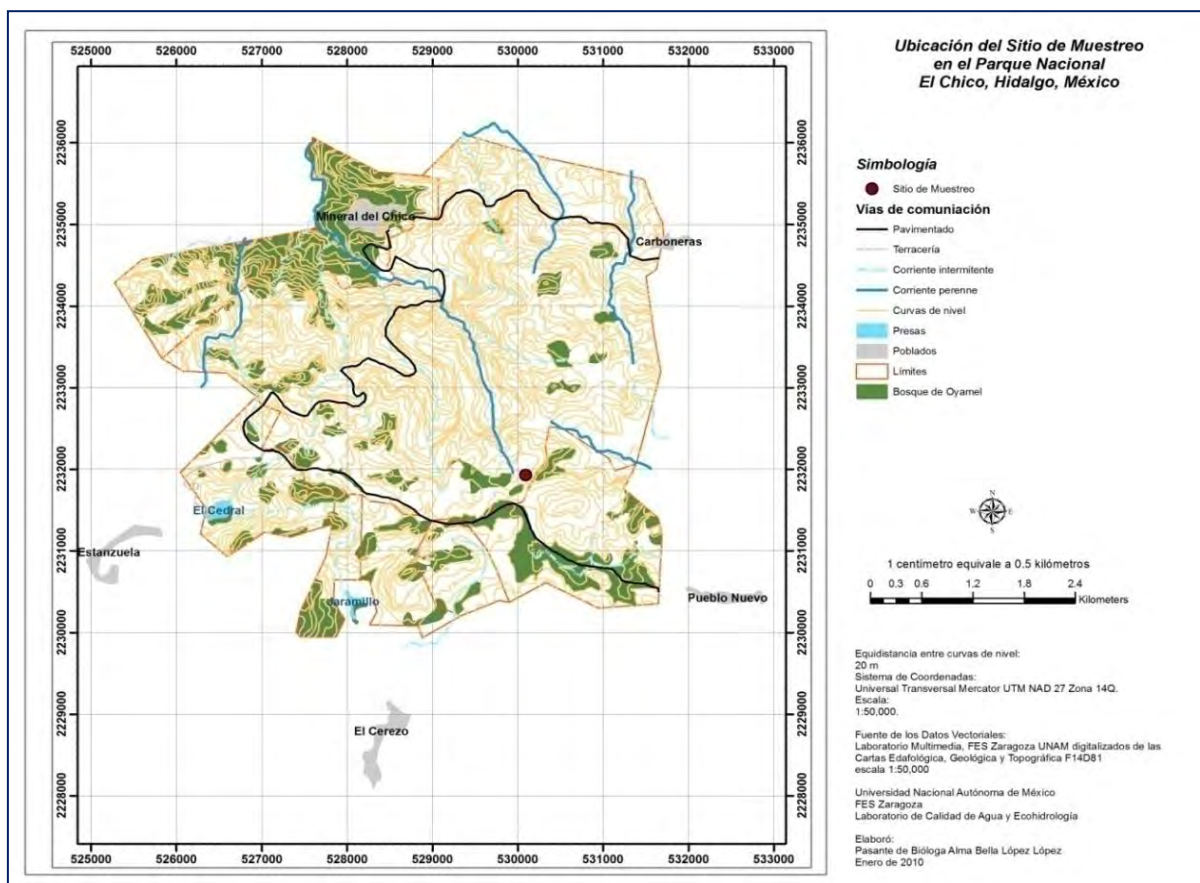


Figura 6. Mapa de ubicación del sitio de muestreo en el PNCH Fuente del Polígono del Parque Nacional: Laboratorio Multimedia, FES ZARAGOZA UNAM. Realizado con el SIG ArcMap 9.2.

## 7.4 Localidad de La Mojonera (MOJ)

Municipio de Zacualtípán (20°39'49"N, 98°39'17" O), en el estado de Hidalgo. La región se encuentra en la Sierra Madre Oriental y la Sierra de Zacualtípán. Posee relieve accidentado y pendientes mayores a 45°. La altitud varía de 1900 a 2000 msnm, el clima es C (fm) templado húmedo con lluvias todo el año con una precipitación media anual de 2047 mm (Servicio Meteorológico Nacional). Se encuentra una población de *Fagus grandifolia* con una superficie de 45 hectáreas, esta población es la de mayor extensión y mejor conservada en México (Willians-Linera *et al.*, 2003; Godínez, 2007).

El suelo de las partes bajas es feozem háplico con una capa superficial oscura, suave y rico en materia orgánica. En las pendientes más pronunciadas hay regosol calcárico con semejanza al material parental. Las rocas son tobas riolíticas con obsidiana. En las últimas tres décadas el manejo forestal se ha orientado a desarrollar rodales de *P. patula* (Salado *et al.*, 2009).

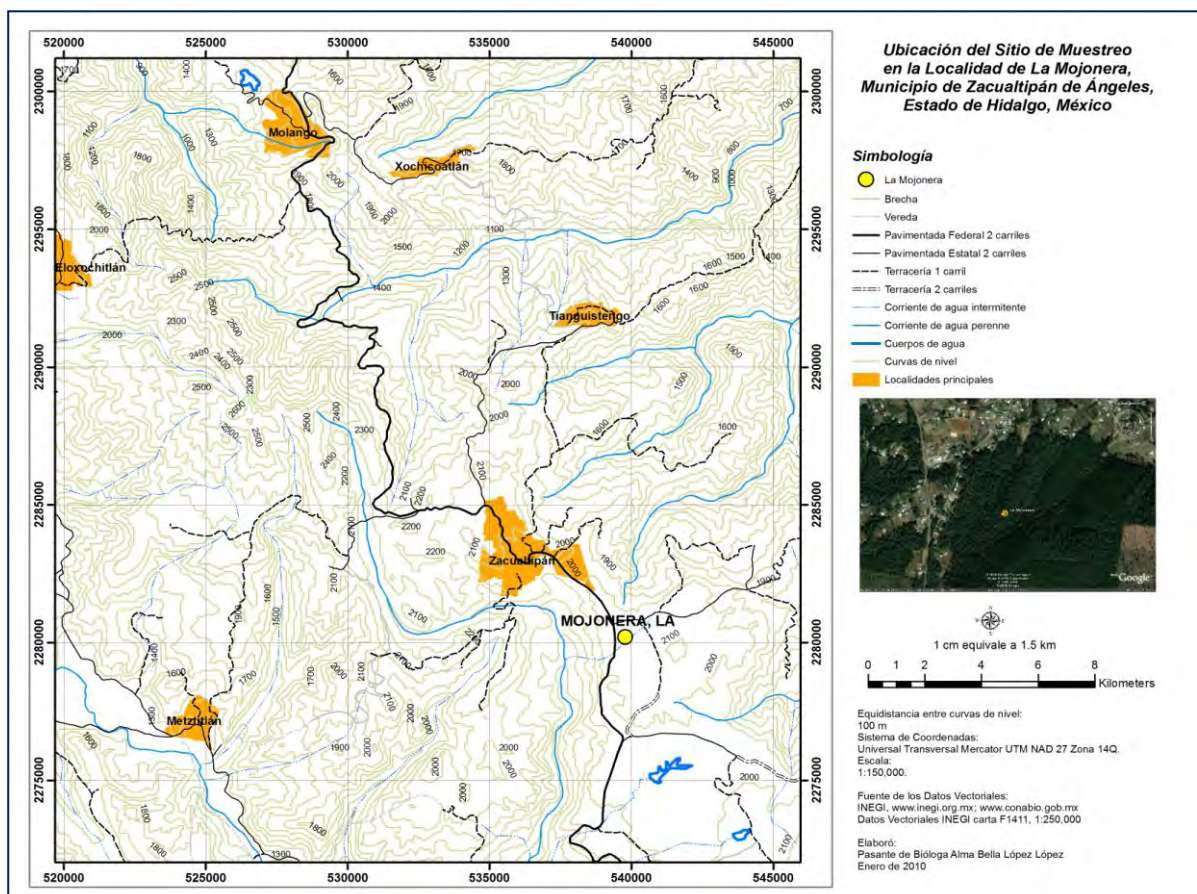


Figura 7. Mapa de ubicación del sitio de muestreo La Mojonera Zacualtípán Hidalgo. Realizado en SIG ArcMap 9.2.



## 7.5 Descripción de los bosques evaluados

Los ecosistemas forestales se caracterizan por poseer una gran biodiversidad, producción de biomasa, favorecer la calidad del suelo, mitigar el impacto de la erosión e inundaciones, formar parte del paisaje y áreas de recreación. Un bosque es una comunidad biológica en la que predominan los árboles y otra vegetación leñosa, siendo las coníferas la línea de evolución más antigua desde el Paleozoico (Spurr, 1982).

En México, la compleja topografía ha permitido el desarrollo de diversas comunidades. Los bosques de pino y encino albergan un número mayor de especies, se estima que existen aproximadamente 7,000 especies diferentes de plantas en estos bosques, que representan un 24% de todas las especies de plantas de México.

### Bosques de *Abies religiosa* (H.B.K.) Cham & Schlecht

Los bosques de *Abies* se distribuyen desde los 21°N en México hasta los 14°N en Guatemala. Su distribución altitudinal varía entre 2400 y 3000 msnm, con precipitaciones anuales de 1000-1400 mm y temperaturas promedio de 10-16 °C. Se encuentran en rodales puros y a veces se asocia con especies de los géneros *Quercus* y *Pinus*.



Figura 8. Bosque de *Abies religiosa* en el PN-El Chico.  
Foto: Alma Bella López López.

Es un árbol monoico con alturas de 35-50 metros y diámetro de 100-180cm; fuste recto, cónico, con ramas extendidas o ligeramente ascendentes y verticiladas; copa densa, cónica. Corteza grisácea, áspera, color café-rojizo, grisácea, agrietada dividida en placas irregulares. Hojas simples, alternadas, de 20-30mm de largo y 1-1.5 de ancho, dispuestas en espiral, lineares, ápice: agudo y córneo, con una hendidura longitudinal en la cara superior que se desvanece en el ápice y una cresta saliente en la inferior; haz oscuro y envés verde claro (Rzedowski, 1978).



Figura 9. Hoja de *Abies religiosa*. Foto: Alma Bella López López.  
Fuente de la imagen: [www.conafor.gob.mx](http://www.conafor.gob.mx)

### Bosque de *Pinus* spp

Los pinares se pueden localizar entre 2350 y 4000 m de altitud. Se trata de varias asociaciones vegetales distintas en las que prevalecen especies diferentes del género *Pinus*, prosperan en lugares con precipitación de 700 y 1200 mm anuales, crecen en suelos profundos o someros. Árboles siempre verdes, más o menos resinosos, de altura variable desde 1-50m, corteza lisa y delgada en los jóvenes, gruesa y rugosa en los adultos.



Figura 10. Bosque de *Pinus leiophylla* en el PN-IztaPopo (izquierda) y Bosque de *Pinus patula* en la MOJ (derecha). Fotos: Alma Bella López López.

*Pinus patula* Schlecht. & Cham. Ocurre de manera natural en los estados de Querétaro, Hidalgo, México, Puebla y Veracruz. Estos árboles pueden alcanzar de 20 a 40 m de altura, se distingue su corteza papirácea, escamosa y de color rojizo en la parte superior del tallo y ramas, conos serótinicos y persistentes (Rzedowski, 1978).



Figura 11. Hoja de *Pinus leiophylla* arriba y hoja de *Pinus patula* abajo.  
Fotos: Alma Bella López López, Fuente de la imagen: [digitalgallery.nypl.org](http://digitalgallery.nypl.org).

*Pinus leiophylla* Schlecht. & Cham. Árbol de 5-15 m de alto y 30 cm. de diámetro, copa redondeada o piramidal. Fuste corto y el follaje ralo, corteza delgada cuando joven y adulto, gruesa, áspera y rugosa. Con retoños en el tronco y a veces en ramas primarias. Copa irregular y algo rala, las ramillas erguidas cenicientas y con superficie casi lisa, con sus brácteas caedizas, hojas en fascículos de 5, aglomeradas en la extremidad de la ramilla; de 8 a 13 cm. de largo. Pino endémico de México y se distribuye desde los 1,600 a 3,000m, con mayor frecuencia de 2,200 a 2,750m (Rzedowski, 1978).

### **Bosque de *Cupressus lusitanica* Mill. (*C. lindleyi* Klotzsch)**

Se encuentra desde el sur de México entre los 15 y 25°N, a altitudes de entre 2200 y 3300m. Región climática subhúmeda, habita en sitios donde la temperatura promedio anual es superior a los 12 °C y la precipitación anual entre 1,000 y 3,000 mm. Crece en una amplia gama de condiciones ambientales, laderas húmedas de cerros, arroyos, barrancas y huertos familiares (Rzedowski, 1978).

Árbol monoico siempre verde, resinoso y aromático, puede alcanzar hasta 40 m de altura y más de 100cm de diámetro. El fuste tiende a ser recto, ligeramente acanalado en

la base y con fuerte dominancia apical. La corteza por lo regular es delgada de 5-15mm de grosor, con grietas longitudinales de color café rojizo y gris oscura.



Figura 12. Bosque de *Cupressus lusitanica* en el PN El Chico. Foto: Alma Bella López López.

Las hojas son escamiformes, color café oscuro, ovadas, de 1 a 2 mm de largo, situados en la extremidades de las ramitas, copa cónica y sombra densa. Las flores masculinas se encuentran en amentos pardo-amarillos de 2-5 mm de largo, situados en las extremidades de las ramitas. Las flores femeninas presentan una inflorescencia globosa formada por escamas gruesas. La madera es de color amarillo rojizo con tintes anaranjados, presentando anillos visibles (Rzedowski, 1978).



Figura 13. Hoja de *Cupressus lusitanica*. Foto: Alma Bella López López.  
Fuente de la imagen: [www.conafor.gob.mx](http://www.conafor.gob.mx)

### **Bosque de *Fagus grandifolia* var. Mexicana**

También conocido como haya, es un sobreviviente de las glaciaciones del Pleistoceno, que migro del Norte de América a la Sierra Madre Oriental. Se había sugerido que el taxón estaba restringido a 10 poblaciones de 2 a 35 ha, sin embargo estudios recientes

indican que la población de haya presente en México se limita a 7 sitios en los estados de Hidalgo, Veracruz y Tamaulipas (Willian-Linera *et al.*, 2003).



Figura 14. *Fagus grandifolia* en la Mojonera, Zacualtipán Hgo. Foto: Alma Bella López López.

*Fagus grandifolia* var. *Mexicana* es el género de *Fagus* más representativo en el sureste del país y crece en montes amplios en una mezcla de hojas perenes y caducas en bosques de niebla. Donde la precipitación es mayor a 1000 mm por año. En México, *Fagus* se ha encontrado como especie mono-dominante y co-dominante, a menudo con especies de *Quercus* y comúnmente bajo especies de *Magnolia* y *Podocarpus* (Willian-Linera *et al.*, 2003).



Figura 15. Hoja de *Fagus grandifolia*.  
Foto: Alma Bella López López. Fuente de la imagen: [www.dcnr.state.pa.us](http://www.dcnr.state.pa.us)

La haya varia de 16-23m de altura, dosel simétrico, corona densa de forma ovalada piramidal, follaje alternado, hojas simples de forma oblonga con margen aserrado, venación pinada, hojas caducas de color verde. Florece en primavera, fruto de cubierta seca y dura color marrón, ramas orientadas horizontalmente de diámetro pequeño.

## 7.6 Fase de campo

### 7.6.1 Toma de muestras de agua de lluvia y escurrimientos superficiales

Se ubicaron dos bosques por zona de estudio y se buscaron áreas con claro dentro de los mismos, los cuales fueron considerados como testigo. Se consideraron las siguientes especies:

En el PNIP: *Pinus leiophylla* y *Abies religiosa*.

En el PNCH: *Abies religiosa* y *Cupressus lusitanica*.

En la MOJ: *Fagus grandifolia* y *Pinus patula*.

Para coleccionar el agua de lluvia se colocaron recipientes de plástico en los siguientes lugares:

CB=Claros de bosque (Testigo)

FO=bajo el follaje de los árboles

FU=escurrimiento fustal

HOJ=bajo hojarasca.



Figura 16. Flujo del agua de lluvia y muestras de agua colectadas. Fotos: Alma Bella López López.

En cada zona, se eligieron aleatoriamente a cuatro individuos arbóreos y se colocó en cada árbol tres recipientes de plástico: bajo la copa, en la base del fuste y bajo la hojarasca; además de 4 recipientes en los CB para coleccionar el agua de lluvia incidente de acuerdo al siguiente procedimiento (Figura 16):

- Flujo bajo las hojas de los árboles: se instalaron cuatro colectores bajo la copa de los árboles sostenidos por hilo de nylon, de tal forma que el escurrimiento de las hojas se dirigió hacia al recipiente, a lo que se denomina flujo del follaje (FF) (Figura 16b).
- Escurrimiento fustal (EF): para recolectar el agua de la lluvia que fluye por el fuste y que alcanza la superficie edáfica, se ubicaron colectores alrededor de la corteza de los mismos árboles elegidos para el flujo del follaje. Dichos colectores consistieron en mangueras de plástico previamente cortadas a la mitad; posteriormente se colocaron alrededor del tronco, formando un canal que conduce el escurrimiento al colector ubicado al pie del árbol (Figura 16c)
- Bajo la hojarasca: mediante una pala se removió cuidadosamente la hojarasca de la base del árbol y se colocó un recipiente cubierto con malla para evitar que además del agua se acumulen restos vegetales, materia orgánica u organismos pequeños (Figura 16d).
- Claros del Bosque (CB): finalmente se dispuso de recipientes al azar en áreas abiertas dentro del bosque, para coleccionar el agua de la precipitación incidente (Figura 16e).

Posterior a la colecta del agua, *in situ* se midió pH, conductividad eléctrica (CE), sólidos totales disueltos (STD) con un potenciómetro digital de campo (conductronic PC18). En los sitios donde fue posible se tomaron muestras de agua de ríos, manantiales, escurrimientos rocosos y filtración a través del suelo (Figura 16f y Figura 17); en las cuales se registraron los mismos parámetros que para el agua de lluvia. Las muestras de agua fueron conservadas de acuerdo a las técnicas citadas en el APHA (1992) y se transportaron a una temperatura de 4 °C para su posterior análisis en el laboratorio.

Cada sitio fue georreferenciado mediante un GPS (Sistema de Posicionamiento Global) Garmin Vista en unidades UTM NAD 27.

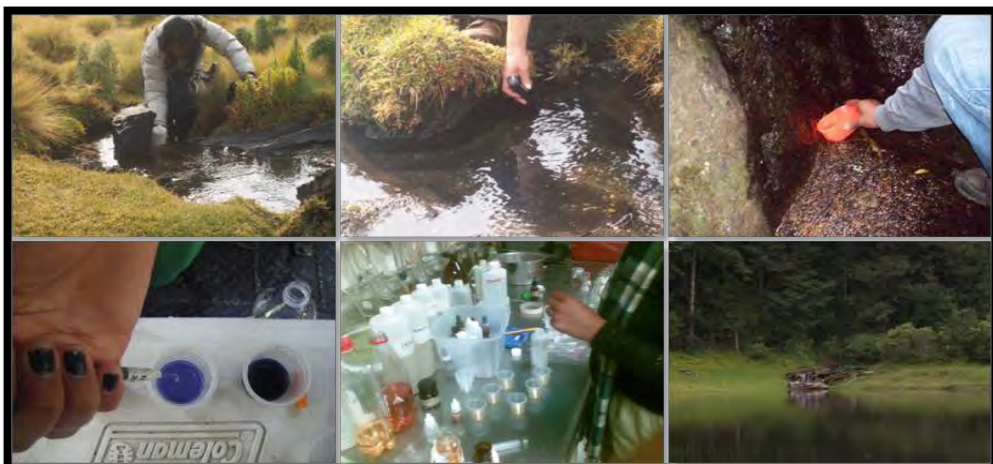


Figura 17. Muestreo y análisis del agua colectada en campo. Fotos: Alma Bella López López.

### 7.6.2 Toma de muestras de suelo y tejido vegetal

Se tomaron muestras de suelo en cada uno de los sitios visitados, para ello primero se removió la hojarasca y vegetación presente mediante una pala, con la que posteriormente se recolectó suelo de los primeros 10 cm y se depositó en bolsas de plástico de cierre hermético.

Para el análisis foliar se recolectaron 3 muestras de cada una de las especies arbóreas y se guardaron en bolsas de papel. En ambos casos las muestras se etiquetaron con el nombre del sitio, fecha y especie según el caso, posteriormente fueron transportadas para su tratamiento y análisis en el laboratorio.



Figura 18. Toma de muestras de suelo y tejido foliar.  
Fotos: Alma Bella López López.

## 7.7 Fase de laboratorio

### 7.7.1 Análisis químico del agua

Se determinó la concentración de Nitratos, Sulfatos (Método turbidimétrico) (APHA, 1992), (Método fenol-disulfónico) y Ortofosfatos NMX-AA-029-SCFI-2001 (Método de fosfomolibdato). Se realizaron tres replicas por muestra de agua de lluvia siempre que el volumen colectado fue suficiente. Al agua recolectada de los sistemas acuáticos se le realizó el mismo procedimiento.



Figura 19. Tratamiento de las muestras de agua en el laboratorio. Fotos Alma Bella López López.

### 7.7.2 Análisis químico del suelo y tejido foliar

En el laboratorio las muestras de tejido foliar se secaron en la estufa marca Felisa a una temperatura de 75 °C, hasta que las muestras alcanzaron el peso constante, se molieron y tamizaron en molino marca Thomas Scientific, con malla del # 20, posteriormente las muestras se guardaron en frascos de plástico con los datos de fecha de colecta, localidad, sitio y género. El tejido vegetal molido se utilizó para cuantificar nitrógeno total por el



método semimicro-kjeldahl modificado para incluir nitratos (Bremmer, 1965), fósforo por el método vanadomolibdico (Allan, 1971); calcio y magnesio se determinaron por absorción atómica, sodio y potasio por emisión atómica.

Las muestras de suelo se secaron al aire en un lugar libre de contaminantes, una vez secas, se tamizaron con malla de 2 mm de abertura y se guardaron en frascos. Se determino el pH activo relación 2:1 con agua y pH potencial relación 2:1 con KCl 1N (Jackson, 1982). Y se cuantificó nitrógeno total por el método semimicro-kjeldahl modificado para incluir nitratos (Bremmer, 1965); fósforo por el método Bray y Kurtz (Bray y Kurtz, 1945); calcio y magnesio se determinaron por absorción atómica, sodio y potasio por emisión atómica.



Figura 20. Tratamiento en el laboratorio de las muestras de tejido foliar y suelo. Fotos: Alma Bella López López.

## 7.8 Análisis de datos

Se creó una base con los datos de agua, tejido foliar y suelo, así como la revisión bibliográfica para complementar el escrito y la discusión de los resultados. El análisis estadístico se realizó en STATGRAPHICS Centurion XV.II, se utilizó el análisis de varianza de una vía con el propósito de establecer si existen diferencias entre la precipitación incidente y el escurrimiento del follaje fuste y hojarasca con un nivel de significancia de  $\alpha=0.05$ , y mediante la comparación de medias a través de la prueba de Fisher.

Además de comparar el comportamiento de la precipitación en diferentes bosques del mismo sitio, se confrontó la misma especie en dos lugares distintos y se determinó la posible correlación entre los diferentes parámetros medidos en el agua de lluvia. Finalmente se establecieron las posibles relaciones entre los datos obtenidos del agua de lluvia con el estado nutrimental del follaje y del suelo.

Mediante la creación de un esquema de los diferentes depósitos y flujos del agua en el bosque, se integraron los cambios de pH que tienen lugar en el flujo del agua de lluvia, con el propósito de dar una visión general de la neutralización de pH en los sistemas naturales.

*Pregunta ahora a las bestias que ellas te responderán,  
las aves del cielo ellas te mostrarán,  
habla a la Tierra que ella te enseñará. Job 12: 7 y 8.*

## 8. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 8.1 Evaluación del agua de lluvia en los claros de bosque (CB)

*Conductividad eléctrica, sólidos totales disueltos y pH.*

De acuerdo a los valores de pH registrados en los tres sitios de estudio, no se encontraron diferencias significativas, aún 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 (Figura 21 A, Cuadro 1).

Cuadro 1. Caracterización de los sitios de estudio y valores promedio para el agua de lluvia en los CB.

|   | PNIP                   | PNCH            | MOJ                          |
|---|------------------------|-----------------|------------------------------|
| ALTITUD (msnm)                            | 3167                   | 2889            | 2045                         |
| SUELO                                     | Andosol húmico         | Andosol húmico, | Andosol vítrico y húmico     |
| ROCA                                      | Basáltica y andesítica | Ígnea extrusiva | Toba riolítica con obsidiana |
| P (mm)                                    | 1134                   | 1382            | 2050                         |
| T media (°C)                              | 8,8                    | 14              | 13,5                         |
| pH  | 4,51                   | 5,69            | 4,68                         |
| CE ( $\mu\text{S m}^{-1}$ )               | 35                     | 11              | 13,5                         |
| STD ( $\text{mg L}^{-1}$ )                | 16,66                  | 5               | 5,58                         |
| $\text{NO}_3^-$ ( $\text{mg L}^{-1}$ )    | 0,048                  | ND              | 0,13                         |
| $\text{SO}_4^{2-}$ ( $\text{mg L}^{-1}$ ) | 0,234                  | 0,33            | 11,03                        |
| $\text{PO}_4^{3-}$ ( $\text{mg L}^{-1}$ ) | 0,339                  | 0,11            | 0,34                         |

ND=No determinado

Con los datos de pH de estos dos últimos lugares se demuestra que la precipitación ácida no es exclusiva de áreas industrializadas, y que también se puede encontrar en áreas sujetas a conservación. Estos datos coinciden con lo reportado por Bini y Bresolin (1998), dado que hayan un valor promedio de pH de 5.2 en el agua de lluvia dentro de la reserva de Cansiglio en Italia; mientras que en el Parque Nacional Canaima en Venezuela se han registrado valores en el intervalo de 5.09 a 5.49 (Sanhuenza *et al.*, 2005). Por otro lado, Velasco *et al.*, (2002) en un estudio realizado en los bosques del Valle de México muestran valores de pH diferentes en el agua de lluvia incidente: 4.72 para Chapa de Mota, 4.91 en el Desierto de los Leones y 5.87 en la UAM-Iztapalapa.

La química del agua de lluvia en estas zonas se ve afectada por factores globales como: tormentas, ciclones, depresiones y patrones de distribución de vientos. Al respecto

Law (2010), señala que el efecto de las corrientes atmosféricas provoca que contaminantes como el ozono en Norteamérica procedan de Asia. Celle-jeaton *et al.*, (2009) encontraron en una isla del mediterráneo variaciones en el pH de la lluvia incidente (media de pH<4.5); asocian que el pH de la precipitación del este de Europa está ligado a la circulación oceánica del Atlántico Norte, frentes polares, vientos del desierto del Sahara y aire húmedo del Mediterráneo. El pH de la lluvia es perturbado principalmente por la incorporación de gases y aerosoles dentro de la nube, es decir, durante su formación y movimiento (Anatolaki y Tsitouridou, 2009).

Mediante una comparación múltiple de medias de Fisher (Cuadro 2) se halló que el pH de la precipitación de la MOJ-1 presento mayor grado de acidez (pH= 4.1) con respecto al PNCH (pH= 5.69).

Cuadro 2. Diferencia mínima significativa (LSD) de Fisher.

|               | pH         | CE         | STD        |
|---------------|------------|------------|------------|
| Contraste     | Diferencia | Diferencia | Diferencia |
| MOJ-1 - MOJ-2 | -0,75      | -10,33     | -5,0       |
| MOJ-1 - PNCH  | -1,57      | -24,0      | -12,0      |
| MOJ-1 - PNIP  | -0,40      | -33,0      | -15,66     |
| MOJ-2 - PNCH  | -0,81      | -13,66     | -7,0       |
| MOJ-2 - PNIP  | 0,35       | -22,66     | -10,66     |
| PNCH - PNIP   | 1,16       | -9,0       | -3,666     |

Sombreado gris indica diferencia significativa (P<0.05).

Estas consideraciones coinciden con lo encontrado en el análisis estadístico, puesto que revela que existen diferencias significativas para la CE y los STD entre el PNIP y la MOJ1 (Figura 21 B y C, Cuadro 2). La primera zona registró los valores más altos para estas variables y los menores por sitio para pH (Cuadro 1), esto como consecuencia de la presencia de partículas originadas de las emanaciones continuas del volcán (Pérez-Suárez *et al.*, 2008) y otros compuestos atmosféricos que en conjunto acidifican el agua de lluvia.

#### *Sulfatos, Fosfatos y Nitratos.*

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  $\text{PO}_4^{3-}$ . No se detectaron diferencias significativas (P>0.05) para  $\text{PO}_4^{3-}$  y  $\text{NO}_3^-$  (Figura 21 D y F); indicando que su concentración es similar en los tres sitios de estudio y su manifestación es local. Sanhuenza *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 PN Canaima; siendo los ácidos orgánicos de origen biogénico los responsables en un 51%.del pH ácido. Por tanto se infiere que existen otros compuestos ácidos diferentes a los óxidos de nitrógeno y de azufre que dan lugar a la disminución del pH.

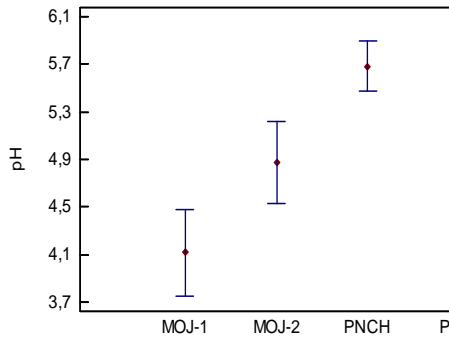
La concentración de sulfatos fue mayor en la MOJ con respecto a los demás sitios ( $P < 0.05$ ) (Figura 21 E), este incremento se repite en los dos períodos de muestreo. Por tanto la mayor concentración de sulfatos explica la acidez del agua de lluvia en la localidad.

En los bosques de niebla existe una mayor acumulación de vapor de agua, mismo que tiene una fuerte interacción con los aerosoles de azufre, lo que se refleja en el aumento del anión, que en este estado de oxidación se encuentra formando parte de las gotas de agua como núcleo. Silva *et al.*, (2009) indicaron que los sulfatos son la fracción que explica la mayor parte de actividad de los núcleos de condensación de la nube.

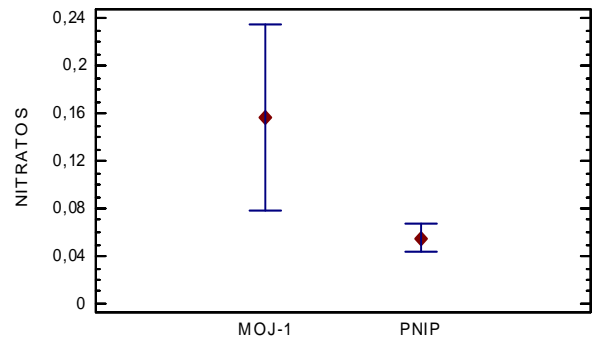
Esta es la única variable que presentó diferencias significativas, lo que se atribuye a fuentes locales del Estado de Hidalgo. La concentración de contaminantes atmosféricos en el Estado debidas a las actividades de transporte, industriales y domésticas generan  $20,686 \text{ t año}^{-1}$  de partículas menores a 10 micrómetros y  $6,646 \text{ t año}^{-1}$  de  $\text{SO}_2$  (SMA, 2008). Otra fuente continúa es el aporte de partículas a la atmósfera como consecuencia de la extracción de metales asociados a sulfuros en la zona minera de Molango situada a 20 Km. de La Mojonera (Cabrera *et al.*, 2003).

La concentración promedio de sulfatos de  $11.03 \text{ mg L}^{-1}$  en la Mojonera está por encima de la cantidad mencionada por Padilla *et al.*, (2007) con respecto a las costas de Guerrero, donde la media es de  $0.80 \pm 0.59 \text{ mg L}^{-1}$ . Por otro lado Báez *et al.*, (1989) utilizaron el mismo método que en el presente trabajo para la determinación de sulfatos y mencionaron un intervalo de  $1.88\text{-}24.4 \text{ mg L}^{-1}$  en la precipitación del estado de Guanajuato, y al NW de la cuenca amazónica del Brasil la concentración de este anión varía  $1.69$  a  $0.126 \text{ mg L}^{-1}$  (Silva *et al.*, 2009).

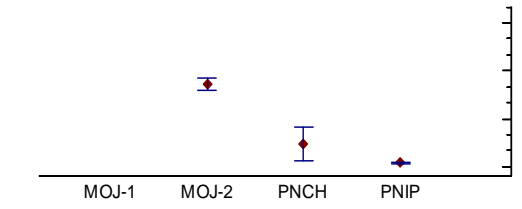
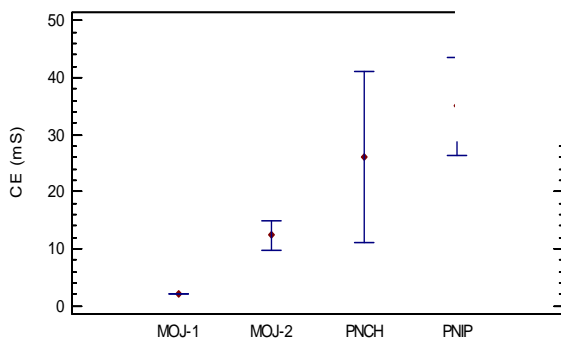
### A. pH



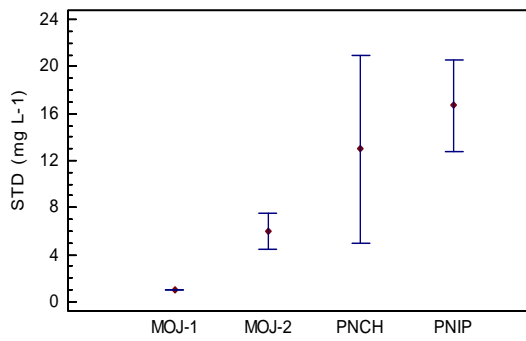
### D. Nitratos



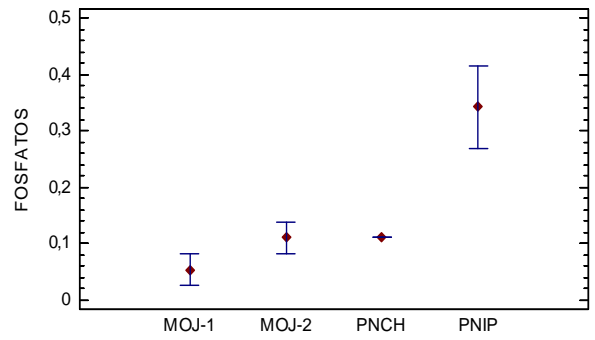
### B. Conductividad eléctrica



### C. Sólidos totales disueltos



### r. Fosfatos



## 8.2 Evaluación en el Parque Nacional IztaPopo

### 8.2.1 Variación química del agua de lluvia en el flujo del follaje, fuste y hojarasca de *Pinus leiophylla* y *Abies religiosa*

Conductividad eléctrica, sólidos totales disueltos y pH.

El agua de lluvia cuando es interceptada por el dosel modifica su pH de manera variable y significativa (Figura 22). Tanto en *P. leiophylla* como *A. religiosa* el pH del agua depositada en el follaje disminuye en comparación al CB, de 4.51 a 4.072 y de 4.51 a 3.72 respectivamente.



Figura 22. Diagrama de la variación del pH del agua de lluvia en el PNIP.

Este comportamiento se debe a la acumulación de partículas ácidas del depósito seco en las hojas. 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 W que contribuyen con el depósito seco en el sitio de estudio (Figura 5) (Delgado *et al.*, 2005). En este sentido Wyers y Duyzer (1997) mencionan que el depósito seco en bosques de Netherlands contribuye del 10 al 20% del total de depósito atmosférico que es potencialmente ácido.

El valor de pH más bajo encontrado en *A. religiosa* se explica por el índice del área de la hoja (LAI) y el follaje, que son mayores que en *P. leiophylla*; lo cual representa mayor área expuesta y captura de contaminantes ácidos del aire. Esto es reforzado por Pérez-

Suárez *et al.*, (2008) quienes indicaron el LAI de *A. religiosa* es de 2 a 5.6 veces mayor que el LAI de *Pinus hartwegii*.

El agua de lluvia no manifestó cambios significativos del follaje al fuste, sino hasta llegar a la hojarasca; donde el pH se incrementó a 5.12 en *Pinus* y 5.58 en *Abies* ( $P < 0.05$ ). Bajo la hojarasca se manifestó la presencia de iones alcalinos provenientes del lavado de las rocas y del arrastre de partículas del suelo que atenúan el pH ácido

Se encontró alta correlación (0.65) con una significancia de 0.03 de la CE y los STD con respecto al pH, se corroboró que la hojarasca modifica la composición del flujo del agua de lluvia, ya que se incrementó la concentración de solutos ( $P < 0.05$ ), por lo que se favorece la disminución de los  $H^+$ . En la Figura 23 B y C se observa como en la interacción con *A. religiosa* el aumento de la concentración de partículas disueltas al recorrer las estructuras arbóreas es mucho más evidente que en *Pinus*.

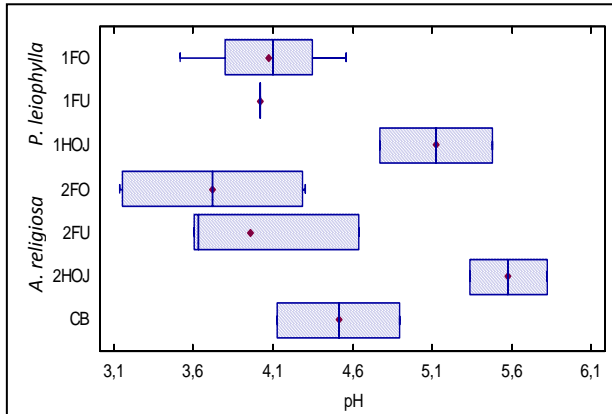
#### *Sulfatos Fosfatos y Nitratos.*

Estadísticamente no se presentaron diferencias significativas en ningún caso de nitratos y sulfatos; no obstante, al comparar el testigo (CB) con el contenido de solutos de los demás flujos, se observó un ligero aumento de nitratos y sulfatos en el fuste del bosque de oyamel (Figura 23 D y E), lo cual explicó que el pH disminuyó del follaje al fuste. Existen antecedentes que hablan del aprovechamiento de nutrientes ó iones que son depositados en las estructuras arbóreas de forma diferente en cada especie. En el follaje *P. leiophylla* existe un ligero consumo de N en forma de nitratos, no así en *A. religiosa* (Figura 23 D). Estos resultados se ajustan a los requerimientos nutrimentales de este pino, que manifiesta bajo contenido de nitrógeno (SEMARNAT, 2000).

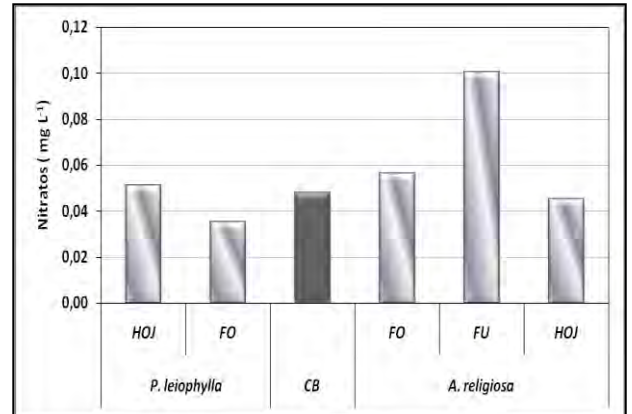
Los sulfatos son requeridos por las dos especies; a diferencia de los fosfatos que aumentaron en *P. leiophylla* y disminuyeron en *A. religiosa* (Figura 23 F), lo cual nos indica que a pesar de ser el mismo sitio de muestreo, cada especie tiene requerimientos nutrimentales diferentes y dependiendo de ello tomará o no los iones disueltos en el agua de lluvia. En el estudio realizado PN-Zoquiapan se encontró consumo de  $SO_4^{2-}$  en *P. hartwegii*. Estos datos difieren a lo encontrado en el PN Desierto de los Leones, donde no hubo consumo de este anión (Pérez-Suárez *et al.*, 2008); por tanto la lluvia actúa como fertilizante dependiendo de las características y de los requerimientos nutrimentales de la especie.

Por otra parte Moreno *et al.*, (1998) reportan una concentración menor de  $NH_4^+$  y  $H^+$  bajo el follaje que en los claros del bosque, los nitratos solo se presentan en el escurrimiento fustal y el fósforo es ligeramente mayor en ambos escurrimientos. En la hojarasca hay importante acumulación de fosfatos tanto en *P. leiophylla* ( $P < 0.05$ ) como en *A. religiosa*, sin embargo no es un factor que influya en el descenso del pH.

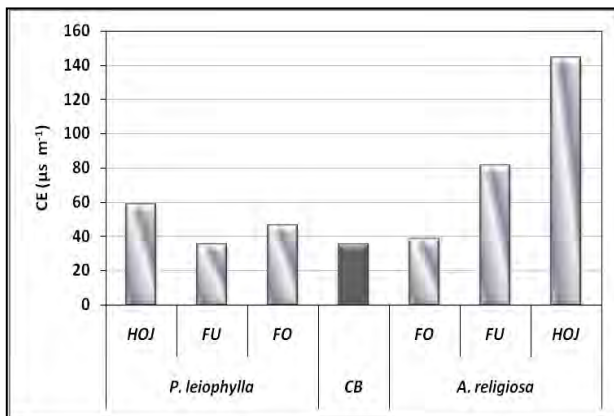
**A. pH**



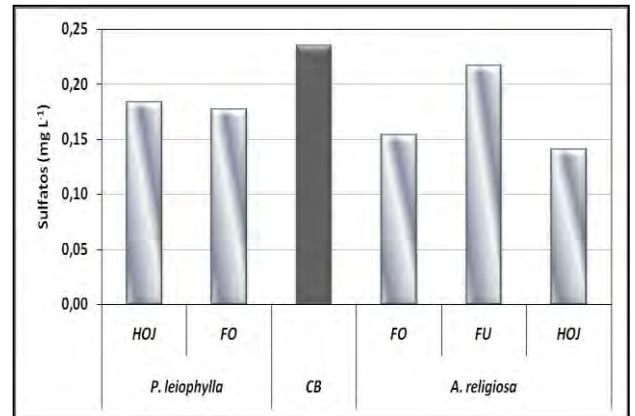
**D. Nitratos**



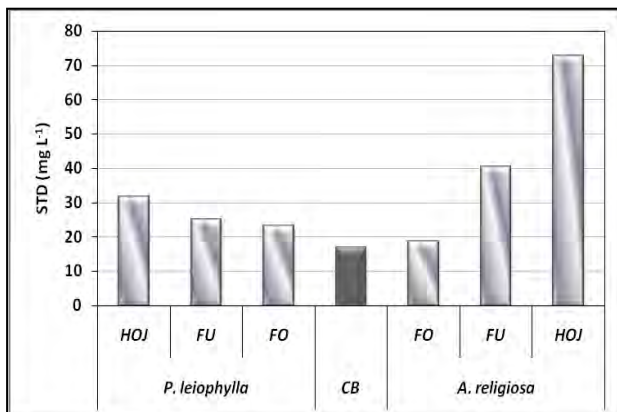
**B. Conductividad eléctrica**



**E. Sulfatos**



**C. Sólidos totales disueltos**



**F. Fosfatos**

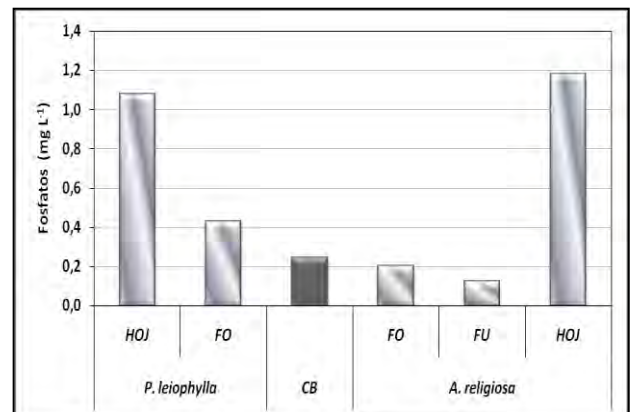


Figura 23. Variación de pH, conductividad eléctrica, sólidos totales disueltos y nutrientes del agua de lluvia al pasar por la cubierta forestal en el PNIP (FO= follaje, FU=fuste y HOJ= hojarasca).



### 8.2.2 Relación de los nutrientes del agua de lluvia, suelo y tejido foliar

En los Cuadros 3 y 4 se muestran los porcentajes de los elementos evaluados en el tejido foliar, pH y la concentración de N, P, Mg, K y Ca del suelo tanto en *A. religiosa* como en *P. leiophylla*. Con el fin de relacionar a los iones disueltos en el agua de lluvia con el contenido nutrimental de follaje y suelo, se tomaron como referencia los intervalos de concentración foliar y de suelo utilizados en el PNIP (Cuadros 5 y 6).

Cuadro 3. Nutrientes del tejido foliar de *P. leiophylla* y *A. religiosa*.

|                      | NUTRIENTES FOLIARES |                  |                  |                |          |         |
|----------------------|---------------------|------------------|------------------|----------------|----------|---------|
|                      | Ca <sup>++</sup>    | Mg <sup>++</sup> | *Na <sup>+</sup> | K <sup>+</sup> | N        | P       |
|                      | %                   |                  |                  |                |          |         |
| <i>P. leiophylla</i> | 0.615 a             | 0.529 a          | 0.280            | 0.705 s        | 0.428 mb | 0.267 a |
| <i>A. religiosa</i>  | 2.425 a             | 0.209 a          | 1.125            | 0.964 s        | 1.597 s  | 0.282 a |

mb= muy bajo, b= bajo, s= suficiente, a= alto. Intervalos propuestos por García (2003). \*Sin referencia.

Cuadro 4. pH y nutrientes del suelo bajo *P. leiophylla* y *A. religiosa*.

|                      | pH y NUTRIENTES DEL SUELO |      |                       |                  |                  |                |                     |        |
|----------------------|---------------------------|------|-----------------------|------------------|------------------|----------------|---------------------|--------|
|                      | pH                        |      | Ca <sup>++</sup>      | Mg <sup>++</sup> | *Na <sup>+</sup> | K <sup>+</sup> | N                   | P      |
|                      | H <sub>2</sub> O          | KCl  | Cmol kg <sup>-1</sup> |                  |                  | %              | mg Kg <sup>-1</sup> |        |
| <i>P. leiophylla</i> | 5.42                      | 4.72 | 1.58 b                | 0.72             | 0.41             | 0.17 b         | 0.060               | 123.38 |
| <i>A. religiosa</i>  | 6.92                      | 5.30 | SD                    | 0.80             | 0.28             | 0.16           | 0.149b              | 70.68  |

SD= sin determinar.

Cuadro 5. Intervalos de calidad del suelo propuestos para el PN Zoquiapan y Anexas. Valderrábano, 2005.

| Variable                    | Calidad del Suelo |                |        |
|-----------------------------|-------------------|----------------|--------|
|                             | Baja              | Media          | Alta   |
| pH activo                   | ≤5.88             | >5.88 a 6.16   | >6.16  |
| pH potencial                | ≤4.91             | >4.91 a 4.98   | >4.98  |
| N total (%)                 | ≤0.18             | >0.18 a 0.4    | >0.4   |
| Ca (cmol kg <sup>-1</sup> ) | ≤12.03            | >12.03 a 34.09 | >34.09 |
| K (cmol kg <sup>-1</sup> )  | ≤0.46             | >0.46 a 2.9    | >2.9   |

Cuadro 6. Intervalos de estadio nutrimental propuestos para *Pinus* y *A. religiosa* del PN IztaPopo. García, 2003.

| Elemento | <i>Pinus</i>      |             |             |              | <i>Abies religiosa</i> |            |                |                |
|----------|-------------------|-------------|-------------|--------------|------------------------|------------|----------------|----------------|
|          | Nivel Nutrimental |             |             |              | Nivel Nutrimental      |            |                |                |
|          | Muy Bajo          | Bajo        | Suficiente  | Alto         | Bajo                   | Suficiente | Alto           | %              |
| P        | ≤0.06             | >0.06-0.09  | >0.09-0.13  | >0.13-0.262  | P                      | ≤0.093     | >0.093 a 0.203 | >0.203 a 0.262 |
| N        | ≤0.8              | >0.8-1.2    | >1.2-1.5    | >1.5-2.2     | N                      | ≤1.340     | >1.340 a 1.583 | >1.583 a 2.033 |
| Ca       | ≤ 0.02            | >0.02-0.05  | >0.05-0.091 | >0.091-0.562 | Ca                     | ≤0.283     | >0.283 a 0.720 | >0.720 a 1.673 |
| K        | ≤ 0.3             | >0.3-0.5    | >0.5-1.20   | >1.20-2.80   | K                      | ≤1.044     | >1.044 a 2.489 | >2.489 a 2.791 |
| Mg       | ≤ 0.05            | > 0.05-0.09 | > 0.09-0.20 | > 0.20-1.145 | Mg                     | ≤0.112     | >0.112 a 0.965 | >0.965 a 1.291 |

***P. leiophylla***. El pH activo del suelo bajo la cubierta de *P. leiophylla* se encontró en un intervalo moderadamente ácido, en el cual aún hay disponibilidad de nutrientes. La absorción de N es adecuada en un intervalo de pH activo de 6.5-7.5 (Pritchett, 1991); por otra parte Valderrábano (2005) propone un intervalo de calidad de suelos para el Parque Nacional Zoquiapan y Anexas basado en el análisis de componentes principales (ACP) y de otros estudios realizados en el PNIP (García, 2003).

Tomando en cuenta el pH, los suelos analizados en este estudio se ubican en un nivel de baja calidad ( $\leq 5.88$  pH activo y  $\leq 4.91$  pH potencial). Los resultados de los nutrientes foliares ubicaron a esta especie con valores de suficiente y altos, de acuerdo a los intervalos de concentración nutrimental para el género *Pinus* dados por García 2003 (Cuadro 5).

El nitrógeno foliar presentó baja concentración (0.428) (Cuadro 3); por lo tanto, el N contenido en el agua de lluvia constituye un aporte inmediato de  $\text{NO}_3^-$  para el follaje de *P. leiophylla*. En consecuencia su incorporación al suelo no es evidente, por lo que se piensa que este elemento queda retenido en el follaje de *P. leiophylla*. Lo anterior sustenta la baja concentración de N en el suelo (0.06), corroborando el requerimiento de este elemento por la especie.

***A. religiosa***. El contenido nutrimental de esta especie se encontró con niveles altos y de suficiencia; anteriormente se mostró que esta especie solo retiene sulfatos, debido a que no se realizó la determinación de este ión en suelo o follaje para ningún caso, no fue posible realizar el análisis de dicho elemento; sin embargo, no existen intervalos de azufre que indiquen el estado nutrimental de las especies arbóreas (Baltazar, 2009). El P incrementó en tejido foliar y suelo, lo que coincide con encontrado en el flujo bajo de la hojarasca, donde hubo un aumento de  $\text{PO}_4^{3-}$ .

Con respecto a Ca y Mg, como se sabe, son los principales cationes que amortiguan el pH ácido de la lluvia (Spurr, 1982; Saavedra-Romero *et al.*, 2003) Los resultados mostraron un alto contenido foliar de estos elementos que atenúan la acidez de la precipitación y que al llegar al suelo explican el pH cercano a la neutralidad (6.92) en el sitio con *A. religiosa*.

### 8.3 Evaluación en el Parque Nacional El Chico

#### 8.3.1 Variación química del agua de lluvia en el flujo del follaje, fuste y hojarasca de *Abies religiosa* y *Cupressus lusitanica*

*Conductividad eléctrica, sólidos totales disueltos y pH.*

Se encontró que el agua de lluvia incidente tuvo un promedio de pH de  $5.69 \pm 0.281$ , mismo que es modificado por la copa de forma significativa en cada especie (Figura 24).

En *A. religiosa* el pH se redujo hasta 5.44, mientras que en *C. lusitanica* aumentó a 6.74. En este parque no se presentó precipitación ácida, los STD y la CE no tuvieron influencia sobre el pH. La fisionomía de cada especie podría explicar estas diferencias.

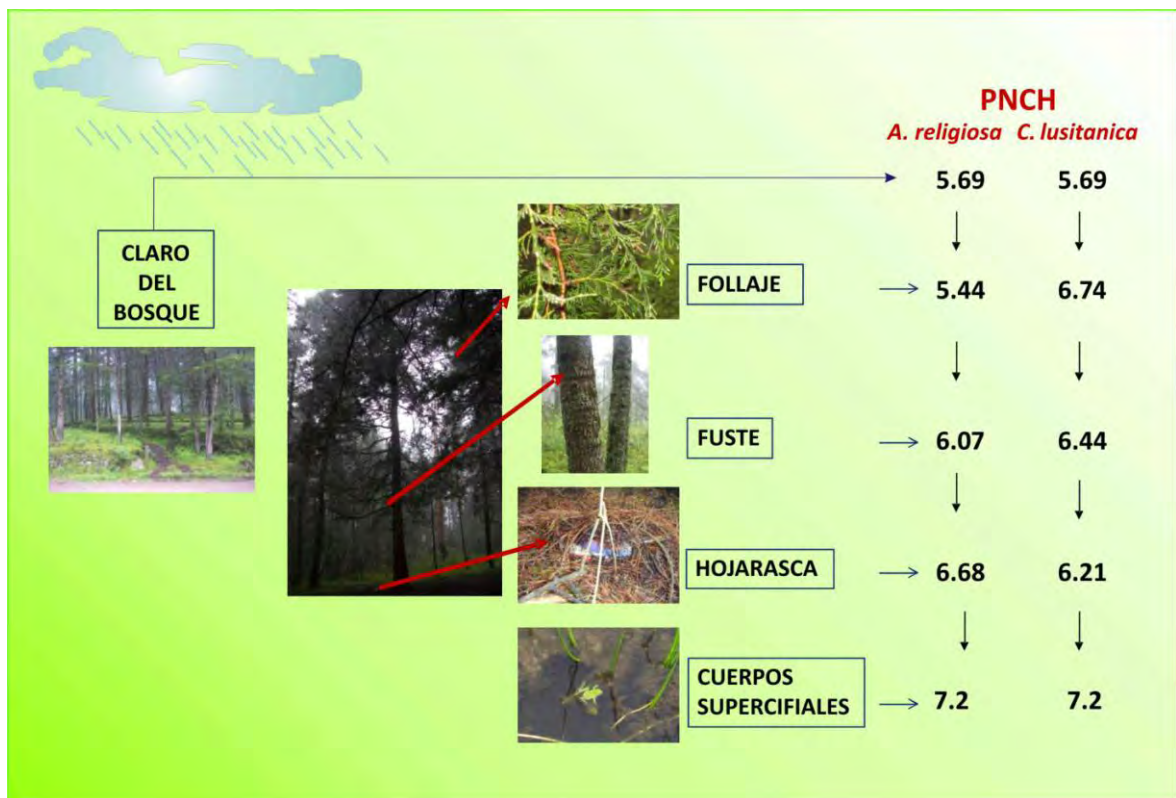


Figura 24. Diagrama de la variación del pH del agua de lluvia en el PNCH.

Las hojas escumiformes de *C. lusitanica* son más pequeñas e imbricadas, por lo que forman cavidades adecuadas para el depósito seco. El pH en el follaje de *A. religiosa* no varió significativamente con respecto al obtenido en el CB, a diferencia de *C. lusitanica* quien incrementó el pH del agua de la lluvia ( $P < 0.05$ ). La capacidad amortiguadora que posee ésta especie, permite asegurar que *C. lusitanica* atenúa la acidez del depósito atmosférico. Resultados similares obtuvieron Calva-Vázquez *et al.*, (2006) en corteza de *Cupressus*, por lo que esta especie podría ser utilizada como una opción para reforestar.

El descenso de la concentración  $H^+$  corresponde a que en el parque existe mayor acumulación en la atmósfera de aerosoles de tipo alcalino, que se refleja en el amortiguamiento del pH del agua de lluvia por parte de la vegetación. Estos resultados coinciden con los reportados por Saavedra-Romero *et al.*, (2002) quienes indican que el depósito seco de origen alcalino sobre la superficie foliar de *A. religiosa* puede elevar el pH; con una menor concentración de protones de  $2.30 \mu\text{eq}$  de  $H^+$ .

La fisionomía de las hojas de *C. lusitanica* le confiere mayor concentración de solutos bajo su follaje y con ello el aumento de pH. En *A. religiosa* se observó descenso del pH (5.44) en la copa, éste cambió significativamente en el fuste (6.07) y en la hojarasca (6.68) (Figura 25 A).

A pesar de que el pH en los CB no fue ácido estas especies arbóreas disminuyen la concentración de  $H^+$ ; de tal forma que cuando la lluvia alcanza la superficie del suelo va enriquecida con solutos incorporados de la atmósfera, copa y fuste. Por lo que estas especies tienen un efecto significativo en el amortiguamiento de la acidez, permitiendo la formación de un pH menos ácido en la superficie del suelo.

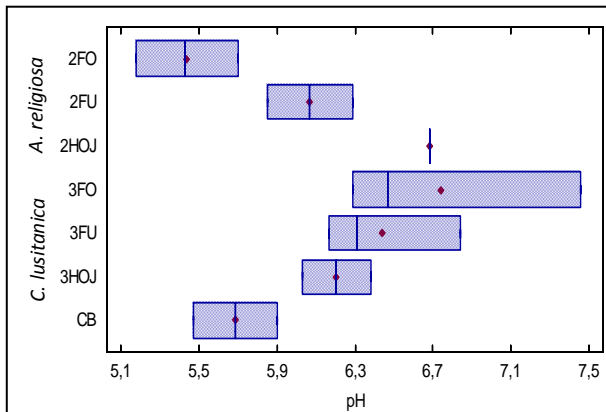
Al seguir el comportamiento de la CE y los STD (Figura 25 B y C) con el pH, éstos presentaron la misma tendencia. En el FO de *C. lusitanica* hay mayor cantidad de sales provenientes del depósito seco que está formado principalmente de K, Mg, Na y Ca. El fuste y la hojarasca de *Abies* muestran mayor concentración de sales ( $P < 0.05$ ), reflejo del incremento del pH y que es corroborado por la correlación de Pearson (0.93,  $P < 0.05$ ).

#### *Sulfatos y Fosfatos.*

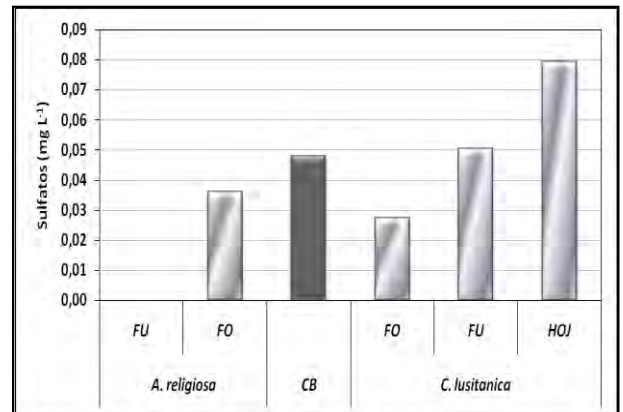
El consumo de  $\text{SO}_4^{2-}$  y  $\text{PO}_4^{-3}$  a través de las hojas de los árboles, señaló al agua de lluvia como fuente de nutrimentos disponibles y a los bosques como sistemas vivos autorreguladores de su entorno. Se presentó menor concentración de  $\text{PO}_4^{-3}$  en el follaje de oyamel, los  $\text{SO}_4^{2-}$  son retenidos por el follaje de *C. lusitanica* con un valor de  $P < 0.05$  y en el fuste disminuyeron significativamente la cantidad de  $\text{PO}_4^{-3}$  pero se incrementaron los  $\text{SO}_4^{2-}$ ; por tanto, en este sitio la especie que mayormente modifica la composición del agua de lluvia fue *C. lusitanica*.

Como consecuencia del flujo proveniente del fuste en *C. lusitanica* la hojarasca fue enriquecida por sulfatos, en tanto que en *A. religiosa* se incrementaron los  $\text{PO}_4^{-3}$ . Pese al incremento de estos aniones el agua de lluvia alcanza valores de pH adecuados.

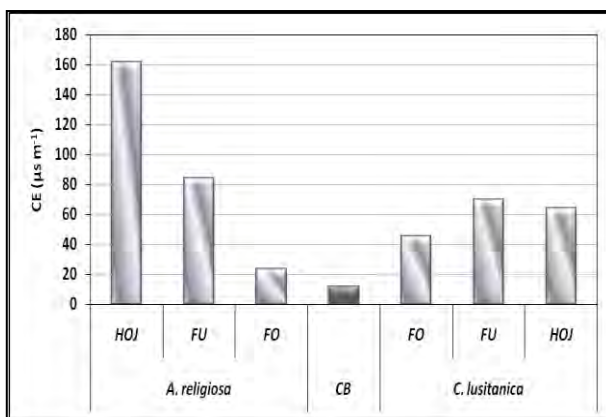
**A. pH**



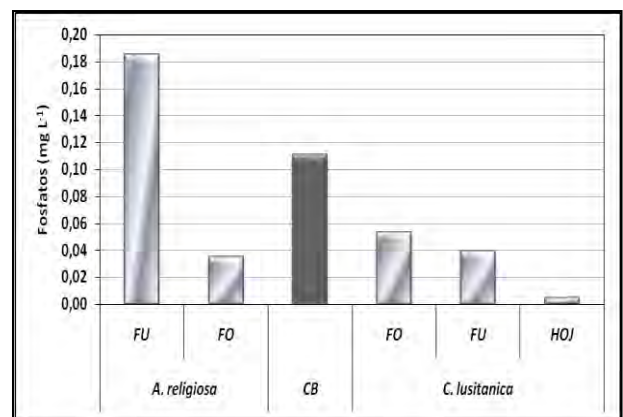
**D. Sulfatos**



**B. Conductividad eléctrica**



**E. Fosfatos**



**C. Sólidos totales disueltos**

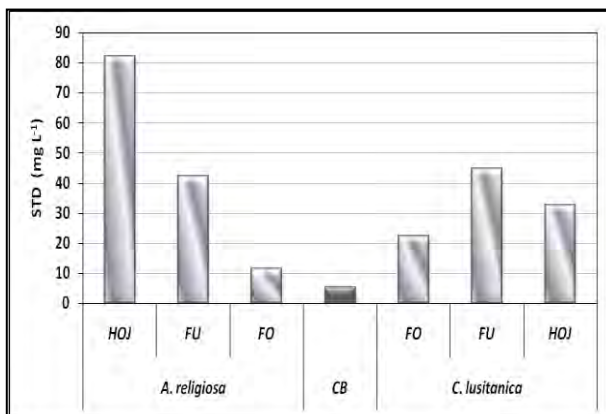


Figura 25. Variación de pH, conductividad eléctrica, sólidos totales disueltos y nutrientes del agua de lluvia al pasar por la cubierta forestal en el PNCH (FO= follaje, FU= fuste y HOJ= hojarasca).

### 8.3.2 Relación de los nutrimentos del agua de lluvia, suelo y tejido foliar

Los niveles de concentración de nutrimentos en el follaje y suelo permiten establecer la relación que existe en el ciclaje de los elementos, y con ello, predecir el comportamiento del agua de lluvia en el ecosistema, para entender si funciona como fuente de minerales que perjudican o nutren a los sistemas forestales, o bien, si la vegetación ejerce control sobre el agua de lluvia como autorregulador.

En los Cuadros 7 y 8 se muestran las concentraciones de nutrimentos de tejido foliar y suelo. De acuerdo con la NOM-021-RECNAT-2000, el valor de pH en este sitio se clasificó como moderadamente ácido; a pesar de ello, este valor es normal para suelos forestales (Spurr, 1982).

De acuerdo a los porcentajes de los elementos medidos, van de suficiente a altos. En *C. lusitanica* hubo mayor efecto en la neutralización del pH de la precipitación incidente. Sólo el nitrógeno foliar fue bajo, la cantidad de nitratos encontrada tampoco fue significativa en los CB, lo cual indica baja concentración de este elemento en el PNCH, mismo que induce a pensar que para este sitio los óxidos de nitrógeno solubilizados en el agua de lluvia son adecuados para el arbolado. Sin embargo el poco volumen de agua de muestra dificultó evaluar a los nitratos en el flujo del follaje, fuste y hojarasca tanto en *Abies* como en *Cupressus*.

Cuadro 7. Nutrimentos del tejido foliar de *A. religiosa* y *C. lusitanica*.

|                      | NUTRIENTES FOLIARES |                  |                  |                |        |        |
|----------------------|---------------------|------------------|------------------|----------------|--------|--------|
|                      | Ca <sup>++</sup>    | Mg <sup>++</sup> | *Na <sup>+</sup> | K <sup>+</sup> | N      | P      |
|                      | %                   |                  |                  |                |        |        |
| <i>A. religiosa</i>  | 0.979a              | 0.455a           | 0.284            | 0.728s         | 1.099b | 0.943b |
| <i>C. lusitanica</i> | 2.001a              | 0.610a           | 0.287            | 0.778s         | 0.192a | 0.431a |

mb= muy bajo, b= bajo, s= suficiente, a= alto. Intervalos propuestos por García (2003). \*Sin referencia.

Cuadro 8. pH y nutrimentos del suelo bajo *A. religiosa* y *C. lusitanica*.

| pH y NUTRIENTES DEL SUELO |      |                       |                  |                 |                |      |                     |
|---------------------------|------|-----------------------|------------------|-----------------|----------------|------|---------------------|
| pH                        |      | Ca <sup>++</sup>      | Mg <sup>++</sup> | Na <sup>+</sup> | K <sup>+</sup> | N    | P                   |
| H <sub>2</sub> O          | KCl  | Cmol kg <sup>-1</sup> |                  |                 |                | %    | mg Kg <sup>-1</sup> |
| 5.84                      | 5.05 | 4.52                  | 2.21             | 0.14            | 0.76           | 0.61 | 69                  |

El contenido de calcio y magnesio fue alto en el follaje pero en la solución del suelo fue bajo para el primer mineral y de clase media para el segundo, probablemente estos cationes son solubilizados por la precipitación o se encuentren inmovilizados en la materia orgánica del suelo, microorganismos, ó incluso, son tomado por la vegetación del estrato herbáceo y rasante.

## 8.4 Localidad de la Mojonera

### 8.4.1 Variación química del agua de lluvia en el flujo del follaje, fuste y hojarasca de *Fagus grandifolia* y *Pinus patula*

*Conductividad eléctrica, sólidos totales disueltos y pH.*

Con respecto al pH en el follaje de *P. patula* no se presentó una variación considerable, dado que cambio de 4.68 a 4.76. El fuste y en mayor medida la hojarasca incrementaron significativamente la cantidad de iones hidronio, por lo que el suelo se acidificó (FU= 4.67 y HOJ= 3.17) (Figura 26). En los bosques de coníferas el follaje es de descomposición lenta por la composición química de sus hojas, lo que genera la acumulación de humus y acidificación del suelo (Berger *et al.*, 2008). Las hojas y el mantillo tienden a tener menor contenido de bases, liberan ácidos que disuelven y contribuyen a la lixiviación de minerales y en consecuencia disminuye el pH (Pritchett, 1991).

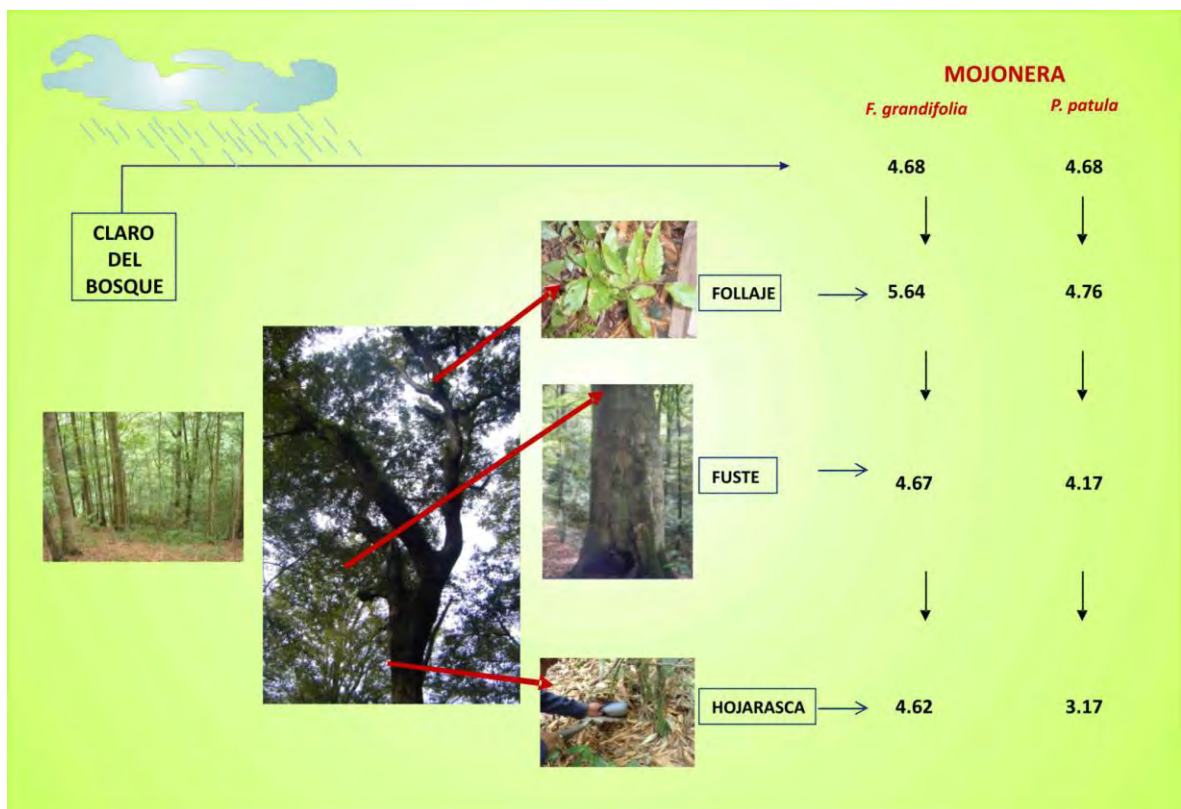


Figura 26 Diagrama de la variación del pH del agua de lluvia en la MOJ.

Los resultados obtenidos coinciden con un estudio enfocado al depósito húmedo en el follaje de tres especies: *Quercus robur*, *Betula pendula* y *Pinus nigra*, se encontró que de las tres especies *P. nigra* tuvo mayor depósito de iones potencialmente acidificantes, por lo que suponen que convertir plantaciones de pino en bosques de roble y abedul podría mitigar la acidificación del suelo (Wuys *et al.*, 2008). En la zona de estudio el bosque mesófilo de montaña se está sustituyendo por pino, dado que los resultados mostraron acidificación del agua de lluvia y con lo anteriormente mencionado, se induce que esta práctica podría traer serios problemas de acidez al suelo.

En la Figura 26 se observa un incremento evidente del pH del agua de lluvia de 4.68 a 5.64 al pasar bajo el follaje de *F. grandifolia*; no obstante, debido al poco volumen de agua que se colectó no se pueden dar diferencias estadísticamente significativas. De hecho, el análisis de esta localidad se realizó promediando las dos fechas de muestreo. Es importante mencionar que el estudio *in situ* del agua de lluvia de un solo evento no suele acumular el volumen suficiente para la determinación de cada parámetro, incluso en ocasiones no precipitó dentro de la temporada de lluvia el día de muestreo. Es por ello que en la mayoría de los trabajos reportados el muestreo se realiza en períodos largos de recolección.

Sin embargo el dosel de *Fagus* parece retener eficientemente los  $H^+$  derivados de gases y aerosoles atmosféricos, el incremento del pH es causado por los cationes alcalinos depositados en el tejido foliar y por el intercambio iónico de la copa, resultados similares son indicados en bosques de *Fagus sylvatica* donde la concentración protónica disminuye bajo el flujo del dosel (Berger *et al.*, 2008).

En la hojarasca el valor de pH disminuye, ocasionado por el arrastre de partículas ácidas del bosque de *P. patula*, ya que en el sitio de estudio el bosque de *F. grandifolia* se localiza en la parte baja de la pendiente a 30 metros del bosque de *P. patula*; por tanto, el flujo bajo la hojarasca de haya está influenciado por la acidez originada en el bosque de *Pinus*.

En la Figura 26 y 27 se muestra un incremento de pH bajo el follaje de ambas especies, pero el haya es la especie que provocó un cambio evidente en este parámetro, debido a que el contenido mineral en los árboles de hoja ancha es generalmente más alto que el del follaje de coníferas (Pritchett, 1991), además de que las hojas de los bosques de *Fagus* contienen mayor cantidad de cationes básicos.

En Alemania el bosque de haya es popularmente llamada “*madre de los bosques*”, bajo el argumento que *Fagus* contrarresta la degradación del suelo por la rápida descomposición de la hojarasca y reciclaje de nutrientes a través de sus raíces (Berger *et al.*, 2008). El problema de acidez por parte de *Pinus* junto con la sustitución del bosque mesófilo de montaña, habla de la importancia de conservar al bosque de *Fagus*, incluso



implementar planes de conservación y de restauración; como la creación de viveros de esta especie, que como se sabe son un relictos en México.

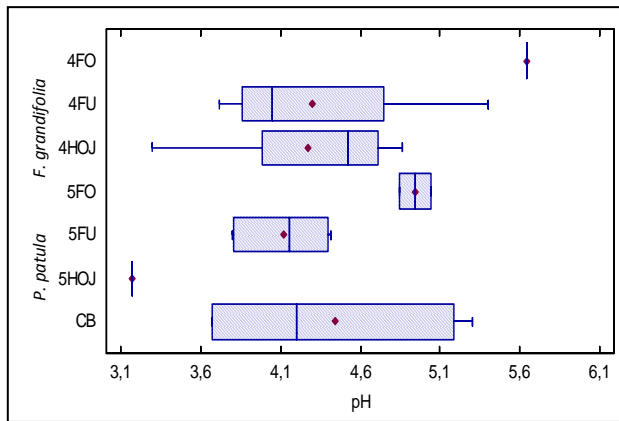
En el flujo del fuste de ambas especies no se presentó una variación con respecto al CB y los demás flujos, a diferencia del escurrimiento colectado bajo la hojarasca de *P. patula* donde aumentó la CE y los STD (Figura 27 B y C), enriqueciendo este escurrimiento con iones ácidos que provocan valores de pH más bajos.

#### *Sulfatos, Fosfatos y Nitratos.*

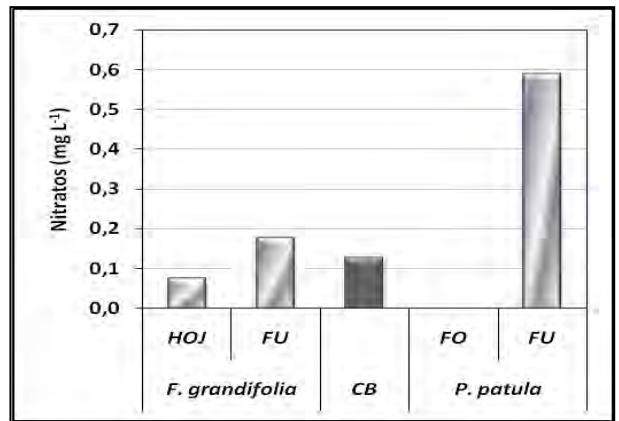
Los fosfatos fueron retenidos por ambas especies y los sulfatos solo en el bosque *Pinus*, lo cual es corroborado estadísticamente con un valor de  $P < 0.05$ . A pesar de que los sulfatos se hallaron en mayor cantidad en la precipitación incidente de este lugar, provocó una respuesta diferente en las especies arbóreas estudiadas. En el fuste de haya la concentración es mayor a la registrada en el CB. Contrariamente a los resultados obtenidos en el bosque de *Pinus*, donde la cantidad del nutrimento disminuyó del CB al follaje y aumentó ligeramente en el fuste; a pesar de ello, no se superaron los valores registrados en el CB.

La cantidad de agua colectada bajo el dosel y hojarasca de *P. patula* no fue suficiente para el análisis de nitratos, pero se presentó un incremento en el fuste. Con base en esto el nitrógeno podría formar parte de los solutos acidificantes de la hojarasca, ya que bajo esta se alcanzó un pH de 3.17. Considerando resultados de Wuys *et al.*, (2008) se deduce que este género contribuye a la acidez de la lluvia y probablemente también del suelo, ya que encontraron acidificación del suelo por N en diferentes especies de *Pinus*.

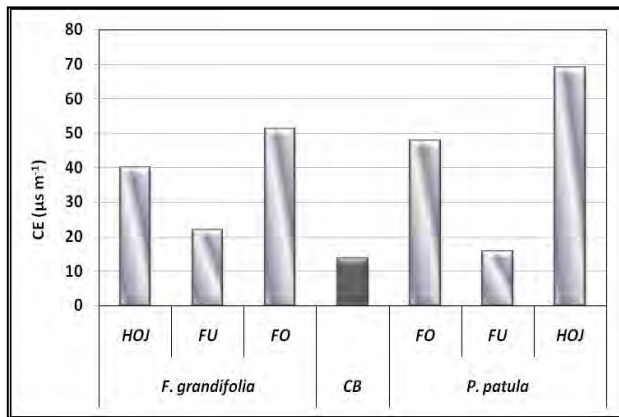
**A. pH**



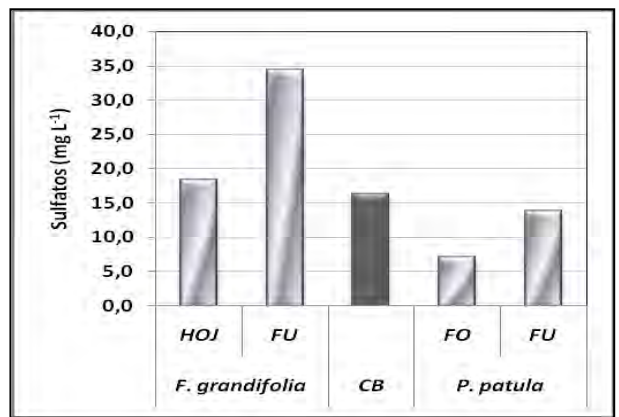
**D. Nitratos**



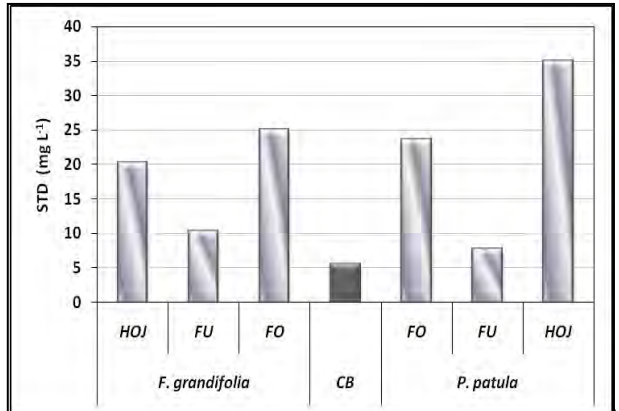
**B. Conductividad el6ctrica**



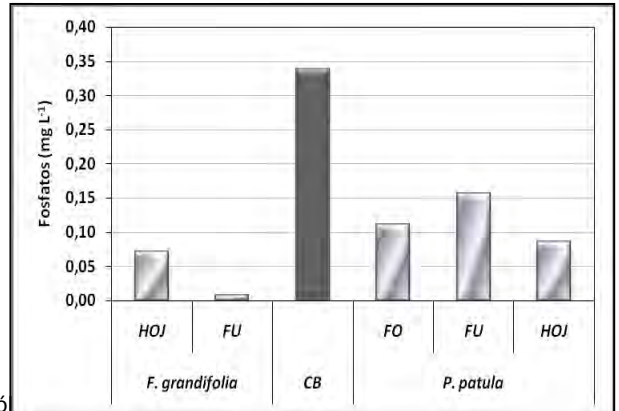
**E. Sulfatos**



**C. S6lidos totales disueltos**



**F. Fosfatos**



lluvia al pasar por la cubierta forestal en la MOJ (FO= follaje, FU= fuste y HOJ= hojarasca).

### 8.4.2 Relación de los nutrimentos del agua de lluvia, suelo y tejido foliar

Los cambios nutrimentales del follaje en los bosques pueden ser un indicador de alteraciones del estado nutrimental. Hasta el momento no se ha encontrado una relación directa entre los daños por contaminación del aire y la deficiencia nutrimental.

El tejido foliar de ambas especies presentó niveles de suficiencia para K y altos en Ca, Mg, y P; al igual que en los demás sitios, el nitrógeno fue insuficiente; los nitratos no fueron retenidos en la copa de haya, y pese a su incremento en el fuste de pino, el follaje carece aun mas de este elemento (Cuadro 9).

Los porcentajes de los minerales evaluados en el dosel de *Fagus* se encuentran en mayor proporción que en pino, lo cual explica los valores de pH más ácidos en *P. patula*. *F. grandifolia* disminuye la acidez de la precipitación causado por el lixiviado de estos cationes y su intercambio dentro de la copa.

Cuadro 9. Nutrimentos del tejido foliar de *F. grandifolia* y *P. patula*.

|                       | NUTRIENTES FOLIARES |                  |                  |                |          |         |
|-----------------------|---------------------|------------------|------------------|----------------|----------|---------|
|                       | Ca <sup>++</sup>    | Mg <sup>++</sup> | *Na <sup>+</sup> | K <sup>+</sup> | N        | P       |
|                       | %                   |                  |                  |                |          |         |
| <i>F. grandifolia</i> | 0.674 a             | 0.479 a          | 0.291            | 0.645 s        | 1.199 b  | 0,147 a |
| <i>P. patula</i>      | 0.105 a             | 0.323 a          | 0.284            | 0.584 s        | 0.381 mb | 0.156 a |

mb= muy bajo, b= bajo, s= suficiente, a= alto. Intervalos propuestos por García (2003). \*Sin referencia.

Cuadro 10. pH y nutrimentos del suelo bajo *F. grandifolia* y *P. patula*.

|                       | pH y NUTRIENTES DEL SUELO |      |                       |                  |                 |                |                     |       |
|-----------------------|---------------------------|------|-----------------------|------------------|-----------------|----------------|---------------------|-------|
|                       | pH                        |      | Ca <sup>++</sup>      | Mg <sup>++</sup> | Na <sup>+</sup> | K <sup>+</sup> | N                   | P     |
|                       | H <sub>2</sub> O          | KCl  | Cmol kg <sup>-1</sup> |                  |                 | %              | mg Kg <sup>-1</sup> |       |
| <i>F. grandifolia</i> | 4.21                      | 3.53 | 1.10 b                | 0.79             | 0.42            | 0.33 b         | 1.65                | 47.79 |
| <i>P. patula</i>      | 3.5                       | 3.04 | 0.80                  | 0.40             | 0.31            | 0.28           | 0.94                | 61.78 |

Debido a la acidez de la precipitación, la vegetación libera cationes alcalinos, provocando que su concentración disminuya bajo el suelo, pero no por ello el follaje presentó deficiencia. Se observa también que Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup> y K<sup>+</sup> están en mayor cantidad bajo *Fagus* que bajo *Pinus*, indicando que en este sitio la especie que favorece a la neutralización del agua de lluvia y del suelo es *F. grandifolia*.

## 8.5 Variación de pH del agua de lluvia en dos momentos en la localidad de La Mojonera

Los resultados mostraron que la actividad promedio de protones difirió, tanto entre fechas de muestreo como entre tipos de recolección (Figura 28). La precipitación fue ácida en las dos fechas de muestreo, en junio de 4.11 y en septiembre de 5.24. El lavado de contaminantes atmosféricos en las primeras lluvias provoca un pH más ácido en junio; aunque en septiembre la cantidad de precipitación acumulada fue mayor en el municipio de Zacualtipán (junio: 100-150 mm y septiembre: 200-250 mm) (INIFAP, 2008); en consecuencia se observa que en este mes el arrastre de solutos es mayor.

El pH del agua de lluvia se encontró fuertemente influenciado por la presencia de sulfatos en ambos períodos de recolección, que fueron removidos principalmente en junio. Es importante mencionar que estadísticamente no hubo diferencias para los parámetros evaluados; pero, para corroborar estos resultados sería conveniente dar un seguimiento continuo a la dinámica del agua de lluvia en los claros y sobre la vegetación de este bosque de niebla.

Se presentó un incremento en las tres mediciones en el mes de septiembre, comparado con junio. Este aumento de CE y STD no excedió más de 5 unidades en el CB, fuste de *Fagus* y fuste de *Pinus*. No es sino hasta la hojarasca del bosque de haya cuando aumentaron estas variables en el mes de septiembre, originado por una mayor precipitación y el arrastre de solutos procedentes de la parte alta de la pendiente.

En la comparación de los dos muestreos se tomó en cuenta el flujo de follaje de algunas herbáceas (FOHER) y el fuste de encino (FUEN), en dichos escurrimientos la CE como los STD ascendieron (Figura 28); debido a la poca cantidad de muestra colectada, no se pudo realizar un análisis más profundo. Cabe señalar que en las herbáceas se agruparon distintas especies que podrían tener un efecto diferente; pese a ello, parecen amortiguar la concentración de  $H^+$  de la lluvia incidente del mes de junio ya que el pH cambió de 4.11 en el claro del bosque a 4.59 bajo las herbáceas.

En el mes de junio los iones sulfatos presentaron mayor concentración que en septiembre, comportándose el pH de manera inversa, esto indica que en el primer muestreo existía una mayor acumulación de óxidos de azufre en la atmósfera, que fueron disminuyendo con la deposición húmeda lo que se refleja en la disminución de los sulfatos en el segundo muestreo y en consecuencia un pH mayor.

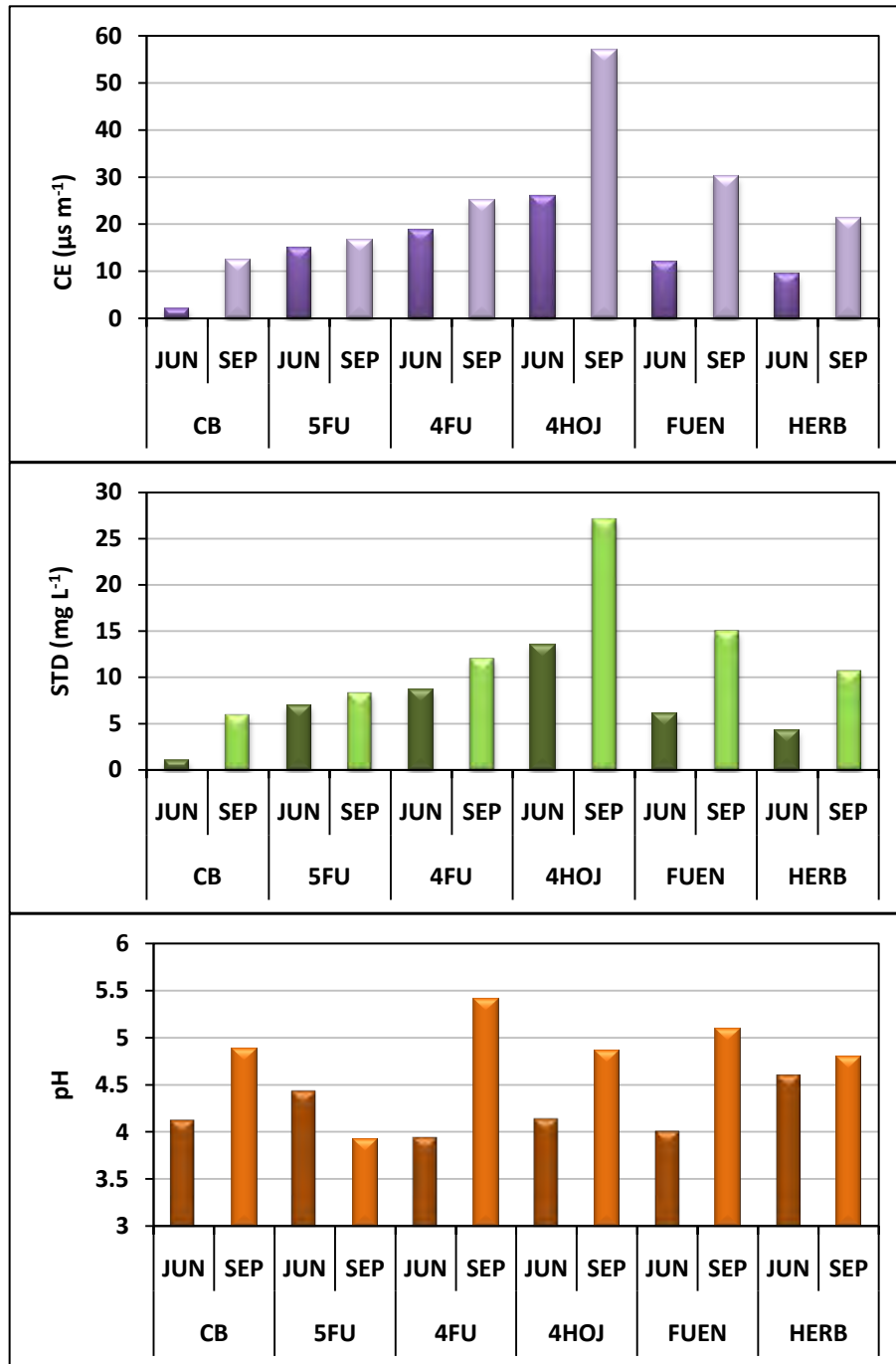


Figura 28. Variación de pH, CE y STD durante dos períodos de recolección en la localidad de la Mojonera (FO= follaje, FU= fuste, HOJ= hojarasca, 4= *F. grandifolia*, 5= *P. patula*, FUEN= Fuste encino y HERB=Herbácea)

### 8.6 Variación de pH del agua de lluvia en bosque de *Pinus leiophylla* en el PNIP y *P. patula* en la localidad de La Mojonera

El pH fue ácido en la MOJ (4.68) y el PNIP (4.51). El PNIP fue el lugar que registró mayor acidez en los CB, por consiguiente el escurrimiento del dosel y fuste exhibieron valores de pH menores que los árboles de *Pinus* de la MOJ (Figura 29). Sin embargo los fascículos caídos verticalmente de *P. patula* provocan menor retención de solutos alcalinos y con ello el descenso de pH.

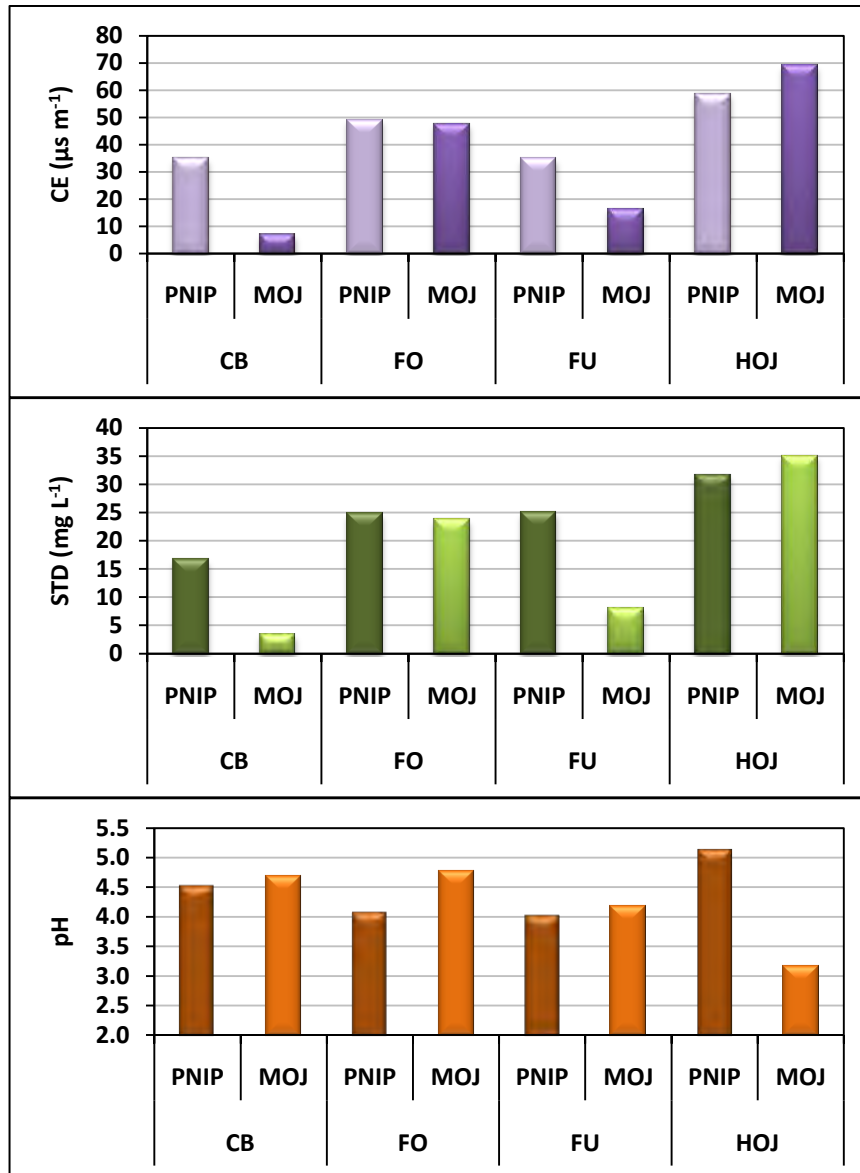


Figura 29. Variación espacial de pH, CE y STD del flujo del agua de lluvia al pasar por la vegetación en un bosque de *Pinus* en el PNIP y la MOJ.

La composición de la solución bajo la hojarasca en el PNIP fue afectada por el arrastre de iones alcalinos de los estratos rocosos y del suelo, causando disminución en la concentración de iones de H<sup>+</sup>. En la localidad de la MOJ no sucede eso ya que la ubicación

del bosque de pino, materia orgánica y manejo forestal, favorecen la acumulación de iones ácidos. Los STD y la CE disminuyeron en el fuste de pino de la MOJ, esto puede ser causado por la dimensión de los árboles, que presentan poca cobertura y el diámetro a la altura del pecho no era mayor de 20 cm, razón determinante en la cantidad de agua que fluye y la cantidad de partículas que incorpora, dando lugar a una menor concentración de CE y STD que en los pinos de mayor envergadura.

### 8.7 Variación de pH del agua de lluvia en Bosque de *Abies religiosa* del PNIP y PNCH

Los valores encontrados de CE y STD fueron similares en ambos sitios; sin embargo, aunque no se encontraron diferencias estadísticas hubo variación de pH (Figura 30). Estas diferencias en la actividad de  $H^+$  fueron ocasionadas por la concentración atmosférica de cada sitio; en el PNCH el pH fue mayor a 5.6, no hay lluvia ácida a diferencia del PNIP donde se registró la precipitación más ácida.

En ambos casos se halló disminución de pH en el follaje, esta disminución es mucho mayor en el PNIP y explica la causa. El pH fue de 3.96 y 5.44 en el PNIP y PNCH respectivamente, los aerosoles ácidos en el PNIP alteran el pH del follaje y fuste. Saavedra-Romero *et al.*, (2002) al examinar los escurrimientos foliares de oyamel en el Parque Nacional Desierto de los Leones encontró valores de pH en diferentes puntos de muestreo dentro del mismo parque; argumentan que esta variación es ocasionada por la cantidad de precipitación, concentración de aerosoles, dirección y velocidad del viento.

Los resultados de pH en el flujo del agua de lluvia en los bosques de oyamel estudiados, dependen principalmente de las características del lugar, lo cual permite establecer una variación entre cada sitio y que es corroborado por la LSD de Fisher.

La copa de estos árboles tiene una función importante en la recepción de compuestos atmosféricos debido a su cobertura, recordemos que existe absorción de fosfatos en el PNIP y de sulfatos en ambos sitios, esto se corrobora con lo planteado por Chávez-Aguilar *et al.*, 2006, dado que mencionan que *A. religiosa* tiene una alto potencial de absorción foliar.

La acidez fue amortiguada bajo la hojarasca de ambos parques, además de la neutralización de la especie, se incorporan solutos del suelo y de la roca, aunque el PNCH es favorecido por aerosoles de tipo alcalino. Por tanto el bosque de *A. religiosa* tiende a neutralizar el pH inicial del agua de lluvia, lo cual está de acuerdo con lo encontrado en otros sitios con bosques de oyamel (Saavedra-Romero *et al.*, 2002; Pérez-Suárez *et al.*, 2008).

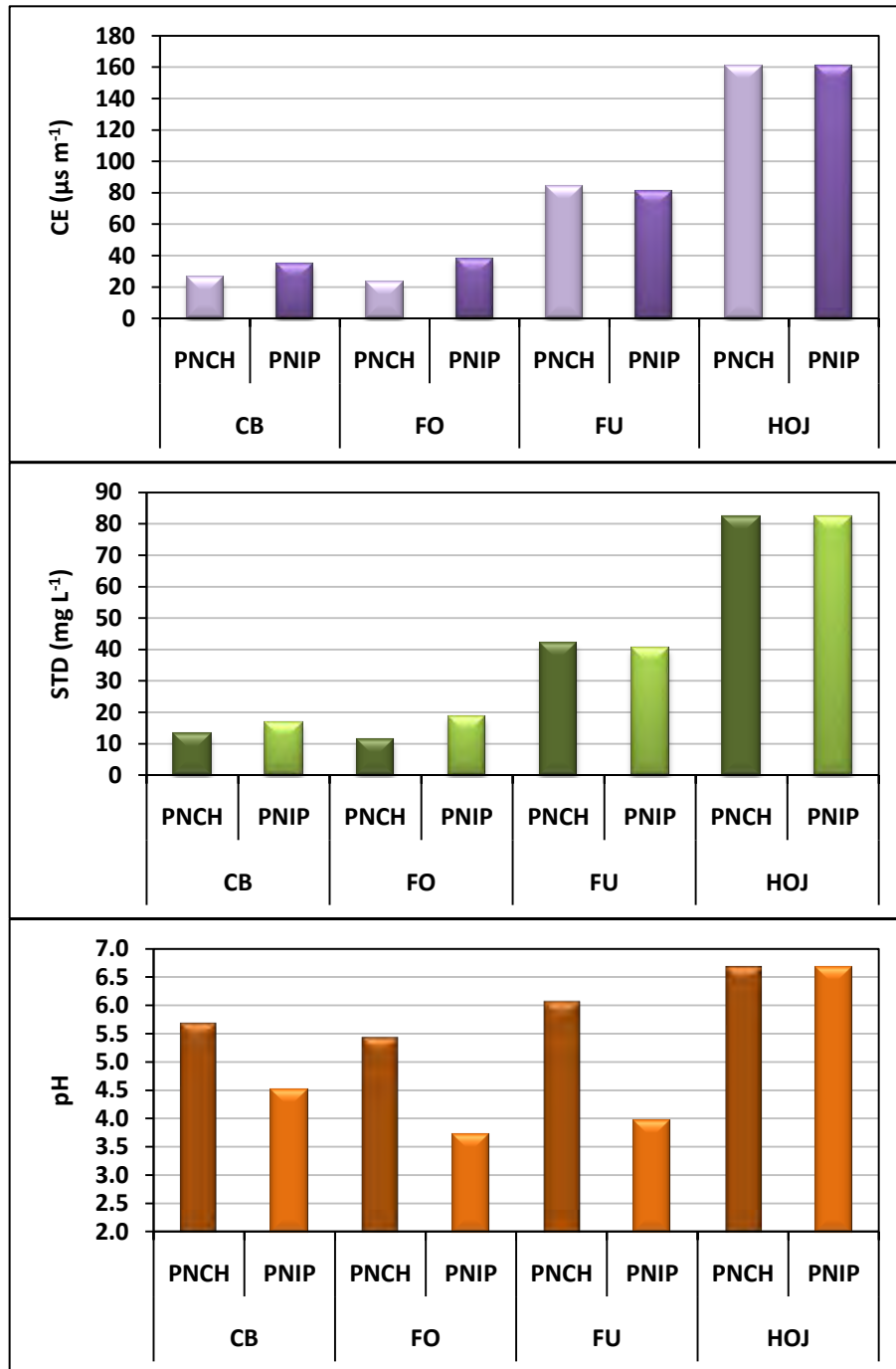


Figura 30. Variación de pH, CE y STD del flujo del agua de lluvia al pasar por la vegetación en un bosque de *A. religiosa* en el PNIP y PNCH.



## 8.8 Comportamiento del pH del agua de lluvia en el ecosistema

El pH del agua de lluvia fue modificado cuando fue interceptado por el bosque, esta variación está sujeta a múltiples factores que participan activa y pasivamente en los cambios durante su recorrido por la vegetación hasta alcanzar el piso forestal. Estos se combinan distintamente en cada una de las formaciones boscosas, dando origen a un ciclo hídrico interno y movimiento de nutrientes de manera particular en cada tipo de vegetación.

Se observaron valores diferentes y contrastantes de pH, aún cuando se trata de la misma especie; en este caso estas diferencias en la composición química de la precipitación son ocasionadas principalmente por la composición atmosférica de cada sitio (PNIP y PNCH). Al comparar dos especies diferentes en el mismo sitio (PNCH), el comportamiento del agua también varió, ahora provocado por la fisionomía de las especies (*A. religiosa* vs *C. lusitánica*).

La modificación del pH del agua de lluvia que fluye a través de la vegetación, es producto de la compleja y heterogénea estructura vertical de los árboles, lo que indica que existen otros factores que influyen en la composición de la precipitación; entre ellos, elementos del dosel, fuste, hojarasca y sotobosque epífitas, líquenes y musgo, por lo que deben ser estudiados con mayor detalle.

En este estudio ineludiblemente el depósito húmedo fue mayor en el dosel que en los claros del bosque, la vegetación si modificó la composición química de la lluvia y en consecuencia el pH. Mediante las observaciones realizadas en las distintas especies en diferentes sitios se demuestra que la estructura arbórea que modifica en mayor proporción la composición del agua de lluvia y su pH es la copa. Esto ocurre porque es la estructura que presenta mayor superficie expuesta y es la primera que intercepta la precipitación, permitiendo el intercambio iónico entre constituyentes ácidos y alcalinos. Por lo tanto la composición química del escurrimiento fustal depende en gran medida a los cambios generados previamente en la copa.

El flujo bajo la hojarasca no se ha investigado, pero se conoce que el mantillo representa uno de los grandes depósitos de nutrimentos y energía dentro del ecosistema, y que está sujeto a un proceso dinámico de descomposición que determina la tasa de recambio y acumulación. Los resultados de estos escurrimientos reflejaron amortiguamiento del pH en las especies arbóreas estudiadas, resultado del incremento de los sólidos disueltos totales y conductividad eléctrica observado en todos los casos.

En la siguiente figura se esquematiza el recorrido del agua de lluvia al pasar por la vegetación y en diferentes cuerpos superficiales de agua del PNCH donde se modifica el pH. La precipitación se introduce en los sistemas forestales por distintas vías, puede ser interceptada por la vegetación, de ella fluir al tronco del árbol o gotear directamente al suelo. Una vez que se ha alcanzado el piso forestal puede escurrirse o infiltrarse de la hojarasca al suelo y subsuelo, y finalmente llega a formar parte de manantiales, arroyos y ríos. En cada uno de los sitios por los cuales pasa el agua, existe un continuo intercambio de diferentes solutos que alteran su composición química y que se refleja en la variación del pH.

En los escurrimientos superficiales se observó un descenso en la concentración de iones de  $H^+$  y conforme el depósito de agua es mayor (Figura 31, Cuadro 11). En el escurrimiento rocoso, el arroyo y la cascada son favorecidos por el arrastre de solutos del suelo y de la roca, estos escurrimientos superficiales alcanzan sistemas de agua más grandes como los ríos, que en su recorrido tienen aporte de iones de distintas fuentes, que permiten mantener valores de pH muy cercanos a la neutralidad.

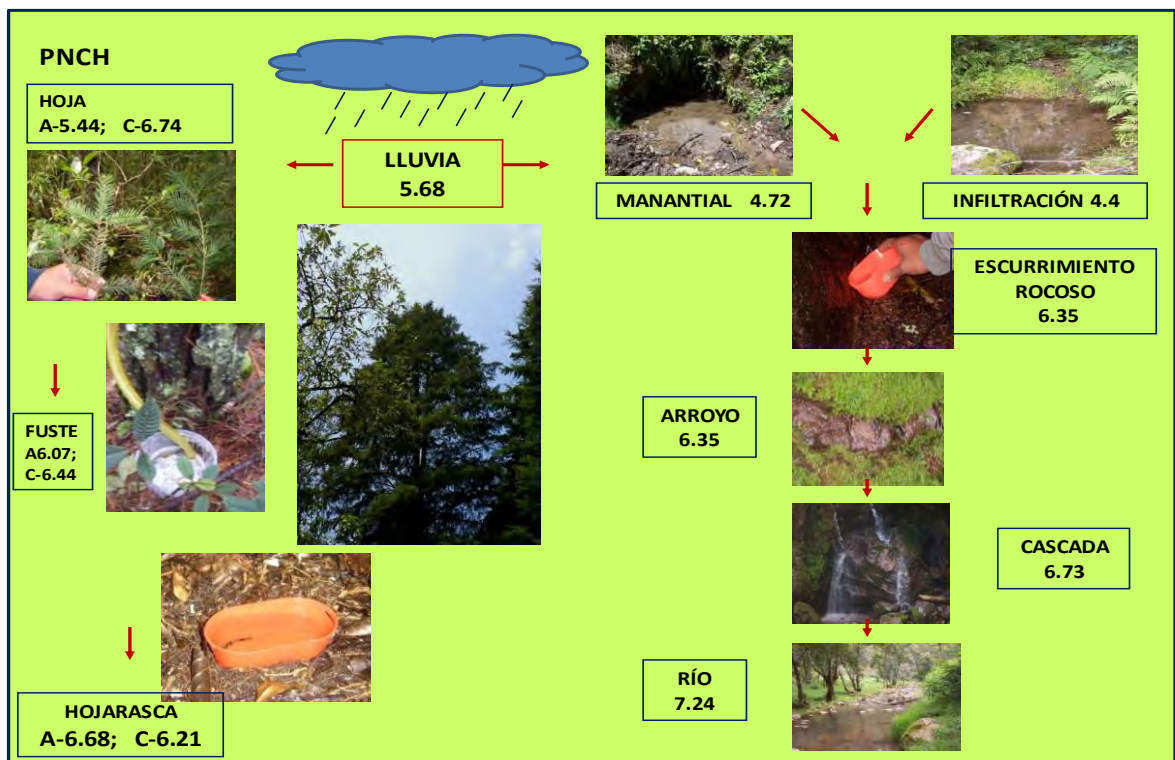


Figura 31. Esquema del agua de lluvia y valores promedio de pH al pasar por diferentes sitios del bosque.

Cuadro 11. Características de los cuerpos superficiales de agua.

| LOCALIDAD        | CORDENADAS UTM |         | ALT<br>m | pH   | CE<br>$\mu\text{s m}^{-1}$ | T AGUA<br>°C | STD | NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> | PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> | CO <sub>2</sub> y HCO <sup>-</sup> | Ca <sup>++</sup> y Mg <sup>++</sup><br>mg L <sup>-1</sup> |
|------------------|----------------|---------|----------|------|----------------------------|--------------|-----|------------------------------|-------------------------------|------------------------------------|---|
|                  | X              | Y       |          |      |                            |              |     |                              |                               |                                    |   |
| <b>PNCH</b>      |                |         |          |      |                            |              |     |                              |                               |                                    |   |
| Infiltración     | 530355         | 2223428 | 2895     | 4,4  | 85                         | 12,2         | 42  | 0,062                        | 0,101                         | 44,660                             | 39,906  |
| Manantial        | 532461         | 2230173 | 2736     | 5,01 | 90                         | 11,6         | 33  | 0,010                        | 0,041                         | 24,533                             | 34,701  |
| Manantial        | 530058         | 2232097 | 2890     | 4,9  | 72                         | 12,4         | 36  | 0,013                        | 0,138                         | 33,730                             | 46,846  |
| Manantial        | 530185         | 2232236 | 2908     | 4,3  | 72                         | 13,7         | 36  | 0,075                        | 0,016                         | 37,330                             | 45,979  |
| Manantial        | 530535         | 2223428 | 2895     | 4,5  | 86                         | 12,6         | 42  | 0,043                        | 0,076                         | 46,000                             | 61,594  |
| Esc rocoso       | 530185         | 2232236 | 2908     | 6,3  | 61                         | 13,7         | 30  | 0,066                        | 0,061                         | 35,266                             | 48,581  |
| Esc rocoso       | 530051         | 2233137 | 2870     | 4,8  | 10                         | 13,1         | 5   | 0,059                        | 0,048                         | 22,230                             | 19,953  |
| Zona Inundación  | .              | .       | .        | 5,1  | 68                         | 12,3         | 64  | 0,194                        | 0,039                         | 44,466                             | 48,581  |
| Lago CL          | .              | .       | .        | 5,8  | 65                         | 14,6         | 34  | 0,016                        | 0,062                         | 35,266                             | 4,684   |
| Arroyo           | .              | .       | .        | 6,1  | 66                         | 11,5         | 33  | ND                           | ND                            | ND                                 | ND  |
| Arroyo corrales  | 228880         | 2233594 | 2670     | 6,5  | 56                         | 12,1         | 27  | 0,016                        | 0,257                         | 27,600                             | 45,111  |
| Cascada Milagros | 228880         | 2233594 | 2670     | 6,7  | 23                         | 12,9         | 12  | 0,019                        | 0,274                         | 21,466                             | 22,555  |
| Río Carpinteros  | 549837         | 2276437 | 1809     | 7,2  | 53                         | 17,1         | 26  | 0,021                        | 0,015                         | ND                                 | ND  |
| <b>PNIP</b>      |                |         |          |      |                            |              |     |                              |                               |                                    |   |
| Potrero (jun.)   | 533997         | 2111964 | 3118     | 7,14 | 26                         | 8,3          | 52  | 0,088                        | 0.0                           | 36,800                             | 52,920  |
| Potrero (sep.)   | 533997         | 2111964 | 3118     | 6,91 | 23                         | 9,7          | 47  | 0,057                        | 0,035                         | 4,600                              | 41,642  |

ND= no determinado.

## 9. CONCLUSIONES

Se detectó precipitación ácida en los bosques de la MOJ (4.68) y en los bosques del PNIP (4.51), a diferencia de los bosques del PNCH donde el pH fue de 5.68. Se demostró que este fenómeno no solo se presenta en áreas industrializadas y puede localizarse también en áreas boscosas sujetas a conservación, donde la variación del pH es dominado por procesos de formación y movimiento de la nube.

La composición iónica de la lluvia en la localidad de la Mojonera es afectada por procesos de limpieza bajo la nube, la alta concentración de sulfatos en la localidad causan la disminución del pH.

La vegetación sí modificó la composición iónica del agua de lluvia, en mayor proporción el follaje y la hojarasca. En el flujo bajo la hojarasca el pH aumentó en todas las especies evaluadas, excepto en *P. patula*.

El pH de la lluvia en el PNIP descendió en el follaje de *A. religiosa* y *P. leiophylla* debido a la acumulación de partículas ácidas. Existe carencia de N en tejido foliar de *P. leiophylla* y suelo provocando consumo de N por parte de ésta especie, por lo que la lluvia representa una fuente inmediata de este nutrimento.

En el PNCH el bosque de oyamel y significativamente el bosque *Cupressus* aumentaron el pH, por lo que son importantes reguladores del ingreso de iones acidificantes al bosque. Regulan la concentración iónica de la lluvia mediante la absorción de sulfatos y fosfatos ( $P < 0.05$ ), e incrementando la cantidad de Ca y Mg en el follaje, y en consecuencia estos cationes tienen una calidad media bajo el suelo.

En la localidad de la Mojonera el bosque de *P. patula* aumentó significativamente la cantidad de iones hidronio, por lo que acidifica el suelo. *F. grandifolia* permitió la regulación de iones de  $H^+$  provocado por una cantidad mayor de Ca, Mg y K en el tejido foliar que en *P. patula*. Existe una tendencia a reducir la concentración de sulfatos de junio a septiembre en la localidad, por lo que se infiere que la lluvia contribuye en la limpieza atmosférica de este elemento.

*A. religiosa* contribuyó a la disminución de la acidez tanto en el PNIP como en el PNCH, a diferencia del género *Pinus* donde hubo un incremento, mayormente en la Mojonera.

En general los nutrimentos evaluados en tejido foliar se encontraron en un nivel de suficiencia y altos, y en el suelo de calidad baja, media y alta, por lo que el depósito húmedo no provocó deficiencias en el estado nutrimental. El pH del suelo manifestó un rango moderadamente ácido, valor que no obstaculiza la disponibilidad de los nutrimentos.

Las propiedades químicas del agua de lluvia también variaron al pasar por diferentes cuerpos de agua del bosque, alcanzando valores de pH neutros.

El pH de agua de lluvia cambió por sitio y aun dentro de la temporada de lluvia, sujeto a múltiples factores (atmosféricos, hidrológicos, químicos y físicos) por lo que se requiere de mayor número de muestreos que nos indiquen el efecto e interacción del agua de lluvia sobre los sistemas forestales.

## 10. BIBLIOGRAFÍA

- Allan, J. 1971. The preparation of agricultural samples for analysis by atomic absorption spectroscopy. Varian Techtron, Walnut Creek, California, U. S. A.
- Anatolaki, Ch. y, R. Tsitouridou. 2009. Relationship between acidity and ionic composition of wet precipitation two years study at an urban site, Thessaloniki, Greece. *Atmospheric Research* 92:100–113.
- Andrade, C. G., H.D. Da Silva, C. A. Ferreira, A. F. J. Bellote y L. Moro. 1995. Contribución del agua de lluvia en la oferta de nutrientes minerales para *Eucalyptus grandis*. *Bosque* 16: 47-51.
- APHA, AWWA and WPCF. 1992. Métodos normalizados para el análisis de aguas potables y residuales. 17ª edición. Ed. Díaz Santos. Washington. 1195 pp.
- 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.
- 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.
- Baltazar., A. M. 2009. Actividad arilsulfatasa y azufre en suelo y tejido foliar en cuatro especies de coníferas en bosque templado. Tesis de Licenciatura. FES Zaragoza, UNAM.
- Bellot, J. y A. Escarre. 1989. Contribución del quimismo del agua de lluvia, de la deposición seca y la lixiviación, sobre la química de los flujos de trascolación y escorrentía cortical en el encinar Mediterráneo, *Options Mediterraneennes*. 3: 211-214.
- Berger, T. W, H. Untersteiner, H. Schume y G. Jost. 2008. Throughfall fluxes in a secondary spruce (*Picea abies*), a beech (*Fagus sylvatica*) and a mixed spruce-beech stand. *Forest Ecology and Management* 255: 605–618.
- Bini C. y F. Bresolin. 1998. Soil acidification by rain in forest ecosystems: A case study in northern Italy. *The Science of the total Environment*. 222:1-15.
- Bray, R. y L. Kurtz. 1945. Determination of total, organic, and available phosphorus in soil. *Soil Sci.* 59: 39-45.
- Bremner, J. M. 1965. Total nitrogen. *In: Methods of Soil Analysis. Part 2: Chemical and Microbiological Properties*. Edited by C. A. Black *et al.* Agron. Series 9. Amer. Soc. Agron. Madison, Wisconsin. pp. 1149-1178
- Cabrera-Cruz, R. B. E., A J Gordillo M. y Á. Cerón B. 2003. Inventario de contaminación emitida a suelo, agua y aire en 14 municipios del Estado de Hidalgo, México. *Contaminación Ambiental*. 19:171-181.
- 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.
- 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 Ingeniería. 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 veintiuno. México. 192 pp.
- Celle-jeaton, H., Y. Travi, M.D. Loÿe-Pilot, F. Huneau y G. Bertrand. 2009. Rainwater chemistry at a Mediterranean inland station (Avignon, France): Local contribution versus long-range supply. *Atmospheric Research* 91:118–126.
- CENAPREP, 2008. Centro Nacional de Prevención de desastres de la Secretaría de Gobernación. <http://www.gobernación.gob.mx/monitoreo>. (consultado en el mes de enero de 2010).
- 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.
- 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.
- Cheng-Yuan. X., K. L. Griffin, J. C. Blazier, E. C. Craig, y D. S. Gilbert. 2009. The growth response of *Alternanthera philoxeroides* in a simulated post combustion emission with ultrahigh [CO<sub>2</sub>] and acidic pollutants. *Environmental Pollution* XXX: 1–8.
- CONANP, 2007. Parque Nacional IztaPopo. Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas (ANP) <http://iztapopo.conanp.gob.mx/infbasica.php>. (Consultado en el mes de mayo de 2008)
- 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.
- Dezseo, N. y N. Chacón. 2006. Nutrient fluxes in incident rainfall, throughfall, and stemflow in adjacent primary and secondary forests of the Gran Sabana, southern Venezuela. *Forest Ecology and Management* 234: 218–226.
- 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.
- Egli, P., M. Fitze. 1999. Change in heavy metal contents in an acidic forestal soil affected depletion of soil organic matter within the time spam. *Elsevier science* 105:367-379.
- Farías, A. P., H. L. Sandoval y R.E Ventura. 2007. Intercepción de lluvia por *Lysiloma microphylla* en el municipio de Querétaro, Qro. Universidad Autónoma de Querétaro pp. 1-4.
- García, H. S. 2003. Indicadores de calidad del suelo y estado nutrimental de *Abies religiosa* (H. B. K.) Schl. et Cham. en la exposición occidente de los volcanes Iztaccíhuatl y Popocatépetl. Tesis de Licenciatura. FES Zaragoza, UNAM.
- Godínez I. O., P. G. Ángeles y M. L. López. 2007. Lluvia de semilla y emergencia de plántulas de *Fagus Grandifolia* subsp. *Mexicana* en La Mojonera, Hidalgo, México. *Revista Mexicana de la Biodiversidad*. 78: 117-128.
- González, E. M. 2005 Variación anatómica foliar de *Abies religiosa* (H. B. K.) Schlecht. & Cham. y *Pinus hartwegii* Lindl. (Pinaceae) en tres sitios contrastantes. Tesis de Licenciatura. FES Zaragoza, UNAM.

- Granados, D. M. R. 2003. Calidad del suelo y estado nutrimental del género *Pinus* en la vertiente occidental del Iztaccíhuatl y Popocatepetl. Tesis de Licenciatura. UNAM.
- Herrera, J. M. y S. R. Rodríguez. 2009. Determinación de la concentración de aniones en muestras de precipitación total colectadas en San José, Costa Rica. *Contaminación Ambiental*. 25: 65-72.
- Hobbie, S. E. 1992. Effects of plant species on nutrient cycling. *Tree* 7:336-339.
- Hubber, A., y A. Iroumé. 2001. Variability of anual rainfall partitioning for different sites forest cover in Chile. *Journal of Hidrology*. 248: 78-92.
- INEGI, 2002. Información estadística, medio ambiente  
[http://mapserver.inegi.gob.mx/geografia/espanol/datosgeogra/basicos/hidrologia/rios/cuencas\\_hidrologicas.cfm?c=520](http://mapserver.inegi.gob.mx/geografia/espanol/datosgeogra/basicos/hidrologia/rios/cuencas_hidrologicas.cfm?c=520) (consultado en el mes de mayo de 2008).
- INIFAP, 2008. Precipitación acumulada en Hidalgo, laboratorio nacional de modelaje y sensores remotos. <http://clima.inifap.gob.mx/redclima/default.aspx> (Consultado el mes de enero de 2010)
- Jackson, M. L. 1982, Análisis químicos de suelos, Ed., Omega 4a ed., Barcelona, España.
- Jackson, M. L., 1982, Análisis químicos de suelos, Ed., Omega 4a ed., Barcelona, España.
- Kaspari, M., M. N. García, K. E. Harms, M. Santana, S. J. Wright y J. B. Yavitt. 2008. Multiple nutrients limit litterfall and decomposition in a tropical forest. *Ecology Letters* 11: 35–43.
- Klumpp, A., M. Domingos y R. M. Moraes. 1998. Effects of complex air pollution on tree species of the Atlantic rain forest near Cubatao, Brazil. *Chemosphere*. 36: 989-994.
- Kyoung-Jin, k., C. Kun-Woo, E. Tsuquio y I. Shoji. 2000. The amount of stemflow and throughfall by the rainfall in *Pinus densiflora* forests. *Journal of rainwater chatchment systems*. 5:13-19.
- Larcher, W. 2003. *Physiological plant ecology: ecophysiology and stress physiology of functional groups*. Ed. Springer, 4ª Ed, Germany. 513 pp.
- Law, K. 2010. More ozone over North America. *Nature, Atmospheric Chemistry* 463:307-308.
- Liu, H. F. y G. B. Lipták. 2000. *Air pollution*. Lewis Publishers. Now York USA. 242 pp.
- Llorens, P. y F. Domingo. 2007. Rainfall partitioning by vegetation under Mediterranean conditions. A review of studies in Europe. *Journal of Hydrology*. 335: 37– 54.
- Moreno, G., J. F. Gallardo y F. Bussotti. 2001. Canopy modification of atmospheric deposition in oligotrophic *Quercus pirenaica* forests of an unpolluted region (central western Spain). *Forest Ecology and Management*. 149: 47-60.
- Navar, J., J. M. González y H. González. 2009. Gross precipitation and throughfall chemistry in legume species planted in Northeastern México. *Plant Soil*. 318: 15-26.
- Nebel J.B. y T.R. Wright. 2002. *Environmental science: toward a sustainable future*. 8ª ed., Ed. Pearson, Nuw Jersey. 681 pp.
- NMX-AA-008-SCFI-2000. Determinación de pH.
- NMX-AA-029-SCFI-2001. Determinación de fosfatos. Método fosfomolibdato.
- NMX-AA-093-SCFI-2000. Determinación de conductividad eléctrica.
- NOM-021-RECNAT-2000 Que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos. Estudio, muestreo y análisis.



- Padilla, H., M. C. Torres, R. Bélmont, R. García y A. Báez. 2007. Total peroxides and sulfate in rainwater in the Mexican Eastern Pacific Ocean during the Climatic Experiment in the Americas Warm Waters Pools. *Atmósfera* 20: 299-305.
- Peña, M. E. R. 2006. Nutrimiento en follaje y lavado de copa en *Abies religiosa* (H.B.K.) Schl. Et Cham., San Miguel Tlaixpan y Río Frío, Estado de México. Tesis de Maestría. COLPOS Montecillo Texcoco, Edo. de México.
- Pérez-Suárez, M. S., M. E. Fenn, V. M. Cetina y A. Aldrete. 2008. The effects canopy cover on t throughfall and soil chemistry in two forest sites in the México city air basin. *Atmósfera* 21: 83-100.
- Pritchett, W. 1991. Suelos forestales, propiedades, conservación y mejoramiento. Editorial LIMUSA-Grupo Noriega Editores. México.
- Raiswell, R.W., P. Brinblecombe, D. L. Dent y P.S. Liss. 1983. Química ambiental. Ediciones Omega, Barcelona. 209 pp.
- Ramírez, V. S., E. Segobia, I. Romero, H. E. Velazco y H. Gracia (eds.). Influencia de las precipitaciones ácidas sobre el crecimiento radicular de *Lactuca sativa* y *Amaranthus hypochondriacus*. Actas del XXVI Congreso Interamericano de Ingeniería Sanitaria y Ambiental, Cancún México 2002.
- Ramos, V. E. y D. D. Zúñiga. 2008. Efecto de la humedad, temperatura y pH del suelo en la actividad microbiana a nivel de laboratorio. *Ecología aplicada*, Departamento Académico de Biología, Universidad Nacional Agraria La Molina, Lima-Perú, pp. 123-130.
- Rubio A. M., V. Rivero y M. Paez. 2001. Remoción de contaminantes por lluvias y rocíos en la región metropolitana, Boletín Sociedad Chilena. *Química*. 46: 1-7.
- Rzedowski, J., 1978. Vegetación de México. Ed. Limusa. México.
- Saavedra-Romero, 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.
- Salado, A. C. A., J. R. Valdez, G. Ángeles, H. M. de los Santos, R. Hapanen y A. I. Aguirre. 2009. Mapeo de carbono arbóreo aéreo en bosques manejados de Pino *patula* en Hidalgo, México. *Agrociencia* 43:209-220.
- 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.
- Sánchez, L., J. Morales, H. Velásquez, D. Portillo, Y. Cano, B. Montilla, N. Iriarte y J. Mesa. 2009. Composición iónica y niveles de acidez de las lluvias en Maracaibo, Venezuela, entre 1989 y 2001. *Contaminación Ambiental*. 25: 169-179.
- Sanhueza, E., M. Santana, L. Donoso y M. Pacheco, 2005. Química atmosférica en la Gran Sabana III: composición iónica y características ácido-básicas de las lluvias. *Interciencia* 10:618-622.
- 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.

- SEMARNAT, 2000. SIRE-Paquetes tecnológicos, CONAFOR. <http://beta.semarnap.gob.mx/pfnm/> (consultado en mayo 2008).
- Silva, M.P.R., F.L.T. Goncalves y S.R. Freitas, 2009. Two case studies of sulfate scavenging processes in the Amazon region (Rondônia). *Environmental Pollution* 157:637–645.
- 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 mayo de 2008).
- Spurr., S.H. y B. V. Barnes. 1982. *Ecología forestal*. Ed. AGT, México, 690 pp.
- Stoker, H.S. y S.F., Seager. 1981. *Química ambiental. Contaminación del aire y del agua*. Editorial Blume. Barcelona. 320 pp.
- Torres, G. A. y G. L. Galván. 1999. Lluvia ácida, GDF, SMA pp.1-27.
- Valderrábano, G. J. M. 2005. *Calidad del Suelo y Estado Nutricional de la Vegetación Forestal en el Parque Nacional Zoquiapan y Anexas*. Tesis de licenciatura. FES Zaragoza. UNAM.
- Velasco S. H., E. E. Segovia y N. M. Hidalgo, (eds.) *Lluvia ácida en los bosques del poniente del valle de México*. Actas del XXVI Congreso Interamericano de Ingeniería Sanitaria y Ambiental, Cancún México 2002.
- Williams-Lineraa, G, A. Rowdenb y A. Newtonb. 2003. Distribution and stand characteristics of relict populations of Mexican beech (*Fagus grandifolia* var. *Mexicana*). *Biological Conservation* 109: 27–36.
- Wuyts, K., A de Schrijver, J. Staelens, L. Giels, J. Vandenbruwane y C. Verheyen. 2008. Comparison of forest edge effects on throughfall deposition in different forest types. *Environmental Pollution* 156: 854-861.
- 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* Vol. 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.