

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
FACULTAD DE CIENCIAS FORESTALES**



**APORTE DE NUTRIENTES VÍA PRECIPITACIÓN INCIDENTE,
DIRECTA Y ESCURRIMIENTO FUSTAL EN *Pinus cooperi* C.E.
BLANCO, EN “EL SALTO”, DURANGO**

POR

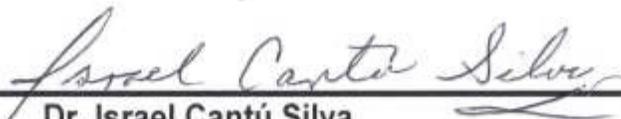
SILVIA JANETH BÉJAR PULIDO

**COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL GRADO DE
MAESTRÍA EN CIENCIAS FORESTALES**

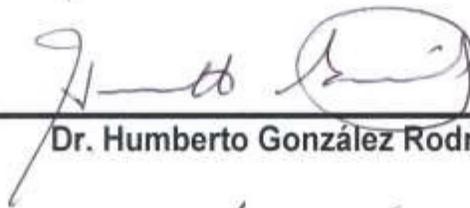
DICIEMBRE, 2017

**APORTE DE NUTRIENTES VÍA PRECIPITACIÓN INCIDENTE,
DIRECTA Y ESCURRIMIENTO FUSTAL EN *Pinus cooperi*
C.E. BLANCO, EN “EL SALTO”, DURANGO**

Aprobación de tesis



Dr. Israel Cantú Silva



Dr. Humberto González Rodríguez



Dr. José Marmolejo Monsiváis



M.C. Ma. Inés Yáñez Díaz

Diciembre, 2017

AGRADECIMIENTOS

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) por el apoyo económico para realizar mis estudios como Maestra en Ciencias Forestales.

A la Facultad de Ciencias Forestales de la Universidad Autónoma de Nuevo León, y su personal académico, por la disponibilidad para atender mis peticiones.

Al Dr. Israel Cantú Silva, mi director de tesis, por su apoyo y motivación en este proceso de aprendizaje como investigador, por sus consejos y enseñanzas, por su comprensión, estoy muy agradecida por ser un ejemplo a seguir no solo como investigador sino como persona.

Al Dr. Humberto González Rodríguez por su interés en el proceso de formación como investigador, por sus aportaciones y sugerencias en la elaboración de mi investigación.

Al Dr. José Gpe. Marmolejo Monsiváis por su tiempo dedicado a la formación y desarrollo de esta investigación, así como sus consejos y sugerencias.

A MC. Ma. Inés Yáñez Díaz por formar parte de mi comité como Co-asesor externo, por su apreciable tiempo y enseñanzas, por formar parte de mi investigación en todos los sentidos, por su paciencia en el desarrollo y culminación de mi investigación y por ser una persona muy apreciable.

Al personal administrativo de la Facultad de Ciencias Forestales, a Deyanira Reséndiz, Yesenia Sánchez y Janeth Cortés por su tiempo y apoyo en mis dudas y trámites dentro de la institución.

A mis amigos y compañeros por su grata compañía en el desarrollo de mi profesión.

DEDICATORIA

A Dios por darme la dicha de culminar esta etapa de mi vida, en la cual conocí personas valiosas que me enseñaron a ser una mejor profesionalista y persona.

A mi padre Víctor Manuel Béjar Nava y a mi madre Verónica Pulido Elías
Por darme la vida, por su apoyo para culminar mis estudios profesionales,
por su cariño y comprensión.

A mis hermanos:

María Dolores Béjar Pulido, Víctor Manuel Béjar Pulido, Shaore Verónica Béjar Pulido y Eridanvs Israel Béjar Pulido, por formar parte de mi vida, consejos, enseñanzas y aprendizaje, por su amor y comprensión como familia.

A mi tía y abuela Teresa Pulido Elías, Teresa Elías Cerna por su apoyo, comprensión y cariño como mi familiar.

A mis sobrinos Ian Gabriel, Carlos Saúl y Alejandro, por hacer más feliz mi vida con su llegada y por el amor que me hacer sentir.

A la Familia Luna Robles; Manuela, Jorge, Mando, Choche y Katia por apoyarme en mi carrera.

A mis amigos:

Erik Orlando Luna Robles y Mayela Isabel Liñán González
Por ser los mejores amigos en mi vida, por su apoyo y comprensión, por formar parte de esta etapa tan importante para mí, por todo lo que no se puede describir con palabras....

Al Dr. Israel Cantú Silva

Por ser la mejor persona, por su apoyo en los momentos más difíciles y por sus sabios consejos.

A M.C. Ma. Inés Yáñez Díaz

Por ser más que mi guía una amiga, por tu ayuda, comprensión y paciencia.

***“Investigar es ver lo que todo el mundo ha visto,
y pensar lo que nadie más ha pensado”.***

Albert Szent-Györgyi

CONTENIDO

| | |
|--|-----|
| ÍNDICE DE CUADROS | I |
| ÍNDICE DE FIGURAS | II |
| RESUMEN | III |
| ABSTRACT | IV |
| 1. INTRODUCCIÓN | 1 |
| 2. ANTECEDENTES | 3 |
| 2.1. Dinámica de nutrientes en la precipitación | 3 |
| 2.1.1. Entradas, pérdidas y reservorios de nutrientes..... | 3 |
| 2.1.2. Dinámica del agua y nutrientes..... | 4 |
| 2.2. Vías de redistribución de la precipitación | 4 |
| 2.2.1. Precipitación incidente | 5 |
| 2.2.2. Precipitación directa..... | 5 |
| 2.2.3. Escurrimiento fustal | 5 |
| 2.3. Precipitación neta | 6 |
| 2.4. Lavado de nutrientes | 6 |
| 2.5. Nutrición mineral de las plantas | 7 |
| 2.5.1. Los elementos minerales: elemento esencial | 8 |
| 2.5.2. Clasificación de los elementos minerales | 8 |
| 2.5.3. Macronutrientes | 9 |
| 2.5.3.1. Magnesio (Mg) | 9 |
| 2.5.3.2. Potasio (K) | 9 |
| 2.5.3.3. Calcio (Ca) | 10 |
| 2.5.3.4. Sodio (Na) | 10 |

| | |
|--|----|
| 2.5.4. Micronutrientes | 11 |
| 2.5.4.1. Zinc (Zn)..... | 11 |
| 2.5.4.2. Cobre (Cu) | 11 |
| 2.5.4.3. Manganeso (Mn) | 11 |
| 2.5.4.4. Hierro (Fe) | 11 |
| 3. JUSTIFICACIÓN..... | 12 |
| 4. HIPÓTESIS..... | 13 |
| 5. OBJETIVOS..... | 13 |
| 5.1. General..... | 13 |
| 5.2. Específicos | 13 |
| 6. MATERIALES Y MÉTODOS..... | 14 |
| 6.1. Caracterización física | 14 |
| 6.1.1. Localización y descripción del área de estudio..... | 14 |
| 6.1.2. Clima..... | 14 |
| 6.1.3. Vegetación..... | 14 |
| 6.1.4. Suelo..... | 15 |
| 6.2. Descripción de la especie evaluada | 15 |
| 6.3. Medición de los componentes de la precipitación | 17 |
| 6.3.1. Precipitación directa (P_d)..... | 18 |
| 6.3.2. Precipitación incidente (P_i) | 18 |
| 6.3.3. Escurrimiento fustal (S_f)..... | 18 |
| 6.4. Pluviolavado | 19 |
| 6.5. Colecta y preservación de muestras | 20 |
| 6.6. Análisis químicos..... | 21 |
| 6.7. Deposición total de nutrientes | 22 |

| | |
|--|----|
| 6.8. Determinación de incorporación y remoción de nutrientes..... | 23 |
| 6.9. Análisis estadístico..... | 24 |
| 6.9.1. Prueba de normalidad de Kolmogorov-Smirnov..... | 24 |
| 6.9.2. Prueba de Kruskal-Wallis..... | 24 |
| 6.9.3. Regresiones lineales..... | 24 |
| 7. RESULTADOS..... | 26 |
| 7.1. Precipitación neta y precipitación incidente..... | 26 |
| 7.2. Deposición total..... | 28 |
| 7.3. Concentración neta e incorporación de nutrientes..... | 31 |
| 7.4. Pluviolavado..... | 32 |
| 7.4.1. pH..... | 32 |
| 7.4.2. Conductividad eléctrica..... | 33 |
| 7.4.3. Análisis estadístico del pluviolavado..... | 34 |
| 7.5. Análisis estadístico para la concentración de nutrientes..... | 36 |
| 7.5.1. Prueba de Kruskal-Wallis para macronutrientes..... | 36 |
| 7.5.2. Prueba de Kruskal-Wallis para micronutrientes..... | 38 |
| 7.6. Regresiones lineales..... | 39 |
| 7.6.1. Precipitación incidente..... | 40 |
| 7.6.2. Precipitación neta..... | 42 |
| 8. DISCUSIÓN..... | 44 |
| 9. CONCLUSIONES..... | 47 |
| 10. BIBLIOGRAFÍA..... | 49 |

ÍNDICE DE CUADROS

| | |
|--|----|
| Cuadro 1. Deposición total de macronutrientes bajo las diferentes vías en <i>P. cooperi</i> . | 29 |
| Cuadro 2. Deposición total de micronutrientes bajo las diferentes vías en <i>P. cooperi</i> . | 29 |
| Cuadro 3. Entrada de nutrientes (Pi) concentración neta e incorporación de nutrientes en <i>P. cooperi</i> macronutrientes. | 31 |
| Cuadro 4. Entrada de nutrientes (Pi) concentración neta e incorporación de nutrientes en <i>P. cooperi</i> micronutrientes. | 32 |
| Cuadro 5. Promedio y desviación estándar de pH en precipitación directa (Pd), precipitación incidente (Pi) y escurrimiento fustal (Sf). | 32 |
| Cuadro 6. Promedio y desviación estándar de C.E. en precipitación directa (Pd), precipitación incidente (Pi) y escurrimiento fustal (Sf). | 34 |
| Cuadro 7. Análisis de varianza (Kruskal-Wallis) en las variables de pH y conductividad eléctrica en las diferentes vías de redistribución. | 35 |
| Cuadro 8. Análisis de varianza (Kruskal-Wallis) de los macronutrientes en las diferentes vías de redistribución. | 37 |
| Cuadro 9. Análisis de varianza (Kruskal-Wallis) de los micronutrientes en las diferentes vías de redistribución. | 38 |
| Cuadro 10. Estadísticos descriptivos en la precipitación incidente y deposición de macro y micronutrientes. | 41 |
| Cuadro 11. Estadísticos descriptivos en la precipitación neta y deposición de macro y micronutrientes. | 43 |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 1. Ubicación geográfica del área de estudio, Instituto Tecnológico de El Salto, Durango..... | 14 |
| Figura 2. <i>P. cooperi</i> ; A) Árbol, B) Ramillas, C) Corteza, D) Acículas y E) Cono..... | 17 |
| Figura 3. Modelo de canaleta empleado para medir la precipitación directa en <i>P. cooperi</i> | 18 |
| Figura 4. Descortezado y colocación de manguera para la medición del escurrimiento fustal..... | 19 |
| Figura 5. Toma de lecturas de pH y C.E. de las muestras obtenidas..... | 20 |
| Figura 6. Filtrado de muestras, para eliminación de impurezas después de la colecta..... | 21 |
| Figura 7. Preparación de muestras para lectura de los nutrientes, con empleo de estándares..... | 22 |
| Figura 8. Relación de precipitaciones (mm) a lo largo de 42 eventos; precipitación incidente y Neta bajo el estrato arbóreo de <i>P. cooperi</i> | 27 |
| Figura 9. Valores mensuales de la precipitación neta y precipitación incidente..... | 28 |
| Figura 10. Porcentajes de la deposición total (Pd+Sf) de macronutrientes bajo la cobertura de <i>P. cooperi</i> | 30 |
| Figura 11. Porcentajes de la deposición total (Pd+Sf) de micronutrientes bajo la cobertura de <i>P. cooperi</i> | 30 |
| Figura 12. Comportamiento de pH en precipitación directa (Pd), precipitación incidente (Pi) y escurrimiento fustal (Sf) bajo el dosel de <i>P. cooperi</i> | 33 |
| Figura 13. Comportamiento de la conductividad eléctrica en precipitación directa (Pd), precipitación incidente (Pi) y escurrimiento fustal (Sf) bajo el dosel de <i>P. cooperi</i> | 34 |
| Figura 14. Relación entre precipitación incidente (mm) y deposición incidente (kg/ha) en macronutrientes..... | 40 |
| Figura 15. Relación entre precipitación incidente (mm) y deposición incidente (g/ha) en micronutrientes..... | 41 |
| Figura 16. Relación entre precipitación neta (mm) y deposición total (Kg ha ⁻¹) en macronutrientes..... | 42 |
| Figura 17. Relación entre precipitación neta (mm) y deposición total (g ha ⁻¹) en micronutrientes..... | 43 |

RESUMEN

La precipitación se considera como una de las formas más importantes de entrada de nutrientes a los ecosistemas forestales, esta ingresa al suelo mediante tres vías de redistribución: Precipitación Incidente (Pi), Precipitación Directa (Pd) y Escurrimiento fustal (Sf). Se evaluaron 42 eventos en los cuales se registraron, los volúmenes de precipitación, así como la composición química: pH, conductividad eléctrica, deposición de macro y micronutrientes (Ca, Na, Mg, K, Zn, Mn, Fe y Cu). El objetivo de la presente investigación fue determinar la deposición total, incorporación y remoción de nutrientes vía *Pi*, *Pd* y *Sf*. Además, de la relación precipitación/deposición, para determinar diferencias en la concentración de nutrientes. Se aplicó una prueba de comparación (Kruskal-Wallis) entre las vías ya señaladas, bajo la cubierta vegetal de *Pinus cooperi*. El nutriente con la mayor deposición e incorporación fue Ca con 42.89 y 21.74 Kg ha⁻¹, respectivamente. El Cu presentó el menor aporte y acumuló 21.16 y 16.34 g ha⁻¹. El resto de los nutrientes presentaron un comportamiento de mayor a menor en Pd: Ca>Na>K>Mg>Mn>Fe>Zn>Cu, Pi: Ca>Na>K>Mg>Mn>Zn>Fe>Cu y para Sf: Ca>K>Na>Mg>Mn>Fe>Zn>Cu. Este comportamiento se puede asociar con la deposición de partículas sólidas en las superficies del follaje y ramas, así como propiedades morfológicas y fisiológicas de las especie.

Palabras Clave: Precipitación; Macronutrientes; Micronutrientes; *Pinus cooperi*; Aporte de nutrientes

ABSTRACT

Precipitation is considered as one of the most important forms of nutrient input to forest ecosystems, it enters the soil through three redistribution pathways: Gross rainfall (Pi), Throughfall (Pd) and Stemflow (Sf). 42 events were evaluated in which the volumes of rainfall were recorded, as well as chemical composition: Ph, C.E., macro and micronutrients (Ca, Na, Mg, K, Zn, Mn, Fe and Cu). The objective of the present investigation was to determine the total deposition, incorporation and extraction of nutrients through Pi, Pd and Sf, in addition to the precipitation/deposition relation, to determine the differences in nutrients concentration, a comparison test was applied among the routes already indicated, under a vegetation cover of *Pinus cooperi*. The nutrient with the highest deposition and incorporation was Ca with 42.89 and 21.74 Kg ha⁻¹ respectively. Cu showed the lowest input and accumulated 21.16 and 16.34 g/ha⁻¹. The rest of the nutrients presented a behavior from highest to lowest for Pd: Ca>Na>K>Mg>Mn>Fe>Zn>Cu, Pi: Ca>Na>K>Mg>Mn>Zn>Fe>Cu and for Sf: Ca>K>Na>Mg>Mn>Fe>Zn>Cu. This behavior can be associated with the deposition of solid particles on foliage surfaces and branches, as well as morphological and physiological properties of the species.

Keywords: Precipitation; Macronutrients; Micronutrients; *Pinus cooperi*; Nutrients input

1. INTRODUCCIÓN

El conocimiento del movimiento del agua es vital para la comprensión de la dinámica de los nutrientes en los ecosistemas, ya que se constituye en un factor clave para el desarrollo de procesos físicos, químicos y biológicos que soportan esta dinámica; de allí la importancia de conocer la interrelación entre ellos y su funcionamiento en ecosistemas naturales y transformados (Arroyave, 2012). En los ecosistemas terrestres y espacialmente los situados en las regiones húmedas los flujos de nutrientes y su ciclaje, están íntimamente ligados a la redistribución de la lluvia dentro de ellos (Likens, 1995). El agua retenida por la parte aérea de la planta está influenciada por la variabilidad de la vegetación, forma e inserción de las hojas, la duración de las lluvias (cantidad de lluvia, pérdida por evaporación de las hojas) y en menor proporción, por la turbulencia atmosférica (Klaassen *et al.*, 1996). La alteración de la composición del agua de lluvia con el contacto de los tejidos de las plantas ha sido reconocida desde 1804 por N. Theodore de Saussure (Tukey, 1970; Méndez, 1997).

Los ciclos de nutrientes en los bosques y en general, las áreas con vegetación incluyen un conjunto complejo de mecanismos de retroalimentación directos entre el suelo y las plantas. La superficie vegetal constituye un sistema abierto donde entran y salen elementos químicos de manera continua, ciclos que comúnmente se denominan biogeoquímicos (Bruijnzeel, 1990). La dinámica de los nutrientes en los ecosistemas se encuentra íntimamente relacionada con el ciclo hídrico en lo referente a lavado de nutrientes. La presencia de eventos ácidos puede influir en el tipo de elementos que se movilizan del dosel o bien, el paso del agua a través de las hojas y ramas puede remover cantidades importantes de cationes básicos; sin obviar, la relación existente en muchos casos de la disminución de concentración de nutrientes conforme aumenta el volumen del agua. Se ha documentado que el 28% del total de nutrientes son lavados en los primeros 5 mm de lluvia en las tormentas, mostrando la relación directa que tiene el agua de lluvia en la movilización de elementos dentro de los ecosistemas (Rodríguez *et al.*, 2006).

Los nutrientes en plantas pueden ser clasificados como macronutrientes y micronutrientes. Los macronutrientes se encuentran y son necesarios para las plantas en relativamente más altas cantidades que los micronutrientes. El contenido del macronutriente en el tejido de la planta es generalmente miles de veces más grande que un micronutriente. Usando esta clasificación basada sobre el contenido del elemento en el material de la planta los siguientes elementos pueden ser definidos como macronutrientes: C, H, O, N, S, P, K, Ca y Mg. Los micronutrientes son: Fe, Mn, Cu, Zn, Mo, B y Cl (Méndez, 1997).

México cuenta con 71 especies de pinos de las cuales el 50% son endémicas (Lovejoy, 1988). *Pinus cooperi* C.E. Blanco se encuentra dentro de ellas, además, representa una gran importancia económica en el aprovechamiento forestal maderable del estado de Durango, ya que se encuentra entre las primeras tres especies bajo aprovechamiento. El análisis de esta especie representa gran valor, ya que es requerida para la reforestación de áreas bajo manejo, conocer el aporte de nutrientes es indispensable para la selección de especies con una mayor capacidad de sobrevivencia en campo.

El objetivo principal de esta investigación es caracterizar y cuantificar la incorporación de nutrientes aportados por la precipitación en cada una de sus vías de redistribución en la cobertura de *P. cooperi* C.E. Blanco en la temporada de lluvias que comprende los meses de Junio a Septiembre del año 2016 en “El Salto”, Durango.

De acuerdo a la clasificación de Méndez (1997) se tomaron en cuenta los macronutrientes y micronutrientes que no sufrieran alguna modificación durante el tiempo de almacenamiento, por ello se decidió evaluar como macronutrientes: Na, Ca, Mg y K; y micronutrientes: Mg, Cu, Fe y Zn.

2. ANTECEDENTES

2.1. Dinámica de nutrientes en la precipitación

Las interrelaciones entre la nutrición mineral y la hidrología son numerosas y por esto el estudio de los movimientos del agua y los nutrientes son vitales para la comprensión de la dinámica de los ecosistemas naturales y transformados. Además, del ciclo de nutrientes dependen otras funciones del ecosistema como la fotosíntesis y la respiración. Por tanto, la pérdidas de nutrientes en el sistema, interrupción en los procesos de ciclaje y captura de nutrientes o desequilibrio en el estado nutricional están asociados con declinaciones en la productividad y estabilidad de los ecosistemas. Teniendo en cuenta la importancia del agua dentro del ciclo de nutrientes, al considerarse como un decisivo medio en la transferencia de elementos hacia, a través y desde el ecosistema, se expone en forma breve el movimiento del agua en los ecosistemas, los procesos involucrados en el ciclo de nutrientes y los compartimientos reservorios de agua y nutrientes (Arroyave, 2012).

El movimiento de los elementos químicos en los ecosistemas es un proceso complejo que ha sido clasificado en tres ciclos: *geoquímico*, el cual se presenta a una escala amplia e incluye los intercambios de elementos entre ecosistemas; *biogeoquímico*, donde el intercambio de elementos se lleva a cabo dentro de un mismo ecosistema y el ciclo *bioquímico* que consiste en la redistribución de elementos dentro del mismo individuo (Kimmis, 2004).

2.1.1. Entradas, pérdidas y reservorios de nutrientes

El ciclo de nutrientes al ser considerado como un sistema abierto que ocurre en todos los ecosistemas, está conformado por entradas o ganancias, salidas o pérdidas, compartimientos (reservorios de nutrientes), mecanismos de conservación de los nutrientes y procesos (flujos) que intervienen en el transporte u obtención de los elementos, siendo la hidrología un proceso importante en todo el proceso (Arroyave, 2012).

Entre las vías de entrada de nutrientes a los ecosistemas se encuentra la precipitación, el polvo atmosférico, la absorción directa de gases por la

vegetación, la meteorización de las rocas, la descomposición de la materia orgánica, la fijación simbiótica o asimbiótica del nitrógeno atmosférico, la acumulación de aerosoles sobre la vegetación, la inmovilización y la adición de fertilizantes. Las pérdidas o salidas de los nutrientes incluyen lixiviación, erosión, cosecha de árboles y productos no maderables, pérdida por gases (durante las quemadas), volatilización, desnitrificación y drenaje. Como reservorios de nutrientes se consideran los tallos, hojas, raíces, animales, residuos vegetales, la fauna del suelo, las partes de la vegetación que mueren y se convierten en hojarasca y los nutrientes que se encuentran disponibles en forma mineral, entre los cuales se dan flujos de intercambio constantes (Folster y Khana, 1997).

Las entradas agrupan todas las fuentes posibles de alimentación hídrica, como son las precipitaciones, las nieblas o neblinas y el rocío, y los aportes ascendentes a partir de la capa acuífera o laterales por flujo subsuperficial de los cauces de agua (Aboal, 1998).

2.1.2. Dinámica del agua y nutrientes

El agua que ingresa a un ecosistema presenta variaciones temporales y espaciales ya que depende del régimen de lluvias, la posición geográfica de la región, la temperatura, la vegetación, la circulación planetaria de las masas de nubes y aire, entre otros factores (Fassbender, 1993).

2.2. Vías de redistribución de la precipitación

Precipitación es cualquier agua meteórica recogida sobre la superficie terrestre. Esto incluye básicamente: lluvia, nieve y granizo (también rocío y escarcha que en algunas regiones constituyen una parte pequeña pero apreciable de la precipitación total). En relación a su origen, pueden distinguirse los siguientes tipos:

Las *ciclónicas* son las provocadas por los frentes asociados a una borrasca o ciclón. La mayor parte del volumen de precipitación recogido en una cuenca se debe a este tipo de precipitaciones.

Las de *convección* se producen por el ascenso de bolsas de aire caliente; son las tormentas de verano.

Las precipitaciones *orográficas* se presentan cuando masas de aire húmedo son obligadas a ascender al encontrar una barrera montañosa. El estudio de las precipitaciones es básico dentro de cualquier estudio hidrológico regional, para cuantificar los recursos hídricos, puesto que constituyen la principal (en general la única) entrada de agua a una cuenca (Sánchez, 2008).

El lavado del dosel vegetal es un proceso importante que representa la transferencia de nutrimentos del dosel al suelo (Peña *et al.*, 2016).

2.2.1. Precipitación incidente

La precipitación incidente se refiere a la lluvia que es obstaculizada por la vegetación, está es considerada como el total de la lluvia interceptada por el dosel, de la cual una parte queda incorporada o se pierde por factores como evaporación o transpiración (Yáñez *et al.*, 2014).

2.2.2. Precipitación directa

La precipitación directa se refiere a la lluvia debajo del dosel; es decir, la cantidad de agua que fluye por el dosel a través de claros, o por goteo de las hojas y ramas. La precipitación directa es considerada la principal fuente de abastecimiento de agua al suelo; por lo general, sus aportes constituyen entre el 74 y el 80% de la precipitación incidente. El nivel que existe entre el dosel y el suelo, así como los claros entre el dosel y las condiciones del viento son características que influyen en la cantidad de precipitación directa (Cantú y González, 2001).

2.2.3. Escurrimiento fustal

El escurrimiento cortical o fustal es la fracción de precipitación que hace contacto con la cubierta y fluye hacia abajo por el fuste, alcanzando el suelo circundante a la base de éstos. Las cantidades de escurrimiento cortical están relacionadas de manera directa con la arquitectura del árbol (Yáñez *et al.*, 2014).

2.3. Precipitación neta

El agua y por tanto los nutrientes que ingresan a los ecosistemas a través de la precipitación puede tomar dos caminos para llegar hasta la superficie del suelo: como flujo a través del dosel y como escurrimiento a través de los troncos de los árboles.

La fracción de lluvia que llega al suelo a través de la copa de los árboles se denomina precipitación neta (Pn) y se compone de dos porciones diferentes: una parte, la precipitación directa (Pd) que fluye la cubierta hacia el suelo y otra parte el escurrimiento fustal (Sf) (Aboal, 1998).

Tobón (1999) definió precipitación neta como la suma de la proporción de la precipitación que fluye a través del dosel e ingresa a la superficie del suelo y el flujo o escurrimiento del agua a través de las ramas y el tronco de los árboles, la cual alcanza finalmente la superficie del suelo. Estos dos flujos son de gran importancia en la cuantificación del balance de nutrientes en los ecosistemas. Sin embargo, existen diferencias tanto en cantidad de agua como en la concentración de nutrientes entre estos dos flujos. El escurrimiento a través de los troncos de los árboles es el flujo de menor contribución en términos de cantidad de agua, pero de mayor concentración de nutrientes (Tobón *et al.*, 2000), asimismo, el flujo de nutrientes en la lluvia neta es mayor en los sistemas con doseles más cerrados (Tobón *et al.*, 2000; Schrot, 2001). La concentración de algunos elementos puede aumentar en la lluvia neta debido a que al evaporarse el agua, algunos elementos quedan en la superficie de las hojas y son posteriormente lavados por el agua de la lluvia (Li *et al.*, 1997).

2.4. Lavado de nutrientes

Los primeros estudios acerca de la composición química de la precipitación fueron realizados por Junge y Werby (1958), quienes evaluaron los efectos de la precipitación ácida en los ecosistemas. Actualmente, España es uno de los países que se ha interesado por el estudio de la composición química de la precipitación (Bellot y Escarre, 1988; Domingo, 1991, Camarero y Catalán, 1993; Romero, 2007; entre otros).

Uno de los primeros estudios realizados de pluviolavado en México en especies de *Pinus* lo realizaron Cantú y González (2001) quienes evaluaron las pérdidas por intercepción y cuantificación de la influencia de la copa en la deposición de nutrientes en *Pinus pseudostrobus* Lind., *Quercus* spp. y en un bosque mixto (Pino-Encino) por medio del flujo de la precipitación en el dosel y fuste del árbol, en bosques naturales del noreste de México.

El agua de lluvia que se deposita sobre la vegetación se enriquece de elementos minerales; los productos excretados por las hojas son, en efecto, arrastrados por el agua, junto con una parte importante de la microflora, así como el polvo atmosférico depositado previamente sobre las hojas; esta agua que fluye la cubierta vegetal (o dosel arbóreo) la denominamos "pluviolavado", "translocación" o "throughfall" (Santa *et al.*, 1989).

Tukey (1966) estudió el mecanismo de este fenómeno de secreción cuticular, que depende de la edad de las hojas, las especies vegetales y de las variedades. Por otra parte, el agua que fluye por las ramas y troncos (lo que denominamos "escurrimiento fustal o cortical" o "stemflow") le confiere ciertas características importantes a la zona próxima al tronco del árbol, lo cual ha sido también tema de estudio de otros autores (Slatyer, 1962). De acuerdo a las propiedades físicas, químicas e hidráulicas del suelo, este puede almacenar agua y nutrientes, convirtiéndolo en una reserva de donde las plantas absorben las cantidades necesarias para sus ciclos de agua y energéticos (Fassbender, 1987).

Rodríguez *et al.* (2006) ha documentado que la mayor concentración de nutrientes es lavado durante los primeros 5 mm de lluvia, por ello, se clasificó la cantidad de lluvia de la precipitación incidente y neta.

2.5. Nutrición mineral de las plantas

Con la energía tomada de la luz solar y el agua, como donador primario de electrones en procesos reductores de síntesis, las plantas pueden producir el

resto de las moléculas necesarias para su existencia a partir de elementos minerales tomados del suelo, normalmente en forma iónica y de la atmósfera. La falta de disponibilidad o el exceso de alguno de ellos cursan normalmente con graves alteraciones de desarrollo e incluso con la muerte de la planta.

2.5.1. Los elementos minerales: elemento esencial

Aunque limitada, las plantas tienen capacidad para absorber y acumular elementos no necesarios para su crecimiento, en consecuencia, ni la presencia ni la concentración de un elemento mineral son criterios de la esencialidad. En 1939, Arnon y Stout definieron las características para considerar un elemento esencial para una planta:

- Su ausencia debe impedir completar el ciclo vital.
- Debe tener al menos una clara y determinada función fisiológica no realizable por otro elemento.
- Debe formar parte de una molécula esencial o debe ser requerido para una reacción enzimática.

2.5.2. Clasificación de los elementos minerales

Los elementos esenciales se pueden clasificar según:

- La concentración en la planta (Epstein, 1999)
 - Macronutrientes: (>0.1%): H, C, O, N, K, Ca, Mg, P y S.
 - Micronutrientes: (<0.1%): Cl, Fe, B, Mn, Zn, Cu y Mo.
- La función bioquímica o biológica (Mengel y Kirby, 1978)
 - Elementos formadores de compuestos orgánicos: N y S
 - Elementos relacionados con la conservación de energía y/o compuestos estructurales: P y B
 - Elementos que permanecen como iones: K, Mg, Ca, Mn y Cl
 - Elementos involucrados en reacciones redox: Fe, Cu, Zn, Mo
- La movilidad y la translocación en la planta:
 - Elementos móviles: N, K, Mg, P, Cl, Zn y Mo
 - Elementos inmóviles: Ca, S, Fe, B y Cu

El suministro y absorción de componentes químicos necesarios para el crecimiento y metabolismo puede ser definido como nutrición y los componentes químicos requeridos por un organismo son llamados nutrientes. Para que un elemento sea considerado esencial debe cumplir con los siguientes requisitos:

- A. La planta no completa su ciclo de vida en ausencia del elemento mineral,
- B. La función del elemento no debe ser reemplazable por otro elemento mineral,
- C. El elemento debe implicarse directamente en el metabolismo de las plantas (Méndez, 1997).

2.5.3. Macronutrientes

2.5. 3.1. Magnesio (Mg)

Para realizar un trabajo adecuado, muchas de las enzimas pertenecientes a las células de las plantas necesitan magnesio. Sin embargo, la función más importante de este elemento es la de átomo central en la molécula de clorofila. La clorofila es el pigmento que da a las plantas su color verde y lleva a cabo el proceso de la fotosíntesis; también interviene en la activación de un sinnúmero de enzimas necesarias para su desarrollo y contribuye a la síntesis de proteínas (Cakman y Yazici, 2010).

2.5.3.2. Potasio (K)

Las plantas absorben el potasio en su forma iónica, K^+ . En la fotosíntesis, el potasio regula la apertura y cierre de las estomas, y por tanto, regula la absorción de CO_2 .

En las plantas, el potasio desencadena la activación de enzimas y es esencial para la producción de adenosina trifosfato (ATP). El ATP es una fuente de energía importante para muchos procesos químicos que tienen lugar en las células de la planta. El potasio desempeña un rol importante en la regulación del agua en las plantas (osmo-regulación). Tanto la absorción de agua a través de

raíces de las plantas y su pérdida a través de los estomas, se ven afectados por el potasio. El potasio también mejora la tolerancia de la planta al estrés hídrico.

La síntesis de proteínas y de almidón en las plantas requiere de potasio. El potasio es esencial en casi todos los pasos de la síntesis de proteínas. En la síntesis de almidón, la enzima responsable del proceso está activada por el potasio. Además, el potasio tiene un rol importante en la activación de enzimas relacionadas con el crecimiento de la planta (Guy, 2017).

2.5.3.3. Calcio (Ca)

El calcio, en la forma de pectato de calcio, es responsable de mantener unidas las paredes celulares de las plantas. Cuando el calcio es deficiente, los tejidos nuevos tales como: los meristemos de las raíces, las hojas jóvenes y los brotes a menudo presentan un crecimiento distorsionado debido a la formación incorrecta de la pared celular. El calcio también se utiliza para activar ciertas enzimas y enviar señales que coordinan ciertas actividades celulares.

El transporte de calcio a las hojas parece estar más relacionado con la tasa de crecimiento de las raíces que con la de los brotes. Por otra parte, el calcio tiende a reducir la permeabilidad de las raíces jóvenes, lo que provoca la expansión de éstas y también la de sus pelillos radiculares, lo que potencia una mayor y más eficaz exploración del suelo (Monge *et al.* 1994).

2.5.3.4. Sodio (Na)

El sodio no es un elemento esencial para las plantas, pero puede ser usado en pequeñas cantidades, al igual que los micronutrientes, como auxiliar para el metabolismo y la síntesis de clorofila. En algunas plantas, puede ser empleado como sustituto parcial de potasio y es útil en la apertura y el cierre de estomas, lo cual ayuda a regular el equilibrio interno de agua. (PRO-MIX, 2016).

2.5.4. Micronutrientes

2.5.4.1. Zinc (Zn)

El zinc es uno de los micronutrientes esenciales para las plantas, es necesario en pequeñas cantidades. Activa las enzimas responsables de la síntesis de ciertas proteínas. Es utilizado en la formación de clorofila y algunos carbohidratos, y en la conversión de almidones en azúcares; su presencia en el tejido foliar ayuda a las plantas a resistir las bajas temperaturas. Es fundamental en la formación de auxinas, mismas que coadyuvan a la regulación del desarrollo y a la elongación del tallo (Mengel y Kirkby, 1978).

2.5.4.2. Cobre (Cu)

La función del cobre en las plantas, el cobre activa ciertas enzimas implicadas en la síntesis de lignina y es esencial para diversos sistemas enzimáticos. También, es necesario en el proceso de la fotosíntesis, esencial para la respiración de las plantas y coadyuvante de éstas en el metabolismo de carbohidratos y proteínas. Además, el cobre ayuda a intensificar el sabor, el color en las hortalizas y en las flores (Epstein, 1972).

2.5.4.3. Manganeso (Mn)

Respecto a las plantas, es uno de los elementos que más contribuyen al funcionamiento de varios procesos biológicos incluyendo la fotosíntesis, la respiración y la asimilación de nitrógeno. También interviene en la germinación del polen, el crecimiento del tubo polínico, el alargamiento celular en la raíz y la resistencia a patógenos de la misma (Epstein, 1972).

2.5.4.4. Hierro (Fe)

El hierro es un constituyente de varias enzimas y algunos pigmentos; ayuda a reducir los nitratos y sulfatos y a la producción de energía dentro de la planta. Aunque el hierro no se usa en la síntesis de la clorofila (el pigmento verde de las hojas), es esencial para su formación. Esto explica por qué la deficiencia de hierro manifiesta clorosis en las hojas nuevas (PRO-MIX, 2016).

3. JUSTIFICACIÓN

La presente investigación tiene por objeto determinar el aporte de nutrientes en *Pinus cooperi*, lo cual es de utilidad para la selección de especies en reforestaciones que puedan tener un mayor aporte de nutrientes en suelos degradados para su posterior recuperación y reconocer la importancia ecológica de esta especie. Además, es representativa de la región, así como, una de las principales bajo aprovechamiento forestal, lo que implica un mayor enfoque, la importancia de esta investigación radica en la incorporación y/o remoción vía precipitación de nutrientes en un ecosistema forestal, considerando aspectos atmosféricos y biológicos (fisiológicos y morfológicos) que pueden influir en la presencia dentro de un ecosistema.

4. HIPÓTESIS

No existen diferencias en la deposición e incorporación de macro y micro nutrientes en las diferentes vías de redistribución de la lluvia, en coberturas de *Pinus cooperi*.

5. OBJETIVOS

5.1. General

Caracterizar el comportamiento de la deposición e incorporación de macro y micronutrientes del estrato arbóreo de *Pinus cooperi* C.E. Blanco, bajo las diferentes vías de redistribución de lluvia y escurrimiento fustal en “El Salto”, Durango.

5.2. Específicos

- Determinar la deposición total de macro y micronutrientes bajo las diferentes vías de redistribución de lluvia, en el estrato arbóreo de *P. cooperi*.
- Cuantificar la deposición neta de nutrientes y a su vez determinar la incorporación y/o remoción de nutrientes en la precipitación bajo las diferentes vías de redistribución.
- Comparar la concentración de macro y micronutrientes considerando las vías de redistribución por evento de lluvia.
- Determinar la influencia de la precipitación en la deposición de nutrientes.

6. MATERIALES Y MÉTODOS

6.1. Caracterización física

6.1.1. Localización y descripción del área de estudio

El área de estudio se encuentra ubicada en el Municipio de El Salto, Durango (Figura 1), en la Sierra Madre Occidental, a una altitud de 2,500 m, con una precipitación media anual de 1800 mm. Cabe mencionar que la investigación se estableció en el Instituto Tecnológico de El Salto (ITES), con las coordenadas N 23°47'16.02" y W 105°22'09.93".

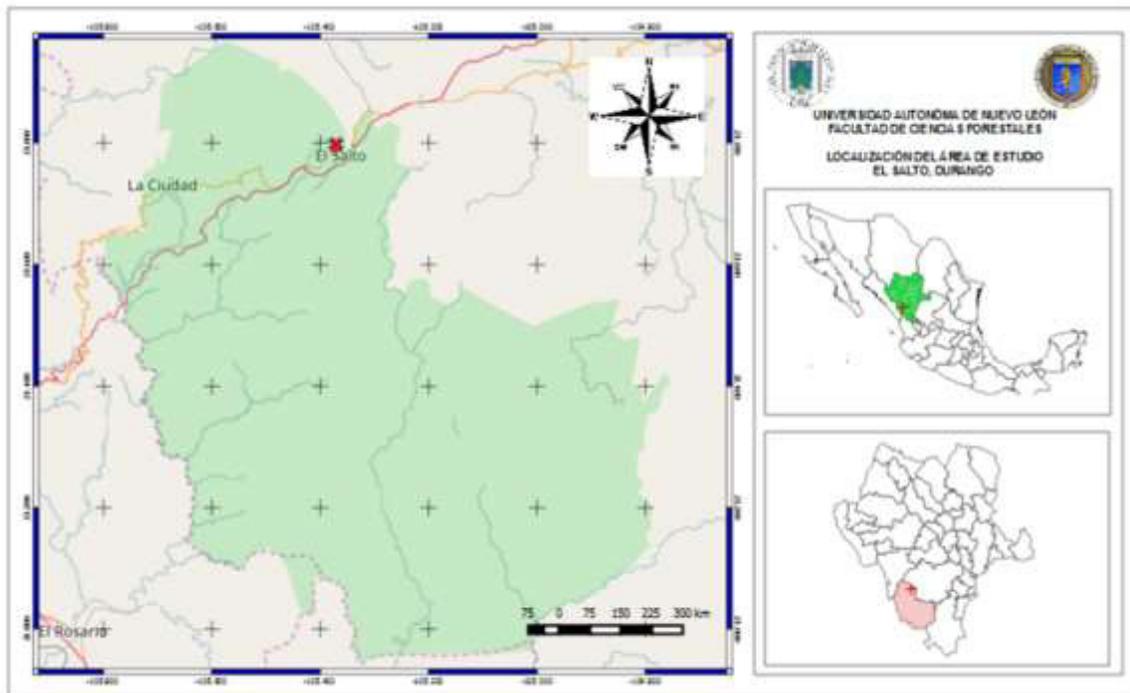


Figura 1. Ubicación geográfica del área de estudio; Instituto Tecnológico de El Salto, Durango.

6.1.2. Clima

Coexisten varios climas, destacándose los siguientes: cálido subhúmedo, cálido semifrío; la temperatura media de 3°C a 18°C y la más caliente de 6.5°C a 22°C. Presenta una precipitación media anual de o 1,800 mm con régimen de lluvias en los meses de junio, julio, agosto y septiembre, presentándose las primeras heladas en octubre y la última en junio.

6.1.3. Vegetación

Las especies predominantes son *Pinus cooperi*, *P. durangensis*, *P. leiophylla*, *P. teocote* y *P. ayacahuite*. La estructura del bosque es resultado de segundo y

tercer crecimiento, y pueden verse en general dos doseles en el estrato arbóreo: ocupando los niveles más altos los pinos, cuya altura alcanzan un máximo de más de 20 metros (UCODEFO 6, 1997). Crecen sobre suelos muy variados desde limosos a arenosos y moderadamente ácidos, por lo general con abundante materia orgánica y hojarasca.

6.1.4. Suelo

El material rocoso es el tipo de rocas ígneas extrusivas ácidas principales y en menor proporción, riolitas; existe también un área muy reducida de basalto, los suelos utilizados en agricultura se catalogan como residuales y aluviales.

Los tipos de suelos presentes en el área son: regosol, fluvisol y cambisol; son suelos someros y pedregosos, se encuentran en cualquier clima y tipo de vegetación; algunos se forman con materiales acarreados por agua.

6.2. Descripción de la especie evaluada

Nombre científico: *Pinus cooperi* C.E. Blanco

Sinonimias: *P. lutea* C.E. Blanco, *P. arizonica* Engelman var. *Cooperi* (C.E. Blanco).

Nombre común: Farjon, albarroque, balcarrote, ocote, pino amarillo, pino chino.

Árbol: de 15 a 35 m de altura y diámetro normal de 30 a 80 cm, copa densa redondeada o cónica, formada por ramas gruesas de forma signoidea, descendentes, por lo menos las inferiores y medias, o la copa puede ser irregular y laxa en sitios de calidad pobre. Ramillas erectas, muy gruesas, pero las ramillas tiernas lisas y de color azulado, corteza rugosa, de color gris a gris oscuro con placas irregulares, no desprendibles o en individuos maduros a veces con fisuras horizontales y verticales formando placas amplias de color café rojizo a castaño en la parte central. Madera ligera, fuerte, con albura amarilla o blanco amarillento (Figura 2).

Hojas: en fascículos de 3 a 5, predominante las de 5, muy raramente algunos fascículos de 6, de color verde oscuro o verde ceniciento, gruesas, tiesas y

fuertes, generalmente curvadas, agrupadas hacia el extremo de las ramillas, las de la parte superior de la ramilla erectas, de 4 a 13 cm de longitud (hasta 20 en la var. *ornelasi*), 0.9-1.3 mm de ancho, 0.6-0.9 mm de grosor, con márgenes finamente aserrados; estomas en 4 a 9 hileras sobre la cara dorsal (Figura 2).

Conos: generalmente asimétricos, ovoides a estrechamente ovoides u oblongos, ligeramente curvados, de 4 a 9 cm de largo y alrededor de 4 a 6 cm de ancho cuando abiertos, de color café rojizo, lustrosos, solitarios, en pares o en grupos de 3 a 4; pedúnculo muy corto frecuentemente oculto y el cono aparenta ser sésil o hasta de 7 cm de largo, permanece adherido a la ramilla junto con algunas escamas basales del cono cuando este se cae, o a veces cae con el cono.

Distribución: se conoce únicamente de la Sierra Madre Occidental en Durango, centro y Sur de Chihuahua y Noreste de Nayarit. En Durango; Guanaceví, Tepehuanes, Santiago Papasquiaro, San Dimas, Pueblo Nuevo, Durango, Súchil y El Mezquital.

Ecología: se localiza en bajíos y planicies de suelo profundo y en laderas poco pronunciadas, entre los 2,400 y 2,700 m de altitud. Ocasionalmente comparte el hábitat con la var. *ornelasi*. Por lo general, se encuentra formando masas puras o a veces asociado con *P. leiophylla*, *P. arizonica*, *P. teocote*, *Quercus durifolia*, *Q. sideroxylla* o *Juniperus deppeana*.

Estado de conservación: forma masas puras en amplias áreas de Durango, por lo que no presenta problemas de conservación.

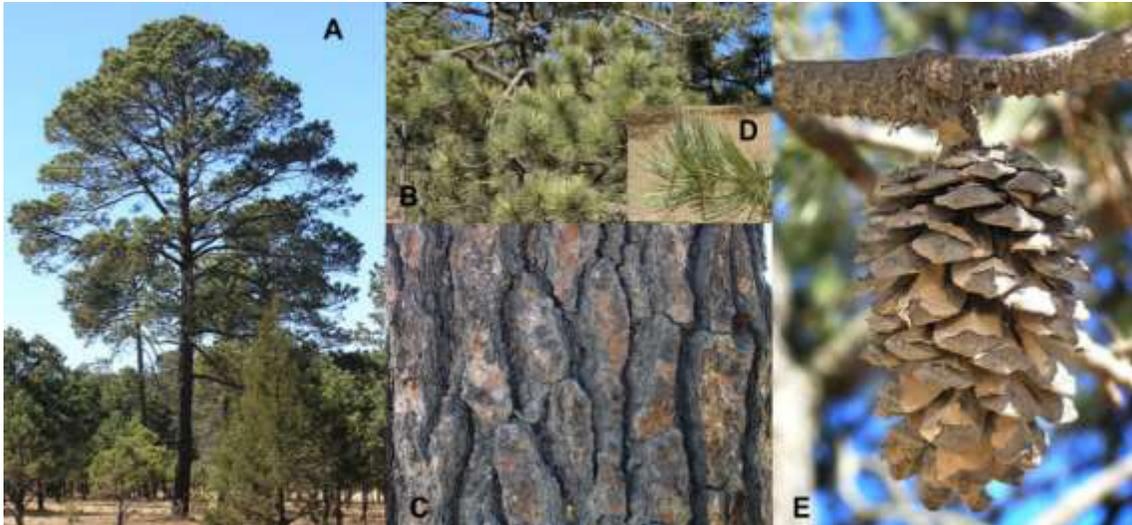


Figura 2. *Pinus cooperi*; A) Árbol, B) Ramillas, C) Corteza, D) Acículas y E) Cono.

6.3. Medición de los componentes de la precipitación

El experimento fue establecido en un área de 200 m² (parcela de 20 m X 10 m), bajo el dosel de *Pinus cooperi* C.E. Blanco en donde se instalaron 4 canaletas para medir la precipitación directa. En el caso del escurrimiento fustal dentro de la misma parcela fueron seleccionados 4 individuos al azar, en este caso se emplearon mangueras ajustadas al fuste en espiral para la colecta del escurrimiento de la precipitación. Para la medición de la precipitación incidente, de la misma manera fueron colocadas 4 canaletas en área desprovista de vegetación o cualquier otro tipo de interferencia para la caída libre de la lluvia.

El método de medición consistió en la toma de lecturas de volumen de precipitación y por cada una, la toma de muestras de 100 ml aproximadamente para su posterior análisis. Para la toma de lecturas y muestras fue considerado por evento de lluvia, la diferencia entre evento está marcada por un periodo de 8 horas sin lluvias.

La medición de dichos eventos se registró durante el periodo de lluvias comprendiendo los meses de Junio, Julio, Agosto y Septiembre del 2016, con un total de 42 eventos de lluvia.

6.3.1. Precipitación directa (P_d)

Se utilizaron canaletas hechas de tubo de PVC de 0.1 m² (10 cm de ancho x 100 cm de largo) en forma de U, conectadas por medio de mangueras a recipientes de 20 Lts, donde se colectó el agua de lluvia. Las canaletas se cubrieron con una malla para evitar la obstrucción de hojarasca e insectos; se instalaron 4 canaletas a 1.0 m sobre el suelo en un área bajo el dosel de *P. cooperi* (Figura 3).



Figura 3. Modelo de canaleta empleado para medir la precipitación directa en *Pinus cooperi*.

6.3.2. Precipitación incidente (P_i)

Para el caso de la precipitación incidente se empleó el mismo material que en la precipitación directa, cambiando únicamente la ubicación de la parcela a un área desprovista de vegetación. Se instalaron 4 canaletas a 1.0 m sobre el suelo en un área abierta sin árboles.

6.3.3. Escurrimiento fustal (S_f)

Para medir el escurrimiento fustal se seleccionaron 4 individuos de la especie *Pinus cooperi* C.E. Blanco; se usaron mangueras de plástico acerada de 3 cm de diámetro, con perforaciones de 1.5 cm x 2.5 cm, a 4 cm de intervalos, fijados a los fustes a 1 m de altura utilizándose como un tipo espiral dando dos vueltas y media al tronco, estos se prensaron al fuste preparado (sin corteza) y las partes

superiores e inferiores de las mangueras se fijaron con alambre y sellados con silicón, por donde se transportó el agua a los recipientes de 20 Lts, para su posterior lectura y toma de muestra para el análisis químico (Figura 4).



Figura 4. Descortezado y colocación de manguera para la medición del escurrimiento fustal.

6.4. Pluviolavado

Se determinó el pH y conductividad eléctrica (CE, $\mu\text{S cm}^{-1}$) de cada muestra colectada para la precipitación incidente, precipitación directa y escurrimiento fustal, mediante la medición directa con un electrodo a través de un pH-conductivímetro (Figura 5).



Figura 5. Toma de lecturas de pH y CE de las muestras obtenidas.

6.5. Colecta y preservación de muestras

La colecta de las muestras fue realizada por evento; cada evento estuvo marcado por la ausencia de lluvia durante un periodo máximo de ocho horas, pasado este tiempo se considera un nuevo evento. En campo, se tomó una muestra del agua en botes de plástico de 100 mL, después al agua restante se le tomó lectura de la cantidad de lluvia colectada por canaleta en cada una de las vías de redistribución. Una vez tomadas las muestras y lecturas, el agua sobrante fue descartada. Las muestras fueron llevadas a laboratorio donde se registró el pH y la conductividad eléctrica (CE); una vez tomados los datos, las muestras fueron filtradas con papel filtro Whatman Grado I, para la eliminación de impurezas que pudieran modificar la composición química. Posteriormente, se resguardaron en un refrigerador a una temperatura de 4°C para prevenir la pérdida de volumen y disminución de la actividad microbiana (Figura 6).



Figura 6. Filtrado de muestras, para eliminación de impurezas después de la colecta.

6.6. Análisis químicos

Para la determinación de la concentración de los micronutrientes las muestras se leyeron directamente con ayuda de un espectrofotómetro de absorción atómica (Varian, modelo SpectrAA-200) y con una curva de calibración de concentración de nutrientes conocida de cada uno de los elementos a leer; los elementos identificados como micronutrientes fueron cuantificados: Mn, Fe, Zn y Cu.

Para medir la concentración de los macronutrientes, fue necesario la elaboración de muestras por medio de diluciones a diferentes concentraciones:

- Para Sodio (Na) y Calcio (Ca), se prepararon soluciones de 1:5 con la ayuda de un supresor (KCl), cloruro de potasio, se prepararon dos muestras en una, es decir, 1 ml de muestra + 0.2 ml (KCl) + 3.8 ml de agua destilada.
- Para Magnesio (Mg), soluciones de 1:5 con (LaCl₃) cloruro de lantano, las muestras se elaboraron con una solución de: 1 ml de muestra + 0.1 ml (LaCl₃) + 3.9 ml de agua destilada.

- Para Potasio (K), soluciones de 1:5 con (CsCl) cloruro de cesio; las muestras se elaboraron con una solución de: 1 ml de muestra + 0.1 ml (CsCl) + 3.9 ml de agua destilada.

Al igual que para los micronutrientes, fue necesario la elaboración de curvas de calibración para la posterior lectura en el espectrofotómetro de absorción atómica (Figura 7).



Figura 7. Preparación de muestras para lectura de los nutrientes, con empleo de estándares.

6.7. Deposición total de nutrientes

Para el cálculo de la concentración y/o deposición total de nutrientes se consideró lo siguiente:

De las lecturas tomadas por el espectrofotómetro de absorción, por elemento se realizó una base de datos en excel para referir las cuatro repeticiones de cada vía de redistribución. Por cada evento, se tomó el promedio de las cuatro repeticiones. Para determinar la deposición total, se realizó la suma de los 42 eventos, los cuales se representan en 441 muestras.

Se expresa de la siguiente manera:

$$\sum \bar{X}_i \dots \bar{X}_n$$

Posteriormente, se analizaron los resultados obtenidos empleando los valores de las lecturas de concentración para micro y macronutrientes, respectivamente.

6.8. Determinación de incorporación y remoción de nutrientes

La determinación de la concentración neta de nutrientes se desarrolló con el mismo principio que usan Aboal (1998) y Tibón (1999) para la determinación de la precipitación neta.

Para determinar la incorporación de nutrientes (IN) fue necesario determinar la concentración neta de nutrientes (CNN), para ello se empleó la siguiente ecuación (Jiménez *et al.* 2006):

$$CNN = Cn Pd + Cn St$$

Dónde:

- CNN = Concentración neta de nutrientes
- Cn Pd = Concentración neta de precipitación directa
- Cn St = Concentración neta de escurrimiento fustal

Una vez determinada la concentración neta de nutrientes (CNN), se procedió al cálculo de la incorporación de nutrientes (IN) mediante la siguiente ecuación (Jiménez *et al.* 2006):

$$IN = CNN - Cn Pi$$

Dónde:

- IN = Incorporación de nutrientes
- CNN = Concentración neta de nutrientes
- Cn Pi = Concentración neta de precipitación incidente

De acuerdo a Jiménez (2006), los valores de incorporación positivos (+) representan absorción de nutrientes, mientras que los negativos (-) indican remoción.

6.9. Análisis estadístico

6.9.1. Prueba de normalidad de Kolmogorov-Smirnov

La prueba de Kolmogorov-Smirnov permite medir el grado de concordancia entre la distribución de un conjunto de datos y una distribución teórica específica, su objetivo es señalar si los datos provienen de una población que tiene una distribución normal.

Se empleó el paquete estadístico SPSS versión 22. Una vez obtenidos los resultados de la prueba de Kolmogorov-Smirnov, que establece:

El valor de la asíntota bilateral debe ser mayor a 0.05? o 0.05 para demostrar que los datos presentan una distribución normal. Los datos de las lecturas no presentaron una distribución normal; por tanto, se empleó una prueba no paramétrica para determinar si existe diferencia entre los tratamientos (vías de redistribución).

6.9.2. Prueba de Kruskal-Wallis

La distribución de los datos no fue normal, por tanto, se empleó la prueba de Kruskal-Wallis para determinar la igualdad de las medianas, y con ellos se demuestra si existe alguna diferencia en la concentración de elementos por evento y vía de redistribución, la cual establece que los valores de la asíntota bilateral deben ser menores a 0.05, lo que indica que existen diferencias en la deposición de nutrientes.

6.9.3. Regresiones lineales

En diversas investigaciones se emplean variables relacionadas, donde se pretende modelar y explorar la relación entre estas. En general, existe una sola variable dependiente o de respuesta que depende de k variables independientes o de regresión. La relación de estas variables, caracteriza un modelo matemático llamado regresión lineal.

Para analizar la deposición de los nutrientes, se realizó una regresión lineal en donde se explica la relación de la deposición con respecto a la cantidad de precipitación, este análisis se aplicó comparando los valores de deposición neta

con precipitación neta y deposición incidente con precipitación incidente. Las ecuaciones indicarán el grado de dependencia de una variable con otra, mientras el valor R^2 indica el ajuste al modelo de la ecuación, entre más se acerca a 1.0 existe mejor ajuste.

7. RESULTADOS

La incorporación y remoción de nutrientes se encuentran influenciados por diversos factores; en esta investigación, se presentan los aportes de nutrientes en la precipitación y la cantidad que son incorporados al suelo, en una parcela de *Pinus cooperi*, tomando como medida las principales vías de redistribución de la lluvia; precipitación directa, precipitación incidente y escurrimiento fustal. La cantidad de nutrientes es comparada entre las vías.

7.1. Precipitación neta y precipitación incidente

La precipitación incidente registró 963.46 mm mientras para la precipitación neta 721.66 mm en los 42 eventos observados. En la Figura 8 se refleja que la mayor acumulación del volumen de lluvia se presenta en la precipitación incidente, a diferencia de la precipitación neta, dónde todos los eventos se encuentra por debajo de la precipitación incidente, lo que indica que al pasar por el dosel y fuste del árbol, es absorbida por las diferentes estructuras y existen pérdidas por evaporación alrededor de 25% del total de la lluvia que llega a la superficie de los árboles.

Además, en la Figura 8, se puede apreciar que el evento 31 fue el de mayor valor en el caso de la precipitación incidente y la precipitación neta, registrando 105.13 mm y 64.53 mm, respectivamente.

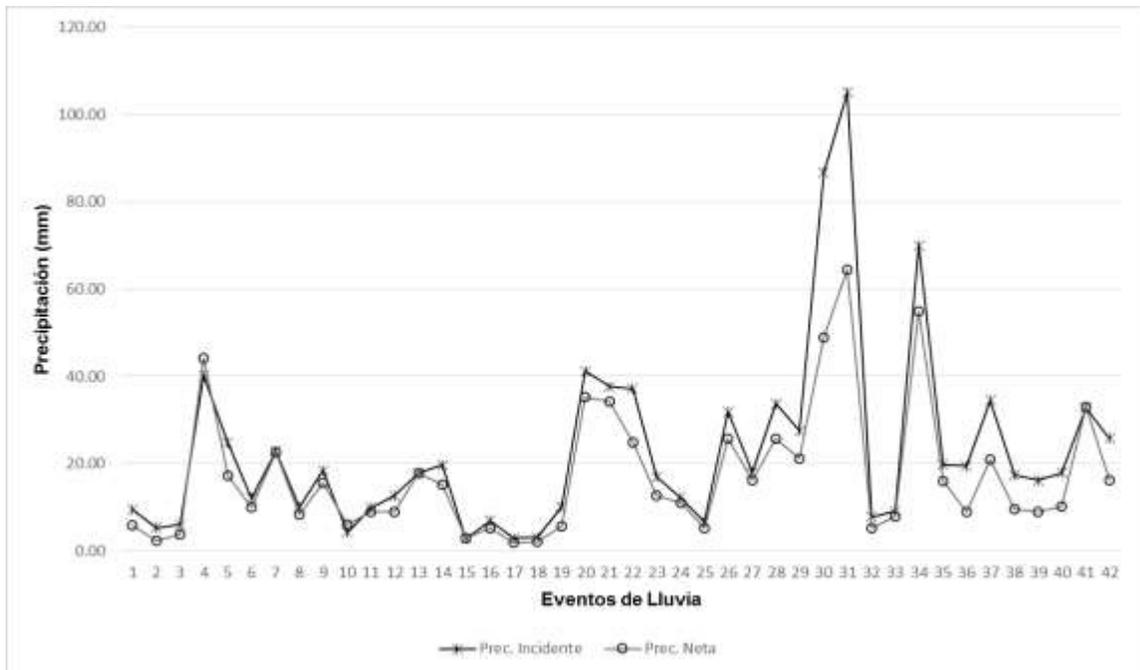


Figura 8. Relación de precipitaciones (mm) a lo largo de 42 eventos; precipitación incidente y neta bajo el estrato arbóreo de *Pinus cooperi*.

La mayor cantidad de precipitación incidente y precipitación neta se registró en el mes de Agosto con 445.20 y 315.14 mm donde fueron evaluados un total de 17 de 42 eventos, sin embargo, el mes de Julio también tiene un volumen representativo de 333.69 y 286.96 mm; en él se registraron 19 de 42 eventos, mientras que Junio y Septiembre fueron los meses con la menor cantidad de precipitación con 20.71 y 11.95 mm y 163.86 y 107.42 mm, respectivamente, registrando 3 de 42 y 7 de 42 eventos, respectivamente; se puede apreciar en la Figura 9.

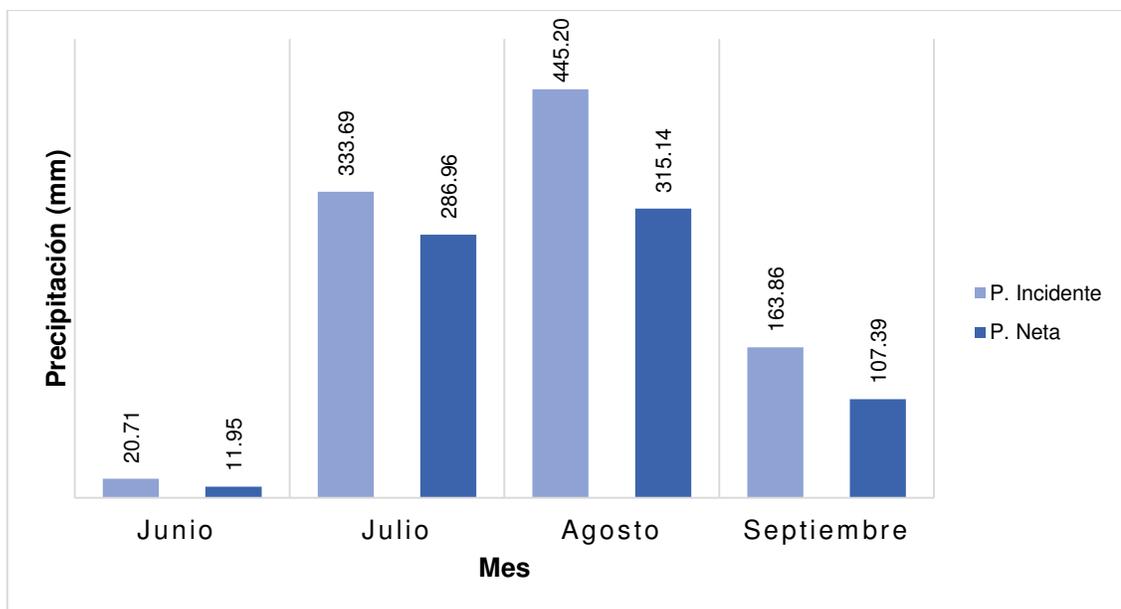


Figura 9. Valores mensuales de la precipitación neta y precipitación incidente.

7.2. Deposición total

La deposición de nutrientes para las vías de redistribución, se observó que el Mg es el macronutriente con la menor concentración; con valores de 8.93, 12.14 y 0.02 kg ha⁻¹ para precipitación directa, incidente y escurrimiento fustal, respectivamente. Con respecto a Ca, es el nutriente con mayor deposición con valores de 42.78, 64.05 y 0.12 kg ha⁻¹ en el mismo orden de las vías.

De acuerdo a los valores del Cuadro 1, la precipitación incidente es la vía que presenta la mayor deposición de macronutrientes (de 12.14 hasta 64.05 kg ha⁻¹). La deposición total (Pd + Sf) para Mg, Na, Ca y K fue de 8.95, 22.35, 42.89 y 12.81 kg ha⁻¹, respectivamente. Siendo el Ca, el mineral con mayor deposición. La deposición promedio por vía de redistribución de los macronutrientes fue en precipitación directa con 21.70 kg ha⁻¹; en precipitación incidente 31.43 kg ha⁻¹ y en escurrimiento fustal 0.05 kg ha⁻¹.

Cuadro 1. Deposición total de macronutrientes a través las diferentes vías en *Pinus cooperi*.

| Nutriente | P. Directa (Kg ha ⁻¹) | P. Incidente (Kg ha ⁻¹) | E. Fustal (Kg ha ⁻¹) | Dep. Total (Kg ha ⁻¹) |
|-----------------|--------------------------------------|--|-------------------------------------|--------------------------------------|
| <i>n</i> | 42 | 42 | 27 | |
| Mg | 8.93 | 12.14 | 0.02 | 8.95 |
| Na | 22.31 | 31.96 | 0.03 | 22.35 |
| Ca | 42.78 | 64.05 | 0.12 | 42.89 |
| K | 12.77 | 17.57 | 0.04 | 12.81 |
| TOTAL | 86.80 | 125.72 | 0.20 | |
| PROMEDIO | 21.70 | 31.43 | 0.05 | |

Mg: Magnesio, Na: Sodio, Ca: Calcio y K: Potasio.

En el Cuadro 2 se observa la deposición total entre las vías de redistribución de la precipitación en micronutrientes. Los nutrientes con mayor y menor deposición fueron Mn y Cu con concentraciones que oscilan entre 4.51 a 3,433.56 g ha⁻¹ y 0.03 a 25.99 g ha⁻¹, respectivamente. La precipitación incidente tiene la mayor deposición de nutrientes, comparándolo con Sf y Pd. La deposición total de los minerales Zn, Mn, Fe y Cu fue de 339.78, 2,792.41, 370.71 y 21.16 g ha⁻¹, respectivamente.

La deposición promedio por vía de redistribución de micronutrientes fue en precipitación directa 879.31 g ha⁻¹, en precipitación incidente 1,068.09 g ha⁻¹ y en escurrimiento fustal 1.71 g ha⁻¹.

Cuadro 2. Deposición total de micronutrientes a través de las diferentes vías en *Pinus cooperi*.

| Nutriente | P. Directa (g ha ⁻¹) | P. Incidente (g ha ⁻¹) | E. Fustal (g ha ⁻¹) | Dep. Total (g ha ⁻¹) |
|-----------------|-------------------------------------|---------------------------------------|------------------------------------|-------------------------------------|
| <i>n</i> | 42 | 42 | 27 | |
| Zn | 339.33 | 465.16 | 0.45 | 339.78 |
| Mn | 2,787.90 | 3,433.56 | 4.51 | 2,792.41 |
| Fe | 368.88 | 347.66 | 1.84 | 370.71 |
| Cu | 21.13 | 25.99 | 0.03 | 21.16 |
| TOTAL | 3517.24 | 4272.37 | 6.83 | |
| PROMEDIO | 879.31 | 1,068.09 | 1.71 | |

Zn: Zinc, Mn: Manganeseo, Fe: Fierro y Cu: Cobre.

Los porcentajes de la deposición total de macronutrientes se muestran en la Figura 10, donde se puede apreciar los porcentajes de deposición de Ca, Na, K y Mg.

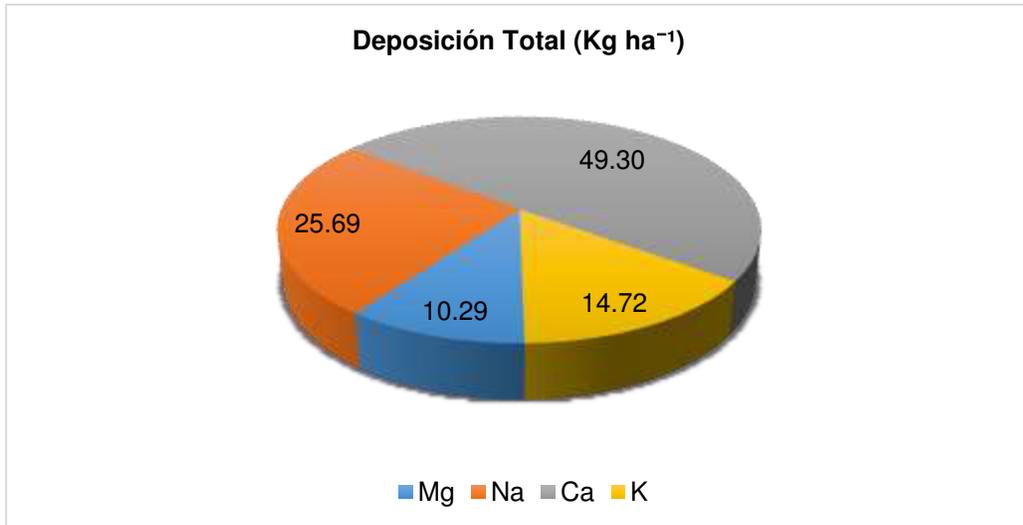


Figura 10. Porcentajes de la deposición total (Pd+Sf) de macronutrientes bajo la cobertura de *Pinus cooperi*.

Los porcentajes de la deposición total de micronutrientes se muestran en la Figura 11, donde se puede apreciar los porcentajes de deposición en Mn, Fe, Zn y Cu.

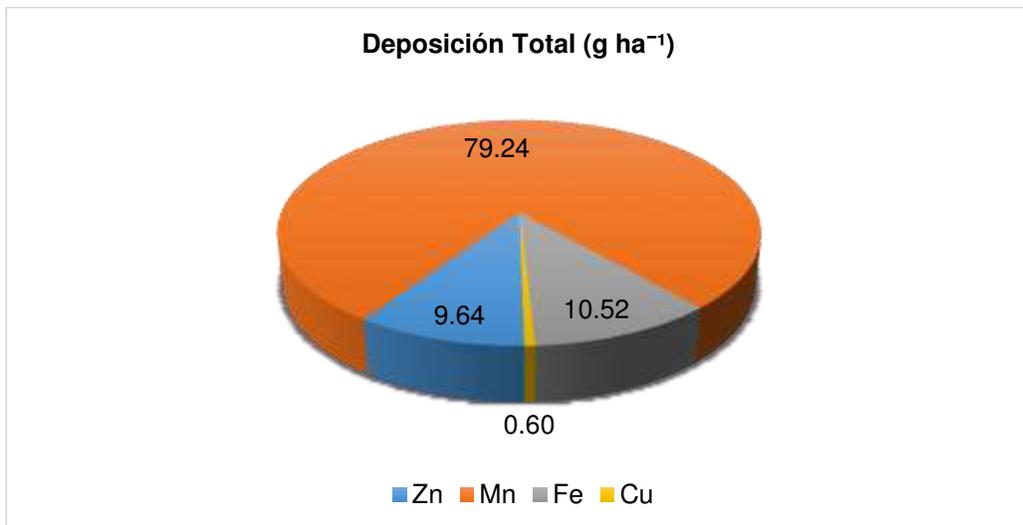


Figura 11. Porcentajes de la deposición total (Pd+Sf) de micronutrientes bajo la cobertura de *Pinus cooperi*.

7.3. Concentración neta e incorporación de nutrientes

La concentración neta de nutrientes fue determinada en base a Jiménez (2006). El Ca fue el nutriente con la mayor concentración de 42.89 kg ha⁻¹; mientras que el Mg presentó la menor con 8.95 kg ha⁻¹.

Todos los nutrientes evaluados presentaron remoción (-) al paso del dosel, observándose que el Ca y el Mg presentaron los valores máximos y mínimos - 21.16 y -3.19 kg ha⁻¹, respectivamente (Cuadro 3).

El Mg tuvo una entrada de 8.95 kg ha⁻¹ y una salida de 5.76 kg ha⁻¹, lo cual indica que durante la circulación de la precipitación en la estructura arbórea se removieron 3.19 kg ha⁻¹. El Na, Ca y K presentaron una remoción de -9.61, - 21.16 y -4.76 kg ha⁻¹, respectivamente. De acuerdo a los valores totales de incorporación total (48.28 kg ha⁻¹), 87.00 unidades representan a la concentración neta de nutrientes (CNN) de las cuales, -38.72 fueron removidas.

Cuadro 3. Entrada de macronutrientes (Pi) concentración neta e incorporación de nutrientes en *Pinus cooperi*.

| Nutriente | CNN (kg ha ⁻¹) | (+) Inc/(-)Rem | IN Total (kg ha ⁻¹) |
|-----------------|----------------------------|----------------|---------------------------------|
| Mg | 8.95 | -3.19 | 5.76 |
| Na | 22.35 | -9.61 | 12.74 |
| Ca | 42.89 | -21.16 | 21.74 |
| K | 12.81 | -4.76 | 8.05 |
| PROMEDIO | 21.75 | -9.68 | 12.07 |
| TOTAL | 87.00 | -38.72 | 48.28 |

CNN: Concentración Neta de Nutrientes, IN: Incorporación.

De acuerdo al Cuadro 4, el micronutriente Mn presentó la mayor CNN con 2,792.41 g ha⁻¹, mientras que el Cu fue el de menor concentración con 21.16 g ha⁻¹.

Tres de los cuatro microminerales evaluados presentaron remoción a excepción de Fe el cual incorporó 23.06 g ha⁻¹. En el Cuadro 4 se observa que para el resto de los micronutrientes Zn, Mn y Cu removieron -125.39, -641.15 y -4.82 g ha⁻¹, respectivamente.

De acuerdo a los valores totales de incorporación total (2,775.76 g ha⁻¹), 3,524.07 unidades corresponden a la CNN de las cuales -748.30 fueron removidas.

Cuadro 4. Entrada de micronutrientes (Pi), concentración neta e incorporación de nutrientes en *Pinus cooperi*.

| Nutriente | CNN (g ha ⁻¹) | (+) Inc/(-)Rem | IN Total (g ha ⁻¹) |
|-----------------|---------------------------|----------------|--------------------------------|
| Zn | 339.78 | -125.39 | 214.39 |
| Mn | 2,792.41 | -641.15 | 2,151.27 |
| Fe | 370.71 | 23.06 | 393.77 |
| Cu | 21.16 | -4.82 | 16.34 |
| PROMEDIO | 881.02 | -187.08 | 693.94 |
| TOTAL | 3,524.07 | -748.30 | 2,775.76 |

CNN: Concentración Neta de Nutrientes; IN: Incorporación.

7.4. Pluviolavado

El agua de lluvia que fluye a través de las hojas, ramas y troncos de las plantas modifica la composición química de la misma; a esto se le conoce como pluviolavado o lixiviación. Se realizó un análisis sobre el comportamiento del pH y conductividad eléctrica durante los 42 eventos registrados.

7.4.1. pH

En el Cuadro 5 se observa que las muestras presentaron un pH ligeramente ácido. En la Pi, el pH fue de 5.42, mientras que en la Pd fue de 5.23 y para Sf de 4.96, lo que indica que la precipitación al fluir el dosel disminuyó ligeramente el pH de la lluvia interceptada.

Cuadro 5. Promedio y desviación estándar de pH en precipitación directa (Pd), precipitación incidente (Pi) y escurrimiento fustal (Sf).

| pH | Pd | Pi | Sf |
|---------------------|-------|-------|------|
| <i>n</i> | 42 | 42 | 27 |
| Promedio | 5.23 | 5.42 | 4.96 |
| Desviación estándar | 0.596 | 0.739 | 0.95 |

La modificación del pH se debe a diferentes factores, entre ellos, destaca la acumulación de aerosoles sobre la superficie de hojas, ramas y tallos de las plantas, además las hojas acumulan nutrientes durante los procesos de fotosíntesis y la transpiración, en el caso del género *Pinus* la secreción de resina representa el factor principal.

Durante el periodo de evaluación de los 42 eventos de lluvia, el pH de la precipitación incidente se mantuvo con los valores entre 4.42 a 6.12, una vez que la lluvia fluye sobre el dosel arbóreo se modifica (precipitación directa) y disminuye ligeramente encontrando valores que van de 4.21 a 6.27. Cuando la lluvia recorre el fuste del árbol (escurrimiento fustal), se acidifica ligeramente donde se muestran valores que van de 3.85 a 6.82, se puede observar en la Figura 12.

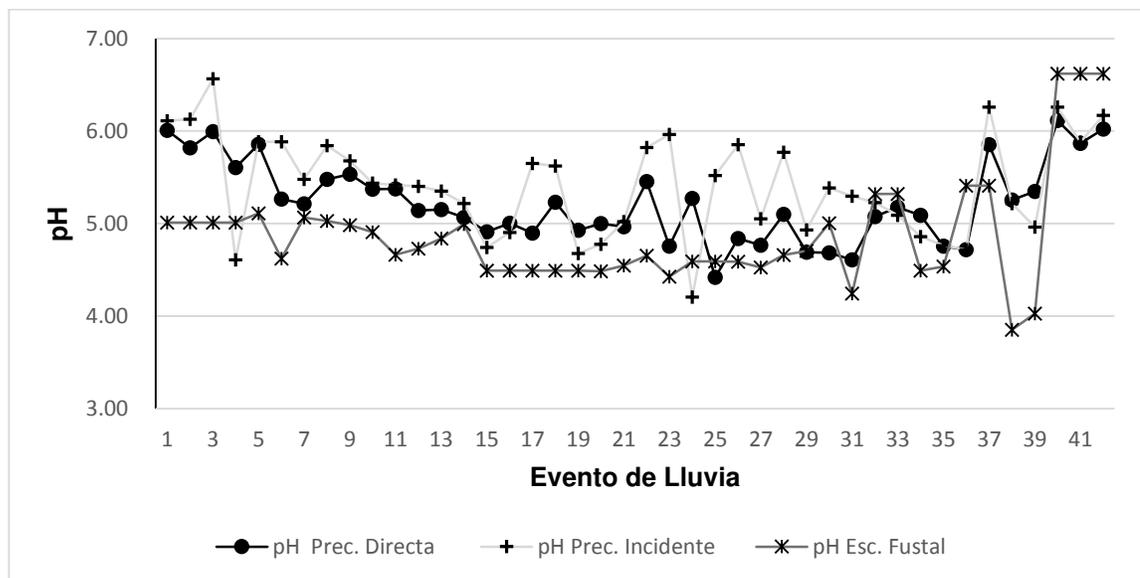


Figura 12. Comportamiento de pH en precipitación directa (Pd), precipitación incidente (Pi) y escurrimiento fustal (Sf) bajo el dosel de *Pinus cooperi*.

7.4.2. Conductividad eléctrica

En el Cuadro 6 se puede observar el comportamiento de la conductividad eléctrica en donde el valor promedio para la precipitación incidente es $15.33 \mu\text{S cm}^{-1}$, mientras que para la precipitación directa, al pasar por el dosel muestra un valor promedio de $12.08 \mu\text{S cm}^{-1}$; indicando que hubo una ligera disminución y

para escurrimiento fustal un promedio de $39.06 \mu\text{S cm}^{-1}$, lo que significa que la lluvia al fluir a través del fuste de *P. cooperi* aumenta la conductividad eléctrica.

Cuadro 6. Promedio y desviación estándar de la conductividad eléctrica (CE, $\mu\text{S cm}^{-1}$) en precipitación directa (Pd), precipitación incidente (Pi) y escurrimiento fustal (Sf).

| CE | Pd | Pi | Sf |
|---------------------|-------|-------|-------|
| <i>n</i> | 42 | 42 | 27 |
| Promedio | 12.08 | 15.33 | 39.06 |
| Desviación estándar | 6.72 | 18.27 | 17.60 |

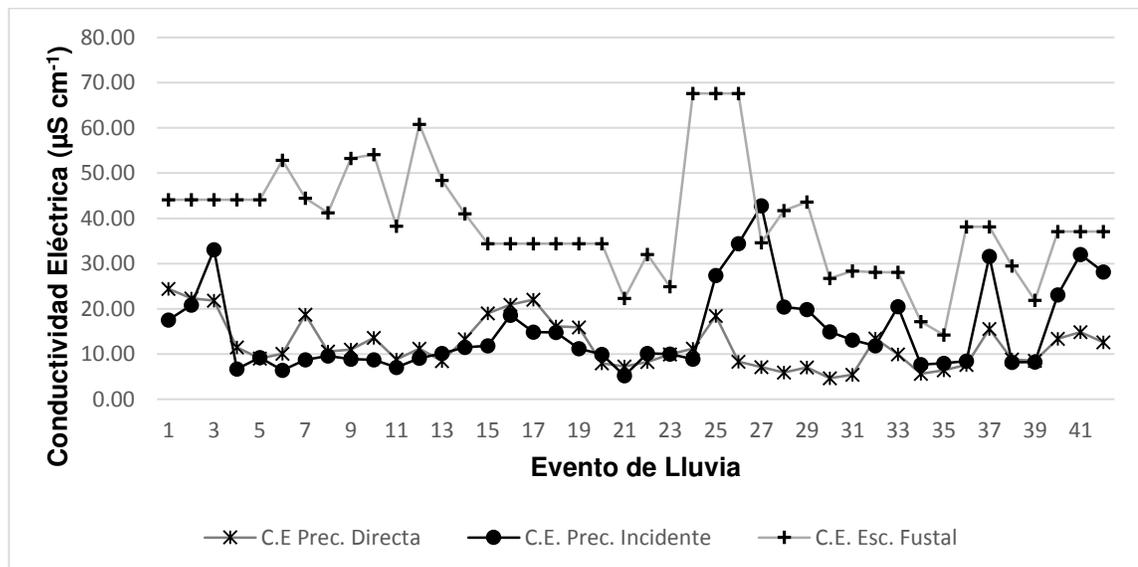


Figura 13. Comportamiento de la conductividad eléctrica en precipitación directa (Pd), precipitación incidente (Pi) y escurrimiento fustal (Sf) bajo el dosel de *Pinus cooperi*.

7.4.3. Análisis estadístico del pluviolavado

Los datos de pH y conductividad eléctrica fueron sometidos a una prueba de homogeneidad, en la cual no cumplieron con los supuestos, por lo que se decidió aplicar una prueba no paramétrica de Kruskal-Wallis, para poder determinar las diferencias significativas entre las vías de redistribución; precipitación directa, precipitación incidente y escurrimiento fustal.

Para ello, es necesario recordar que para la precipitación directa e incidente se evaluaron 42 eventos, mientras que para el escurrimiento fustal solo fue posible evaluar 27, que fueron el total de eventos registrados en esta vía.

En el Cuadro 7 se encuentran los resultados obtenidos del análisis de varianza. Para pH solo mostraron diferencia significativa ($P < 0.05$) en 4 eventos de 42, lo que significa que 9.52% de los eventos mostraron significancia, mientras que para la conductividad eléctrica se registró un mayor número de diferencias significativas ($P < 0.05$); 21 eventos de 42, representando un 50%.

Cuadro 7. Análisis de varianza (Kruskal-Wallis) en las variables de pH y conductividad eléctrica en las diferentes vías de redistribución

| Evento | Fecha de evento | pH | | CE | | Pp (mm) |
|--------|-----------------|----------|--------------|----------|--------------|---------|
| | | χ^2 | Valor p | χ^2 | Valor p | |
| 1 | 28/06/16 | 0.021 | 0.885 | 4.133 | 0.042 | 9.50 |
| 2 | 29/06/16 | 1.333 | 0.248 | 1.333 | 0.248 | 5.24 |
| 3 | 30/06/16 | 3.000 | 0.083 | 0.000 | 1.000 | 5.98 |
| 4 | 01/07/16 | 5.120 | 0.077 | 7.538 | 0.023 | 40.14 |
| 5 | 04/07/16 | 0.745 | 0.649 | 6.709 | 0.035 | 24.74 |
| 6 | 05/07/16 | 2.382 | 0.304 | 7.318 | 0.026 | 12.05 |
| 7 | 07/07/16 | 0.500 | 0.779 | 6.615 | 0.037 | 22.90 |
| 8 | 08/07/16 | 2.346 | 0.309 | 8.000 | 0.016 | 9.96 |
| 9 | 09/07/16 | 0.115 | 0.994 | 8.346 | 0.015 | 18.39 |
| 10 | 10/07/16 | 0.462 | 0.794 | 9.846 | 0.007 | 4.20 |
| 11 | 11/07/16 | 3.889 | 0.143 | 8.769 | 0.012 | 9.83 |
| 12 | 13/07/16 | 0.962 | 0.618 | 8.769 | 0.012 | 12.58 |
| 13 | 16/07/16 | 0.154 | 0.926 | 7.731 | 0.021 | 17.80 |
| 14 | 18/07/16 | 0.269 | 0.874 | 8.000 | 0.018 | 19.65 |
| 15 | 19/07/16 | 0.750 | 0.386 | 4.083 | 0.043 | 2.73 |
| 16 | 23/07/16 | 0.333 | 0.564 | 0.000 | 1.000 | 6.88 |
| 17 | 24/07/16 | 4.083 | 0.043 | 2.083 | 0.149 | 2.91 |
| 18 | 25/07/16 | 2.083 | 0.149 | 1.333 | 0.248 | 3.03 |
| 19 | 26/07/16 | 0.750 | 0.386 | 4.083 | 0.043 | 10.00 |
| 20 | 27/07/16 | 1.500 | 0.472 | 7.385 | 0.025 | 41.16 |
| 21 | 28/07/16 | 1.077 | 0.584 | 9.269 | 0.010 | 37.65 |
| 22 | 31/07/16 | 3.846 | 0.146 | 2.346 | 0.309 | 37.11 |
| 23 | 01/08/16 | 7.731 | 0.021 | 2.000 | 0.368 | 16.94 |
| 24 | 05/08/16 | 2.083 | 0.149 | 1.333 | 0.248 | 12.13 |
| 25 | 06/08/16 | 4.500 | 0.034 | 0.500 | 0.480 | 6.63 |

| | | | | | | |
|----|----------|-------|--------------|-------|--------------|--------|
| 26 | 09/08/16 | 6.108 | 0.047 | 4.192 | 0.123 | 31.88 |
| 27 | 10/08/16 | 0.608 | 0.738 | 4.192 | 0.123 | 17.95 |
| 28 | 13/08/16 | 3.577 | 0.167 | 5.365 | 0.068 | 33.78 |
| 29 | 15/08/16 | 0.347 | 0.841 | 6.000 | 0.050 | 27.53 |
| 30 | 20/08/16 | 1.385 | 0.500 | 7.038 | 0.030 | 86.68 |
| 31 | 21/08/16 | 3.231 | 0.199 | 6.500 | 0.039 | 105.13 |
| 32 | 22/08/16 | 0.333 | 0.564 | 1.333 | 0.248 | 7.73 |
| 33 | 23/08/16 | 0.167 | 0.920 | 0.000 | 1.000 | 9.11 |
| 34 | 25/08/16 | 1.927 | 0.382 | 8.000 | 0.018 | 70.00 |
| 35 | 28/08/16 | 0.500 | 0.779 | 7.538 | 0.023 | 19.75 |
| 36 | 08/09/16 | 0.021 | 0.885 | 0.190 | 0.663 | 19.48 |
| 37 | 09/09/16 | 5.538 | 0.063 | 6.000 | 0.050 | 34.50 |
| 38 | 10/09/16 | 6.039 | 0.049 | 6.409 | 0.041 | 17.40 |
| 39 | 11/09/16 | 5.476 | 0.065 | 6.027 | 0.049 | 16.09 |
| 40 | 16/09/16 | 0.333 | 0.564 | 0.333 | 0.564 | 17.93 |
| 41 | 23/09/16 | 1.862 | 0.394 | 6.731 | 0.035 | 32.75 |
| 42 | 30/09/16 | 0.337 | 0.561 | 3.000 | 0.083 | 25.73 |

Valores P en negritas ($p < 0.05$) indican diferencias y las filas sombreadas representan los eventos que no registró escurrimiento fustal (Sf).

7.5. Análisis estadístico para la concentración de nutrientes

Para determinar si existen diferencias significativas entre la concentración de nutrientes por vía de redistribución, se sometieron los datos obtenidos a una prueba de homogeneidad para analizar el comportamiento de los mismos. Dichos datos no cumplieron con los supuestos de normalidad en macronutrientes y micronutrientes, por lo que se optó por realizar la prueba no paramétrica de Kruskal-Wallis, la cual indica que los valores menores a $P < 0.05$ presentan diferencias significativas entre vía de redistribución.

7.5.1. Prueba de Kruskal-Wallis para macronutrientes

En el Cuadro 8 se ilustra la precipitación (mm) de cada evento y se puede apreciar que en la mayoría de los registros se presentan diferencias significativas en las concentraciones de nutrientes.

De acuerdo a los resultados de la prueba de comparación (Kruskal-Wallis), el Mg presentó diferencias significativas en 28 eventos; Na y K en 30 de 42 eventos presentaron diferencias, mientras que el Ca presentó diferencias en 26 eventos.

Cuadro 8. Análisis de varianza (Kruskal-Wallis) de los macronutrientes en las diferentes vías de redistribución.

| Evento | Fecha de evento | Magnesio | | Sodio | | Calcio | | Potasio | | Pp (mm) |
|--------|-----------------|----------|--------------|----------|--------------|----------|--------------|----------|--------------|---------|
| | | χ^2 | Valor p | |
| 1 | 28/06/16 | 0.000 | 1.000 | 1.333 | 0.248 | 1.333 | 0.248 | 1.333 | 0.248 | 9.50 |
| 2 | 29/06/16 | 2.083 | 0.149 | 0.333 | 0.564 | 0.083 | 0.773 | 1.333 | 0.248 | 5.24 |
| 3 | 30/06/16 | 2.083 | 0.149 | 2.083 | 0.149 | 0.083 | 0.773 | 0.333 | 0.564 | 5.98 |
| 4 | 01/07/16 | 7.538 | 0.023 | 7.538 | 0.023 | 7.423 | 0.024 | 9.846 | 0.007 | 40.14 |
| 5 | 04/07/16 | 7.000 | 0.030 | 7.000 | 0.030 | 8.018 | 0.018 | 6.709 | 0.035 | 24.74 |
| 6 | 05/07/16 | 5.982 | 0.050 | 6.745 | 0.034 | 8.018 | 0.018 | 7.318 | 0.026 | 12.05 |
| 7 | 07/07/16 | 7.538 | 0.023 | 7.731 | 0.021 | 6.000 | 0.050 | 9.846 | 0.007 | 22.90 |
| 8 | 08/07/16 | 9.269 | 0.010 | 8.769 | 0.012 | 7.731 | 0.012 | 8.000 | 0.018 | 9.96 |
| 9 | 09/07/16 | 7.423 | 0.024 | 7.731 | 0.021 | 7.538 | 0.023 | 9.269 | 0.010 | 18.39 |
| 10 | 10/07/16 | 7.538 | 0.023 | 7.385 | 0.025 | 7.423 | 0.024 | 8.346 | 0.015 | 4.20 |
| 11 | 11/07/16 | 9.269 | 0.010 | 9.846 | 0.007 | 7.423 | 0.024 | 7.731 | 0.021 | 9.83 |
| 12 | 13/07/16 | 7.731 | 0.021 | 7.538 | 0.023 | 8.346 | 0.015 | 9.846 | 0.007 | 12.58 |
| 13 | 16/07/16 | 8.000 | 0.018 | 7.538 | 0.023 | 7.731 | 0.021 | 8.000 | 0.018 | 17.80 |
| 14 | 18/07/16 | 7.731 | 0.021 | 7.385 | 0.025 | 7.731 | 0.021 | 7.42 | 0.024 | 19.65 |
| 15 | 19/07/16 | 0.000 | 1.000 | 3.000 | 0.083 | 0.083 | 0.773 | 2.083 | 0.149 | 2.73 |
| 16 | 23/07/16 | 0.083 | 0.773 | 2.083 | 0.149 | 0.000 | 1.000 | 0.083 | 0.773 | 6.88 |
| 17 | 24/07/16 | 1.333 | 0.248 | 4.083 | 0.043 | 0.000 | 1.000 | 0.333 | 0.564 | 2.91 |
| 18 | 25/07/16 | 4.083 | 0.043 | 4.083 | 0.043 | 0.333 | 0.564 | 5.333 | 0.021 | 3.03 |
| 19 | 26/07/16 | 0.000 | 1.000 | 1.333 | 0.248 | 3.000 | 0.083 | 5.333 | 0.021 | 10.00 |
| 20 | 27/07/16 | 7.538 | 0.023 | 7.731 | 0.021 | 7.423 | 0.024 | 7.538 | 0.023 | 41.16 |
| 21 | 28/07/16 | 9.846 | 0.007 | 8.000 | 0.018 | 9.846 | 0.007 | 8.769 | 0.012 | 37.65 |
| 22 | 31/07/16 | 7.385 | 0.025 | 7.538 | 0.023 | 7.538 | 0.023 | 7.538 | 0.023 | 37.11 |
| 23 | 01/08/16 | 8.346 | 0.015 | 8.000 | 0.018 | 8.000 | 0.018 | 7.538 | 0.023 | 16.94 |
| 24 | 05/08/16 | 2.083 | 0.149 | 0.750 | 0.386 | 0.750 | 0.386 | 2.083 | 0.149 | 12.13 |
| 25 | 06/08/16 | 0.500 | 0.480 | 3.125 | 0.077 | 2.000 | 0.157 | 0.000 | 1.000 | 6.63 |
| 26 | 09/08/16 | 8.769 | 0.012 | 8.000 | 0.018 | 6.182 | 0.045 | 7.385 | 0.025 | 31.88 |
| 27 | 10/08/16 | 7.423 | 0.024 | 7.538 | 0.023 | 7.385 | 0.025 | 7.385 | 0.025 | 17.95 |
| 28 | 13/08/16 | 8.000 | 0.018 | 9.846 | 0.007 | 9.846 | 0.007 | 7.423 | 0.024 | 33.78 |
| 29 | 15/08/16 | 8.769 | 0.012 | 8.346 | 0.015 | 7.423 | 0.024 | 7.731 | 0.021 | 27.53 |
| 30 | 20/08/16 | 7.385 | 0.025 | 8.346 | 0.015 | 8.346 | 0.015 | 8.769 | 0.012 | 86.68 |
| 31 | 21/08/16 | 7.731 | 0.021 | 9.846 | 0.007 | 9.846 | 0.007 | 8.346 | 0.015 | 105.13 |
| 32 | 22/08/16 | 0.333 | 0.564 | 1.333 | 0.248 | 0.083 | 0.773 | 2.083 | 0.149 | 7.73 |

| | | | | | | | | | | |
|----|----------|-------|--------------|-------|--------------|-------|--------------|-------|--------------|-------|
| 33 | 23/08/16 | 0.750 | 0.386 | 0.083 | 0.773 | 0.333 | 0.564 | 0.750 | 0.386 | 9.11 |
| 34 | 25/08/16 | 7.731 | 0.021 | 9.269 | 0.010 | 8.346 | 0.015 | 7.538 | 0.023 | 70.00 |
| 35 | 28/08/16 | 8.769 | 0.012 | 8.000 | 0.018 | 7.385 | 0.025 | 7.385 | 0.025 | 19.75 |
| 36 | 08/09/16 | 5.333 | 0.021 | 5.333 | 0.021 | 2.083 | 0.149 | 4.083 | 0.043 | 19.48 |
| 37 | 09/09/16 | 9.846 | 0.007 | 8.346 | 0.015 | 8.346 | 0.015 | 7.731 | 0.021 | 34.50 |
| 38 | 10/09/16 | 8.227 | 0.016 | 8.909 | 0.012 | 8.227 | 0.016 | 7.636 | 0.022 | 17.40 |
| 39 | 11/09/16 | 8.909 | 0.012 | 8.909 | 0.012 | 8.909 | 0.012 | 6.000 | 0.050 | 16.09 |
| 40 | 16/09/16 | 0.750 | 0.386 | 0.333 | 0.564 | 1.333 | 0.248 | 1.333 | 0.248 | 17.93 |
| 41 | 23/09/16 | 7.423 | 0.024 | 7.423 | 0.024 | 7.538 | 0.023 | 7.423 | 0.024 | 32.75 |
| 42 | 30/09/16 | 0.000 | 1.000 | 3.000 | 0.083 | 2.083 | 0.149 | 1.333 | 0.248 | 25.73 |

Valores p en negritas ($p < 0.05$) indican diferencias; las filas sombreadas representan los eventos que no registró escurrimiento fustal (Sf).

7.5.2. Prueba de Kruskal-Wallis para micronutrientes

Para realizar el análisis fue necesario tomar los valores de concentración de los eventos por nutriente y por vía de redistribución.

En el Cuadro 9 se aprecia que el Zn, Mn, Fe y Cu presentaron diferencias significativas en 23, 23, 24 y 12 eventos de lluvia, respectivamente, representando un porcentaje de 54.76% para Zn y Mn, 57.76% y 28.57% para Fe y Cu, respectivamente.

Cuadro 9. Análisis de varianza (Kruskal-Wallis) de los micronutrientes en las diferentes vías de redistribución.

| Evento | Fecha de evento | Zinc | | Manganeso | | Fierro | | Cobre | | Pp (mm) |
|--------|-----------------|----------|--------------|-----------|--------------|----------|--------------|----------|--------------|---------|
| | | χ^2 | Valor p | χ^2 | Valor p | χ^2 | Valor p | χ^2 | Valor p | |
| 1 | 28/06/16 | 0.083 | 0.773 | 5.333 | 0.021 | 5.398 | 0.020 | 0.000 | 1.000 | 9.50 |
| 2 | 29/06/16 | 3.000 | 0.083 | 0.333 | 0.564 | 0.527 | 0.468 | 4.083 | 0.043 | 5.24 |
| 3 | 30/06/16 | 2.08 | 0.149 | 2.083 | 0.149 | 5.463 | 0.019 | 3.000 | 0.083 | 5.98 |
| 4 | 01/07/16 | 7.423 | 0.024 | 8.346 | 0.015 | 7.497 | 0.024 | 7.385 | 0.025 | 40.14 |
| 5 | 04/07/16 | 6.564 | 0.038 | 7.000 | 0.030 | 7.436 | 0.024 | 6.006 | 0.050 | 24.74 |
| 6 | 05/07/16 | 6.300 | 0.043 | 7.318 | 0.026 | 5.778 | 0.056 | 6.018 | 0.049 | 12.05 |
| 7 | 07/07/16 | 9.269 | 0.010 | 8.000 | 0.018 | 8.056 | 0.018 | 7.449 | 0.024 | 22.90 |
| 8 | 08/07/16 | 8.000 | 0.018 | 7.538 | 0.023 | 5.654 | 0.059 | 7.423 | 0.024 | 9.96 |
| 9 | 09/07/16 | 7.538 | 0.023 | 7.731 | 0.021 | 7.538 | 0.023 | 3.524 | 0.172 | 18.39 |
| 10 | 10/07/16 | 7.423 | 0.024 | 7.423 | 0.024 | 7.652 | 0.022 | 7.423 | 0.024 | 4.20 |
| 11 | 11/07/16 | 8.769 | 0.012 | 7.538 | 0.023 | 7.420 | 0.024 | 9.302 | 0.010 | 9.83 |
| 12 | 13/07/16 | 5.333 | 0.021 | 3.000 | 0.083 | 8.192 | 0.017 | 3.000 | 0.083 | 12.58 |
| 13 | 16/07/16 | 0.333 | 0.564 | 0.000 | 1.000 | 9.881 | 0.007 | 4.500 | 0.034 | 17.80 |
| 14 | 18/07/16 | 3.000 | 0.083 | 5.333 | 0.021 | 4.192 | 0.123 | 2.08 | 0.149 | 19.65 |

| | | | | | | | | | | |
|----|----------|-------|--------------|-------|--------------|-------|--------------|-------|--------------|--------|
| 15 | 19/07/16 | 0.333 | 0.564 | 1.333 | 0.248 | 1.708 | 0.191 | 0.000 | 1.000 | 2.73 |
| 16 | 23/07/16 | 0.333 | 0.564 | 1.333 | 0.248 | 1.033 | 0.309 | 0.429 | 0.513 | 6.88 |
| 17 | 24/07/16 | 0.083 | 0.773 | 5.333 | 0.021 | 2.083 | 0.149 | 0.333 | 0.564 | 2.91 |
| 18 | 25/07/16 | 1.333 | 0.248 | 3.000 | 0.083 | 2.083 | 0.149 | 2.400 | 0.121 | 3.03 |
| 19 | 26/07/16 | 5.333 | 0.021 | 5.333 | 0.021 | 0.333 | 0.564 | 1.500 | 0.221 | 10.00 |
| 20 | 27/07/16 | 7.538 | 0.023 | 7.731 | 0.021 | 7.538 | 0.023 | 6.250 | 0.044 | 41.16 |
| 21 | 28/07/16 | 5.333 | 0.021 | 1.333 | 0.248 | 8.800 | 0.012 | 3.857 | 0.050 | 37.65 |
| 22 | 31/07/16 | 1.333 | 0.248 | 2.083 | 0.149 | 7.731 | 0.021 | 1.500 | 0.221 | 37.11 |
| 23 | 01/08/16 | 7.538 | 0.023 | 8.000 | 0.018 | 7.038 | 0.030 | 7.282 | 0.026 | 16.94 |
| 24 | 05/08/16 | 0.000 | 1.000 | 0.000 | 1.000 | 0.000 | 1.000 | 1.500 | 0.221 | 12.13 |
| 25 | 06/08/16 | 0.125 | 0.724 | 0.000 | 1.000 | 0.500 | 0.480 | 1.800 | 0.180 | 6.63 |
| 26 | 09/08/16 | 7.731 | 0.021 | 7.538 | 0.023 | 7.528 | 0.023 | 5.791 | 0.055 | 31.88 |
| 27 | 10/08/16 | 8.000 | 0.018 | 7.423 | 0.024 | 5.773 | 0.056 | 5.143 | 0.076 | 17.95 |
| 28 | 13/08/16 | 7.423 | 0.024 | 7.538 | 0.023 | 9.032 | 0.010 | 4.511 | 0.105 | 33.78 |
| 29 | 15/08/16 | 0.083 | 0.773 | 4.083 | 0.043 | 8.028 | 0.018 | 0.333 | 0.564 | 27.53 |
| 30 | 20/08/16 | 6.667 | 0.036 | 5.667 | 0.059 | 7.538 | 0.023 | 0.333 | 0.564 | 86.68 |
| 31 | 21/08/16 | 9.846 | 0.007 | 7.538 | 0.023 | 6.976 | 0.031 | 6.000 | 0.050 | 105.13 |
| 32 | 22/08/16 | 4.083 | 0.043 | 2.083 | 0.149 | 0.083 | 0.773 | 5.333 | 0.021 | 7.73 |
| 33 | 23/08/16 | 0.000 | 1.000 | 0.000 | 1.000 | 0.333 | 0.564 | 0.000 | 1.000 | 9.11 |
| 34 | 25/08/16 | 7.538 | 0.023 | 7.385 | 0.025 | 7.845 | 0.020 | 8.326 | 0.016 | 70.00 |
| 35 | 28/08/16 | 6.409 | 0.041 | 6.727 | 0.035 | 3.731 | 0.155 | 5.143 | 0.076 | 19.75 |
| 36 | 08/09/16 | 5.333 | 0.021 | 5.333 | 0.021 | 1.708 | 0.191 | 3.429 | 0.064 | 19.48 |
| 37 | 09/09/16 | 4.083 | 0.043 | 3.000 | 0.083 | 7.463 | 0.024 | 0.083 | 0.773 | 34.50 |
| 38 | 10/09/16 | 8.909 | 0.012 | 8.227 | 0.016 | 7.409 | 0.025 | 6.045 | 0.049 | 17.40 |
| 39 | 11/09/16 | 5.333 | 0.021 | 3.000 | 0.083 | 6.073 | 0.049 | 0.083 | 0.773 | 16.09 |
| 40 | 16/09/16 | 3.000 | 0.083 | 0.750 | 0.386 | 0.021 | 0.885 | 0.750 | 0.386 | 17.93 |
| 41 | 23/09/16 | 0.083 | 0.773 | 0.750 | 0.386 | 7.538 | 0.023 | 1.333 | 0.248 | 32.75 |
| 42 | 30/09/16 | 5.333 | 0.021 | 5.333 | 0.021 | 1.349 | 0.245 | 1.333 | 0.248 | 25.73 |

Valores p en negritas ($p < 0.05$) indican diferencias, las filas sombreadas representan los eventos que no registró escurrimiento fustal (Sf).

7.6. Regresiones lineales

Se representaron las concentraciones de los macro y micronutrientes en la precipitación incidente y precipitación neta, empleando regresiones lineales con el fin de estimar las relaciones entre dichas variables.

7.6.1. Precipitación incidente

El grado de asociación entre variables es aceptable en cada macronutriente evaluado, donde el mineral con un mejor ajuste fue el Na con una R^2 de 0.77 y caso contrario, en Mg con una R^2 de 0.47; la mayoría de los eventos se concentra en precipitaciones menores a 35 mm presentando algunos casos volúmenes de precipitación por arriba de 60 mm.

En la Figura 14 se observan las relaciones de deposición para los cuatro macronutrientes, donde se muestran que a mayor volumen de precipitación incidente, existe una mayor acumulación de nutrientes.

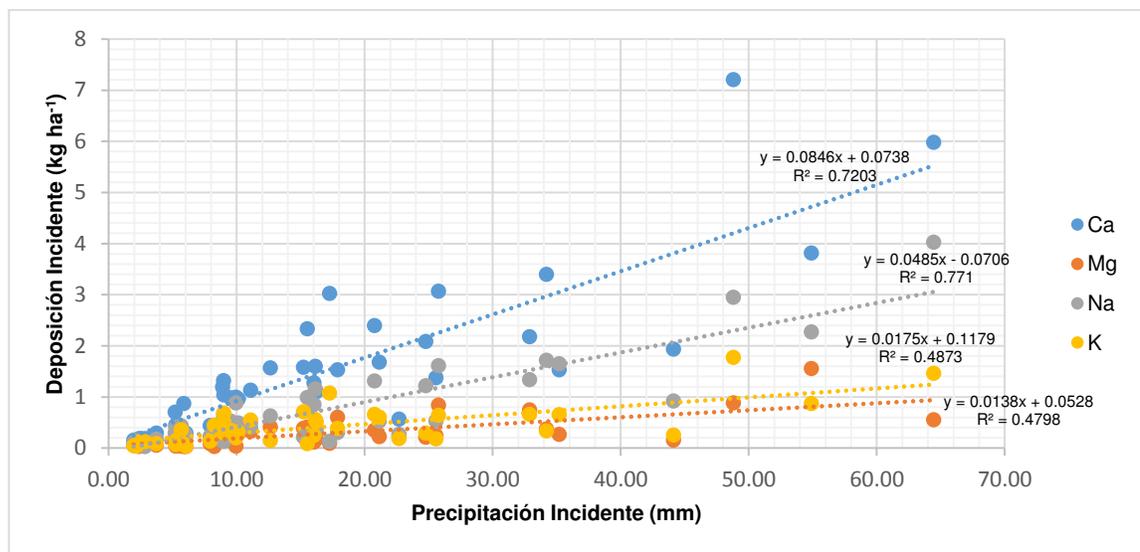


Figura 14. Relación entre la precipitación incidente (mm) y la deposición incidente (kg ha⁻¹) de macronutrientes.

La relación de los micronutrientes en la precipitación incidente tuvo un ajuste menor. Esto puede estar influenciado por otros factores, es decir, que no solo la cantidad de la precipitación influye en la deposición de estos, además, también se puede atribuir a la baja disponibilidad de ellos en el ecosistema. En este caso, la relación que muestra un mejor ajuste es el Zn con un valor de R^2 de 0.65, mientras que el Fe muestra el valor de R^2 de 0.06 siendo la de menor ajuste (Figura 15).

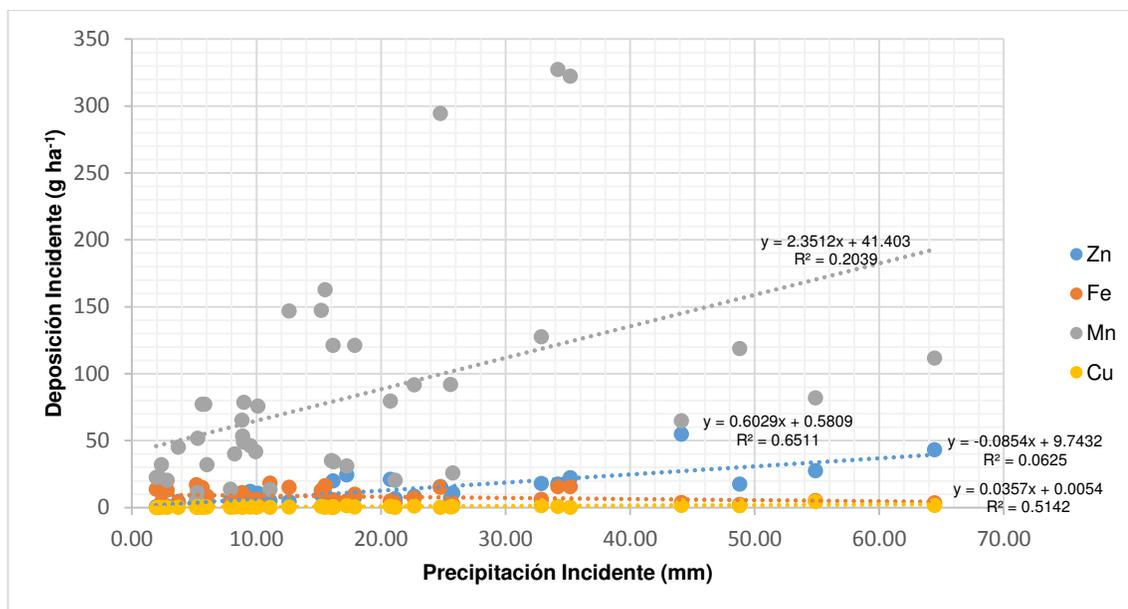


Figura 15. Relación entre precipitación incidente (mm) y deposición incidente (g/ha) en micronutrientes.

En el Cuadro 10 se encuentran expresados los estadísticos descriptivos de la precipitación incidente de la deposición de nutrientes, destacando los estadísticos de la Pi donde se encuentran valores en un rango de 2 a 64 mm de lluvia, con un valor medio de 17.16 mm, con un error estándar de 2.29 y una desviación de 14.85. En cuanto a la deposición de nutrientes, el mineral con el menor y mayor error son Mg y Mn con valores de 0.04 y 11.93, respectivamente. El nutriente con mayor dispersión de datos con respecto a la media (desviación estándar) es el Mn.

Cuadro 10. Estadísticos descriptivos en la precipitación incidente y deposición de macro y micronutrientes.

| Variable | Mínimo | Máximo | Media | Mediana | Error est. | Desv. est. |
|----------|--------|--------|-------|---------|------------|------------|
| Pi | 2 | 64 | 17.16 | 11.85 | 2.29 | 14.85 |
| Ca | 0.13 | 7.21 | 1.52 | 1.17 | 0.22 | 1.48 |
| Mg | 0.03 | 1.56 | 0.28 | 0.21 | 0.04 | 0.29 |
| Na | 0.03 | 4.03 | 0.76 | 0.47 | 0.12 | 0.82 |
| K | 0.04 | 1.78 | 0.41 | 0.33 | 0.05 | 0.37 |
| Zn | 0.73 | 54.89 | 10.92 | 6.96 | 1.71 | 11.09 |
| Fe | 1.53 | 18.18 | 8.28 | 5.96 | 0.78 | 5.07 |
| Mn | 6.12 | 327.37 | 81.75 | 59.15 | 11.93 | 77.32 |
| Cu | 0.03 | 4.37 | 0.61 | 0.42 | 0.11 | 0.74 |

N=42 para todos los casos, los valores para macronutrientes están representados en Kg ha⁻¹, para micronutrientes g ha⁻¹.

7.6.2. Precipitación neta

La precipitación neta, además de estar influenciada por factores atmosféricos, también es modificada por otros como la fenología y morfología de la especie.

Las ecuaciones de regresión muestran valores de R^2 de 0.77, 0.81, 0.72 y 0.50 para Ca, Na, K y Mg, respectivamente, siendo la precipitación neta una variable de predicción considerable en el depósito de nutrientes (Figura 16).

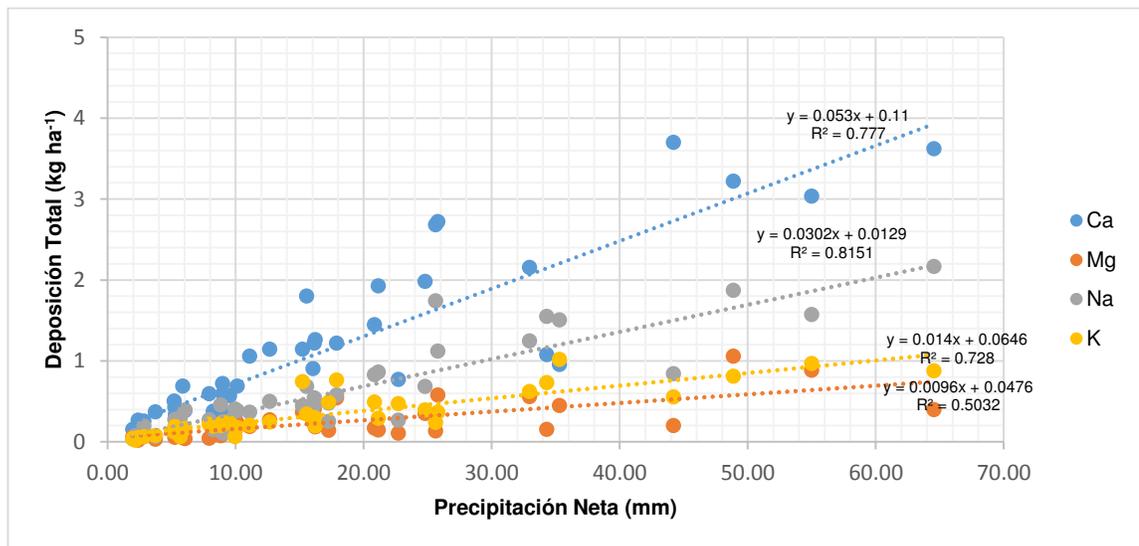


Figura 16. Relación entre precipitación neta (mm) y deposición total (Kg ha⁻¹) en macronutrientes.

En la Figura 17 se aprecia que en los micronutrientes, los ajustes de regresión muestran valores de R^2 de 0.25, 0.08, 0.37 y 0.37 para Mn, Fe, Zn y Cu, respectivamente, donde se puede apreciar que la cantidad precipitación no describe en su totalidad al depósito de nutrientes, esto debido a otros factores de deposición ya antes mencionados. En las precipitaciones menores a 30 mm, se presenta una mayor deposición de nutrientes.

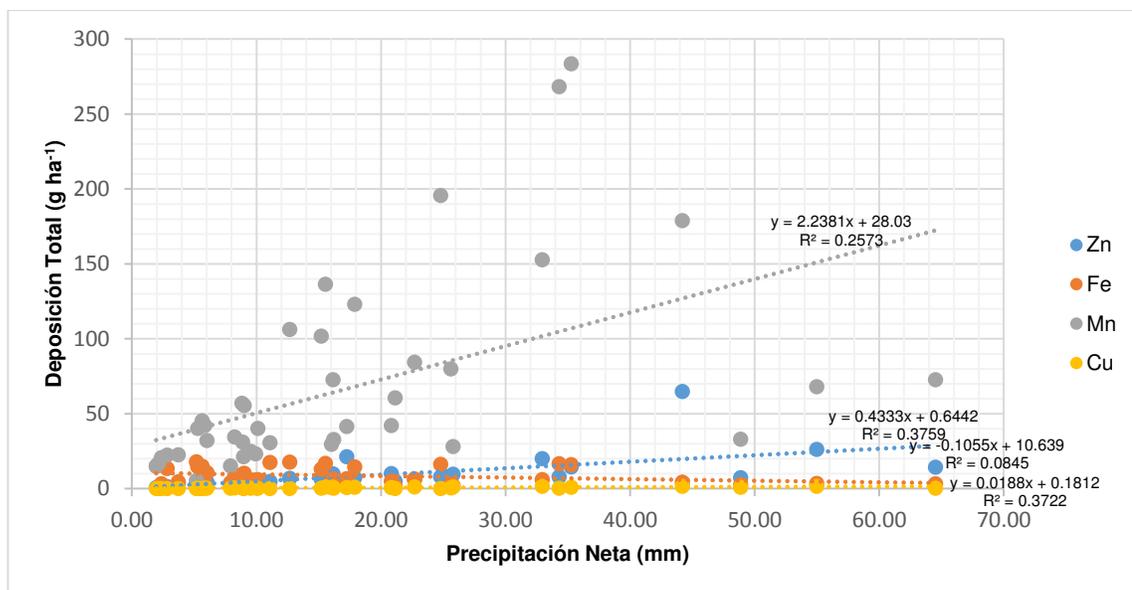


Figura 17. Relación entre precipitación neta (mm) y deposición total (g ha^{-1}) en micronutrientes.

En el Cuadro 11 están representados los valores estadísticos de la precipitación neta y de la deposición de nutrientes, destacando los estadísticos de la Pn donde se encuentran valores en un rango de 2 a 65 mm de lluvia, muy similar a los de Pi, diferenciados por solo una unidad, con un valor medio de 17.18 mm, con un error de 2.30 y una desviación de 14.88. En cuanto a la deposición de nutrientes, el mineral con el menor y mayor error estadístico son Mg y Mn con valores de 0.03 y 10.13, respectivamente. El nutriente con mayor dispersión de datos con respecto a la media (desviación estándar) es el Mn.

Cuadro 11. Estadísticos descriptivos en la precipitación neta y deposición de macro y micronutrientes.

| Variable | Mínimo | Máximo | Media | Mediana | Error est. | Desv. est. |
|-----------|--------|--------|-------|---------|------------|------------|
| <i>Pn</i> | 1.95 | 64.53 | 17.18 | 11.87 | 2.30 | 14.88 |
| Ca | 0.08 | 3.33 | 1.02 | 0.67 | 0.14 | 0.90 |
| Mg | 0.02 | 0.95 | 0.21 | 0.14 | 0.03 | 0.20 |
| Na | 0.03 | 1.95 | 0.53 | 0.35 | 0.08 | 0.50 |
| K | 0.02 | 0.92 | 0.31 | 0.21 | 0.04 | 0.24 |
| Zn | 0.76 | 64.83 | 8.09 | 5.00 | 1.62 | 10.52 |
| Fe | 1.82 | 18.00 | 8.83 | 6.64 | 0.83 | 5.40 |
| Mn | 3.79 | 283.44 | 66.49 | 40.80 | 10.13 | 65.67 |
| Cu | 0.01 | 1.65 | 0.50 | 0.33 | 0.07 | 0.46 |

N=42 para todos los casos, los valores para macronutrientes están representados en kg ha^{-1} , para micronutrientes g ha^{-1} .

8. DISCUSIÓN

La composición química de la precipitación varía al pasar por la cubierta vegetal, como resultado de la absorción, lixiviación, intensidad y volumen de la misma, así como la concentración de diversas sustancias encontradas en el dosel (Khan *et al.*, 1995; Xu *et al.*, 2001; Pryor y Barthelemie, 2005)

Son diversos los procesos o factores que intervienen en esta relación: unos físicos y químicos como el aumento de la dilución, la mayor capacidad de lavado por el agua que fluye a través del tronco, lo cual conlleva a un arrastre de lixiviados y deposición seca (Terradas, 2001); otros biológicos como la mayor exudación derivada de una mayor superficie intercambiante y posibilidad de más fauna y flora epífita (Bellot, 1989).

En los ecosistemas forestales, los nutrientes que llegan al suelo por medio del escurrimiento fustal, son de suma importancia, en está circula una menor cantidad de agua, pero representan mayores aportes de nutrientes (Herwitz, 1986).

La deposición total de nutrientes se determinó a partir de la cantidad de meses y número de eventos capturados; para esta investigación, se registraron 42 en realidad no existe un número de eventos definido para las evaluaciones. Xiao *et al.* (2002) reporta 33 eventos durante un período de cuatro meses. Para un análisis de nutrientes, Yáñez (2013) evaluó 56 eventos de lluvia para un análisis de interceptación de lluvia durante un año, mientras que Cantú y González (2001) emplean 53 eventos, en un periodo de evaluación de dos años, para análisis químico de nutrientes.

En esta investigación, se evaluó la deposición total considerando el periodo de lluvias que está conformado por los meses de Junio, Julio, Agosto y Septiembre del año 2016.

La mayoría de los eventos presentaron un volumen menor a 40 mm de precipitación incidente (37 casos). De los meses evaluados, Agosto fue el que registró la mayor cantidad de lluvia con 445.20 mm, lo cual representa el 46% de la precipitación total. Cantú y González (2001) registran un total de precipitación incidente de 974 mm para *Pinus pseudostrabus* Lind en el Noreste de México, en una investigación de 1996 a 1999. Xiao *et al.* (2002) evaluó *Pinus koraiensis* donde presentó una precipitación incidente de 469 mm en el periodo de Junio a Septiembre del año 2001. El porte de los individuos también influye en el flujo, a mayor diámetro mayor volumen de agua llega al suelo.

La cantidad de nutrientes en la precipitación tiene diversas fuentes de procedencia, entre estas destaca la acumulación de polvo terrestre, contaminantes atmosféricos, aerosoles marinos y emisiones volcánicas, entre otras. Likens *et al.* (1977), Bellot y Escarre (1988), Domingo (1991), Durand *et al.* (1992), Camarero y Catalán (1993), Gambell y Fisher (1996), entre otros, autores que cuentan con información acerca de los cambios y vías que siguen algunos de los nutrientes.

La deposición total de los macronutrientes se encontró en mayor proporción en la precipitación incidente con 125.72 kg ha⁻¹ a diferencia de las concentraciones de la precipitación directa 86.80 kg ha⁻¹. La vía de escurrimiento fustal presentó valores de deposición 0.20 kg ha⁻¹. Estos resultados indican que la vía principal de deposición de nutrientes es a través de la precipitación incidente, justificando que en la atmósfera existe una mayor cantidad de estos minerales derivados de actividades antropogénicas y polvos atmosféricos.

Respecto a la deposición total de micronutrientes, se encuentra un comportamiento similar, donde la vía principal de deposición es a través de precipitación incidente (4,272.37 g ha⁻¹), siguiéndole la vía de precipitación directa (3,517.24 g ha⁻¹) y por último el escurrimiento fustal (6.83 g ha⁻¹), lo cual indica que en la atmósfera hay un depósito elevado de micronutrientes.

Romero (2007) registró un aporte de nutrientes en precipitación incidente de Ca, Na, K y Mg de 19.65, 19.24, 6.06 y 2.67 kg ha⁻¹ respectivamente. Un escurrimiento fustal con 5.98, 5.21, 2.24 y 1.22 kg ha⁻¹ con el mismo orden y en precipitación directa solo reporta el valor de Ca con 22.50 kg ha⁻¹, evaluando *Pinus halepensis* Miller y *Pinus pinea* L en Alicante, España. Estos resultados coinciden con la alta concentración de Ca en todas las vías de redistribución y con el mismo orden de deposición de los nutrientes observados en el presente estudio.

En ambos análisis de micro y macronutrientes, *Pinus cooperi* presentó remoción de nutrientes, considerando entonces que el paso del agua de lluvia por las ramas, hojas, fuste y frutos produjo una disminución en los valores nutricionales de la precipitación. La circulación y arrastre de nutrientes en la precipitación, es obstruida por la estructura del fuste y corteza de la especie, a diferencia de otras especies, *Pinus cooperi* presenta una corteza rugosa lo que hace que el arrastre sea más lento. Además, la presencia y viscosidad de la resina provoca una adhesión de las sales, por lo que se necesitaría precipitaciones prolongadas para su depósito en el suelo. Otras posibles causas en la alteración de la precipitación al fluir a través de la cubierta vegetal son: la forma, superficie, textura de las hojas y la forma en que se disponen las ramas (Adams y Hutchinson, 1987). Domingo (1991), señala que la textura adherente de las hojas con presencia de resinas y numerosas fibras capilares, juegan un papel importante en la absorción, dilución y arrastre de nutrientes. La deposición seca da lugar a diversos procesos químicos y físicos con la cubierta vegetal y el agua de lluvia dificultando su determinación (Dasch, 1987).

De acuerdo a los valores de precipitación, se puede destacar que existe una predicción en la deposición de nutrientes (Ca, Na, K y Mg). En la mayoría de los casos, a menor precipitación mayor aporte de nutrientes. Mientras que para Zn, Fe, Mn y Cu no se cumple con esta tendencia, ya que la deposición puede verse afectada por otros factores ajenos a la precipitación.

9. CONCLUSIONES

La precipitación registrada para el periodo evaluado fue de 963.46 mm, la cantidad de precipitación es el factor determinante de los flujos, así como la intensidad y duración tienen efecto sobre la acumulación del volumen.

A partir de los datos obtenidos, se puede sugerir que la precipitación es una vía de gran impacto en los ingresos de nutrientes en los ecosistemas forestales, y con ello resaltar la importancia ecológica de *Pinus cooperi* para la solución de problemas edáficos en aspectos de nutrición.

En la deposición de macronutrientes, para la *Pd* y *Pi* se presenta un orden de mayor a menor $Ca > Na > K > Mg$ para ambos casos y en *Sf*, $Ca > K > Na > Mg$; donde se puede apreciar que la *Pd* y *Pi* presentan el mismo orden.

Con respecto a la deposición de los micronutrientes las tres vías presentaron el mismo orden de deposición, encontrando un orden de $Mn > Fe > Zn > Cu$; se puede asociar con la absorción de partículas sólidas en las superficies del follaje y ramas. El escurrimiento fustal es la vía con la menor entrada de agua en todos los eventos, pero presentó una deposición significativa.

La concentración de todos los nutrientes analizados no fue beneficiada al paso de la precipitación por el dosel, a excepción de Fe que presentó un enriquecimiento.

Por medio de la precipitación, durante el período de evaluación, se depositaron en el suelo 21.74 kg ha^{-1} de Ca, 8.05 kg ha^{-1} de K, 12.74 kg ha^{-1} de Na y 5.76 kg ha^{-1} de Mg. Para todos los elementos, se presentó una remoción significativamente alta. En relación a los micronutrientes, se lograron incorporar al suelo $2,151.27 \text{ g ha}^{-1}$ de Mn, 393.77 g ha^{-1} de Fe, 214.39 g ha^{-1} de Zn y 16.34 g ha^{-1} de Cu. En general, la deposición de macro y micronutrientes están

dominada por Ca y Mn, respectivamente, encontrándose en mayores cantidades en el componente atmosférico.

Las deposiciones de nutrientes con diferencias significativas en las tres vías, para la mayoría de los casos fueron detectadas en los eventos con menores precipitaciones, con un rango de 30 a 40 mm, aproximadamente.

El pH y conductividad eléctrica son modificados conforme el pluviolavado fluye a través del dosel en diferentes formas. El pH de Pi, Pd y Sf mostró valores promedio de 5.42, 5.23 y 4.96 respectivamente. Con ello se puede explicar que el agua al recorrer el fuste y copa del árbol es acidificada ligeramente, mientras que la CE mostró valores de $15.33 \mu\text{S cm}^{-1}$, $12.08 \mu\text{S cm}^{-1}$ y $39.06 \mu\text{S cm}^{-1}$ en el mismo orden. Estos valores indican que la estructura de la especie mejora la capacidad del traspaso de energía en las sales disueltas.

10. BIBLIOGRAFÍA

- Aboal, V .J. R. (1998). Los flujos netos hidrológicos y químicos asociados de un Bosque de Laurisilva en Tenerife, Tesis Doctoral. Universidad de la Laguna.
- Adams, C.M. & Hutchinson, T.C. (1987). Comparative abilities of leaf surfaces to neutralize acid raindrops II. The influence of leaf wettability, leaf age and rain duration on changes in droplet pH and Chemistry on leaf surfaces. *New Phytol.* 106, 437-456.
- Arnon, D. I., & Stout, P. R. (1939). The essentiality of certain elements in minute quantity for plants with special reference to copper. *Plant physiology*, 14(2), 371.
- Arroyave, Z. M. A. (2012). Dinámica del agua y los nutrientes solubles en agrosistemas cafeteros. Tesis Doctoral. Universidad Nacional de Colombia, Medellín
- Aston, A. R. (1979). Rainfall interception by eight small trees. *Journal of hydrology*, 42(3), 383-396.
- Bellot, J. (1989). Análisis de los flujos de deposición global, translocación, escorrentía cortical, Tesis Doctoral, Universidad de Alicante.
- Bellot, J., & Escarré, A. (1988). Balances de nutrientes en pequeñas cuencas de encinar. II. Quimismo de la precipitación y aportes de origen atmosférico. *Mediterránea Ser. Biol*, 10, 63-85.
- Bruijnzeel, L. A. (1990). Hydrology of moist tropical forests and effects of conversion: a state of knowledge review. *Hydrology of moist tropical forests and effects of conversion: a state of knowledge review*.
- Cakman, I. & A.M. Yazici. (2010). Magnesium: A forgotten element in crop Pproduction. *Better Crops*. 94(2):23-25
- Camarero, L., & Catalan, J. (1993). Chemistry of bulk precipitation in the central and eastern Pyrenees, northeast Spain. *Atmospheric Environment. Part A. General Topics*, 27(1), 83-94.

- Cantú, I. S., & González, H. R. (2001). Interception loss, throughfall and stemflow chemistry in pine and oak forests in northeastern Mexico. *Tree Physiology*, 21(12-13), 1009-1013.
- Dasch, J. M. (1987). Measurement of dry deposition to surfaces in deciduous and pine canopies. *Environmental Pollution*, 44(4), 261-277.
- Domingo, P.F. (1991). Papel de la cubierta vegetal en los aporte de nutrientes y salidas por avenamiento en una cuenca reforestada con coníferas en la Sierra de Filabres Alemania. Tesis Doctoral. Universidad de Alicante.
- Durand, P., Neal, C., & Lelong, F. (1992). Anthropogenic and natural contributions to the rainfall chemistry of a mountainous area in the Cevennes National Park (Mont-Lozere, southern France). *Journal of Hydrology*, 130(1-4), 71-85.
- Epstein, E. (1972). *Mineral nutrition of plants: principles and perspectives*.
- Epstein, E. (1999). Silicon. *Annual review of plant biology*, 50(1), 641-664.
- Fassbender, H. W. (1993). *Modelos edafológicos de sistemas agroforestales* (No. 29). Bib. Orton IICA/CATIE.
- Fölster, H., & Khanna, P. K. (1997). Dynamics of nutrient supply in plantation soils. *Aciar Monograph Series*, 43, 339-378.
- Gambell, A. W., & Fisher, D. W. (1966). Chemical composition of rainfall, eastern North Carolina and southeastern Virginia. *Geol. Surv. Water-Supply Pap.* United States.
- Guy, S. (2017), Nutrientes esenciales para las plantas, Macronutrientes, Consultado: 26-06-2017 en <http://www.smart-fertilizer.com/es/articles/potassium-in-plants>
- Herwitz, S. R. (1986). Episodic stemflow inputs of magnesium and potassium to a tropical forest floor during heavy rainfall events. *Oecologia*, 70(3), 423-425.
- Khan, M. A., Issac, V. C., & Bohra, D. N. (1990). Hydrological characteristics of Sardar Samand reservoir in arid Rajasthan. *Annals of Arid Zone*, 29(2), 87-92.
- Kimmins, J. P. (2004). *Forest ecology: A foundation for sustainable forest management and environmental ethics in forestry*. Prentice Hall.

- Jiménez, R. C. Calvo, A. J. C., & Arias, A. D. (2006). Lavado de nutrientes en plantaciones forestales de *Vochysia ferruginea* Mart. y *Vochysia guatemalensis* Donn. Sm., Sarapiquí, Costa Rica. *Revista Forestal Mesoamericana Kurú*, 3(8), 16-26.
- Junge, C. E., & Werby, R. T. (1958). The concentration of chloride, sodium, potassium, calcium, and sulfate in rain water over the United States. *Journal of Meteorology*, 15(5), 417-425.
- Klaassen, W., Lankreijer, H. J., & Veen, A. W. (1996). Rainfall interception near a forest edge. *Journal of Hydrology*, 185(1-4), 349-361.
- Li, Y. C., Alva, A. K., Calvert, D. V., & Zhang, M. (1997). Chemical composition of throughfall and stemflow from citrus canopies. *Journal of plant nutrition*, 20(10), 1351-1360.
- Likens, G.E., Bornan, F.H., Pierce, R.S., Eaton, J.S. & Johnson N.M. (1977). *Biogeochemistry of a forested ecosystem*. Springer-Verlag. New York.
- Lovejoy, T.E. (1988). Will unexpectedly the top blow off?. *BioScience*. 38: 722-726.
- Méndez, G. J. (1997). Perfil químico de la precipitación a través del dosel de cuatro especies de leguminosas de una plantación en Linares, NL. Tesis Doctoral. Universidad Autónoma de Nuevo León.
- Mengel, K., & Kirkby, E. A. (1978). *Principles of plant nutrition. Principles of plant nutrition*. Acad. Publ. Dordrecht.
- Monge, E., Val, J., Sanz, M., Blanco, A. & Montañés, L. (1994). El calcio nutriente para las plantas. Bitter pit en manzano. *An. Estac. Exp. Aula Dei*. 21(3): 189-201.
- Peña, M. E. R., Gómez, G., A., Fenn, E. M., Hernández de la Rosa, P., & Alvarado Rosales, D. (2016). Nutrientes en follaje y depósito húmedo de nitrato, amonio y sulfato del lavado de copa en bosques de *Abies religiosa*. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*. 14: 2793-2805
- PRO-MIX. (2016). La función de macro y micronutrientes en las plantas, consultado: 09-06-2017 en: <http://www.pthorticulture.com/es/centro-de-formacion/la-funcion-del-sodio-y-del-cloruro-en-el-cultivo-de-plantas/>

- Pryor, S. C., & Barthelmie, R. J. (2005). Liquid and chemical fluxes in precipitation, throughfall and stemflow: observations from a deciduous forest and a red pine plantation in the midwestern USA. *Water, air, and soil pollution*, 163(1-4), 203-227.
- Rodríguez, C. J., Alvarado, J. C. C., & Aguilar, D. A. (2006). Lavado de nutrientes en plantaciones forestales de *Vochysia ferruginea* Mart. y *Vochysia guatemalensis* Donn. Sm., Sarapiquí, Costa Rica. *Revista Forestal Mesoamericana Kurú*, 3(8), 16-26.
- Romero, C.L. (2007). Estudio de los flujos hídricos en las Dunas de Guardamar Del Segura. Tesis Doctoral. Universidad de Alicante.
- Santa Regina, L., Gallardo, J. F., San Miguel, C., & Moyano, A. (1989). Intercepción, pluviolavado y escorrentía cortical en una plantación de *Pinus sylvestris*. 10 (1): 19-27.
- Schroth, G., Elias, M. E. A., Uguen, K., Seixas, R., & Zech, W. (2001). Nutrient fluxes in rainfall, throughfall and stemflow in tree-based land use systems and spontaneous tree vegetation of central Amazonia. *Agriculture, ecosystems & environment*, 87(1), 37-49.
- Slatyer, R.O. (1962). Measurement of precipitation interception by an arid zone plant community (*Acacia aneura* F. Muell.). *Méthodologie en EcoPhysiologie Végétale*. ECKARDT, F.E. (ed.). *Actes Colloque de Montpellier*, UNESCO, 181-192.
- Terradas, J., & Terradas, J. (2001). *Ecología de la vegetación: de la ecofisiología de las plantas a la dinámica de comunidades y paisajes*. Ediciones Omega, Barcelona.
- Tobón M. C., Bouten, I.W. & Dekker, S. (2000), Forest floor water dynamics and root water uptake in four forest ecosystems in northwest Amazonia. *Journal of Hydrology*. 237, 169-183.
- Tobon-Marin, C. (1999). Monitoring and modelling hydrological fluxes in support of nutrient cycling studies in Amazonian rain forest ecosystems.
- Tukey, J. H. B. (1970). The leaching of substances from plants. *Annual review of plant physiology*, 21(1), 305-324.

- Xiao Y., Dai L., Niu D., Tong F., Chen G. & Deng H. (2002). Influence of canopy on precipitation and its nutrient elements in broad-leaved/Korean pine forest on the northern slope of Changbai Mountain. *Journal of Forestry Research*, 13(3), 201-204.
- Xiaoniu X., Qin W. Eiji H. (2005). Precipitation partitioning and related nutrient fluxes in a subtropical forest in Okinawa, Japan. *Annals of forest science*, 62(3), 245-252.
- Xu, Y. G., Zhou, G. Y., Wu, Z. M., Luo, T. S., & He, Z. C. (2001). Chemical composition of precipitation, throughfall and soil solutions at two forested sites in Guangzhou, South China. *Water, Air, and Soil Pollution*, 130(1-4), 1079-1084.
- Yáñez D.M.; Cantú S.I.; González R.H. & Uvalle S.J. (2014). Redistribución de la precipitación en tres especies arbustivas nativas y una plantación de eucalipto del noreste de México. *Tecnología y ciencias del agua*, 5(2), 71-84.