



UNIVERSIDAD  
NACIONAL  
DE COLOMBIA

**DINÁMICA DEL AGUA Y LOS NUTRIENTES SOLUBLES  
EN AGROSISTEMAS CAFETEROS**

MÓNICA ANDREA ARROYAVE ZAPATA

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA  
FACULTAD DE CIENCIAS AGRARIAS  
DEPARTAMENTO DE CIENCIAS FORESTALES  
MEDELLÍN  
2012**

**DINÁMICA DEL AGUA Y LOS NUTRIENTES SOLUBLES  
EN AGROSISTEMAS CAFETEROS**

MÓNICA ANDREA ARROYAVE ZAPATA

Tesis de grado para optar el título de  
Magister en Bosques y Conservación Ambiental

Director:

CONRADO TOBÓN MARÍN, PhD

Profesor Asociado

Ecohidrología – Hidropedología

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA  
FACULTAD DE CIENCIAS AGRARIAS  
DEPARTAMENTO DE CIENCIAS FORESTALES  
MEDELLÍN**

**2012**

Nota de Aceptación:

---

---

---

---

---

---

---

Firma del presidente del jurado

---

Firma del jurado

---

Firma del jurado

Medellín, noviembre de 2012

## **AGRADECIMIENTOS**

A Dios y al Universo por permitirme vivir esta maravillosa experiencia.

Al Centro Nacional de Investigaciones de Café - CENICAFE, por permitirme realizar el estudio en este importante Centro de Investigaciones, por el apoyo y acompañamiento de sus investigadores, en particular el equipo de trabajo de agroclimatología, y especialmente el Doctor Álvaro Jaramillo Robledo por su asesoría y enseñanzas permanentes.

Al equipo de trabajo de la subestación Paraguaicito, el ingeniero agrónomo Diego Fabián Montoya, Diego Fernando Osorio Londoño, Daniel Antonio Franco Chaurra y a don Jaime por toda su ayuda y colaboración durante el trabajo de campo.

A la Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín, a los profesores del posgrado en Bosques y Conservación Ambiental.

## TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN.....	10
INTRODUCCIÓN.....	12
1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	13
1.1 PREGUNTAS DE INVESTIGACIÓN.....	13
2. HIPOTESIS DE TRABAJO.....	14
3. JUSTIFICACION.....	15
4. OBJETIVOS.....	17
4.1 OBJETIVO GENERAL.....	17
4.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	17
5. MARCO TEÓRICO.....	18
5.1 SISTEMAS AGROFORESTALES.....	18
5.2 DINÁMICA DEL AGUA Y LOS NUTRIENTES.....	22
5.2.1 Precipitación.....	22
5.2.2 Precipitación neta y escurrimiento a través de los troncos de los árboles. .....	23
5.2.3 Interceptación.....	23
5.2.4 Evapotranspiración.....	24
5.2.5 Entrada de nutrientes en el suelo.....	25
5.2.6 Infiltración y Escorrentía.....	27
5.2.7 Almacenamiento de agua y nutrientes en el suelo.....	27
5.3 LA HIDROLOGÍA Y EL CICLO DE NUTRIENTES SOLUBLES EN SISTEMAS AGROFORESTALES DE CAFÉ.....	28

6. MATERIALES Y MÉTODOS .....	32
6.1 LOCALIZACIÓN .....	32
6.2 MÉTODOS .....	34
6.2.1 Medición de las variables hidrológicas. ....	35
6.2.2 Cuantificación de los nutrientes solubles. ....	39
6.3 ANÁLISIS ESTADÍSTICO .....	40
7. RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....	42
7.1 VARIABLES HIDROLÓGICAS .....	42
7.1.1 Precipitación neta e interceptación por el dosel. ....	43
7.1.2 Evapotranspiración.....	53
7.1.3 Flujo de agua a través de la hojarasca (FH). ....	54
7.1.4 Escorrentía. ....	57
7.1.5 Flujos de agua en el suelo .....	59
7.1.6 Balances hídricos .....	63
7.2 DINÁMICA DE LOS NUTRIENTES EN LOS AGROSISTEMAS DE CAFÉ..	65
7.2.1 Nutrientes en la precipitación total. ....	65
7.2.2 Nutrientes y flujos netos bajo el dosel, en las calles del cultivo y bajo la planta de café.....	67
7.2.3 Nutrientes en la escorrentía, a través de la hojarasca y en el suelo en los agrosistemas. ....	73
7.2.4 Dinámica de los nutrientes.....	79
7.2.5 Balance de los nutrientes. ....	84
8. CONCLUSIONES.....	86
BIBLIOGRAFÍA .....	88

## LISTA DE TABLAS

Tabla 1 . Algunas características físicas y químicas del horizonte orgánico de los suelos en la subestación Paraguaicito.....	33
Tabla 2. Características de los sistemas agroforestales de café. ....	34
Tabla 3. Precipitación neta acumulada en los agrosistemas de café .....	43
Tabla 4. Prueba de Kruskal-Wallis para precipitación neta por agrosistema .....	45
Tabla 5. Prueba de Kruskal-Wallis para precipitación neta por sitio en café a libre exposición.....	46
Tabla 6. Prueba de Kruskal-Wallis para precipitación neta por sitio en café pino..	47
Tabla 7. Prueba de Kruskal-Wallis para precipitación neta por sitio en café eucalipto .....	47
Tabla 8. Prueba de Kruskal-Wallis para precipitación neta por sitio en café nogal	48
Tabla 9. Flujo de agua a través de la hojarasca en los Agrosistemas .....	54
Tabla 10. Prueba de Kruskal - Wallis para el flujo de agua a través de la hojarasca por agrosistema. ....	55
Tabla 11. Prueba de Kruskal-Wallis para interceptación por hojarasca por agrosistema .....	56
Tabla 12. Prueba de Kruskal-Wallis para escorrentía por agrosistema .....	57
Tabla 13. Representatividad de la Escorrentía frente a la precipitación neta y precipitación total.....	58
Tabla 14. Infiltración en los Agrosistemas.....	59
Tabla 16. Flujo de agua y tensión de humedad a 15 y 30 cm de profundidad en los Agrosistemas.....	61
Tabla 17. Balance hídrico general de los agrosistemas .....	63
Tabla 18. Balance hídrico en el dosel .....	63
Tabla 19. Balance hídrico en la capa de hojarasca .....	64

Tabla 20. Flujo de nutrientes en el agrosistema de café a libre exposición .....	68
Tabla 21. Flujo de nutrientes en la precipitación neta en el agrosistema de café pino .....	68
Tabla 22. Flujo de nutrientes en la precipitación neta en el agrosistema de café eucalipto .....	69
Tabla 23. Flujo de nutrientes en la precipitación neta en el agrosistema de café nogal. ....	70

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Distribución de los pluviómetros por fuera de los agrosistemas .....	35
Figura 2. Distribución de los pluviómetros al interior de los agrosistema .....	36
Figura 3. Esquema de lisímetros para coleccionar agua a 15 y 30 cm de profundidad (tomado y adaptado de Jaramillo 2004 y 2005) .....	37
Figura 4. Precipitación total entre octubre (2006) y mayo (2007) alrededor de los agrosistemas evaluados.....	42
Figura 5. Porcentaje de precipitación neta respecto a la precipitación total en los agrosistemas.....	44
Figura 6. Porcentaje de precipitación neta e interceptación en los agrosistemas, respecto a la precipitación total.....	51
Figura 7. Concentración de nutrientes en la precipitación total .....	65
Figura 8. Flujo de nutrientes en agrosistema de café a libre exposición. ....	74
Figura 9. Flujo de nutrientes en agrosistema de café pino .....	75
Figura 10. Flujo de nutrientes en agrosistema de Café Eucalipto .....	76
Figura 11. Flujo de nutrientes en agrosistema de Café nogal. ....	77
Figura 12. Dinámica del Calcio en los agrosistemas cafeteros. ....	80

Figura 13. Dinámica del Fosforo en los agrosistemas cafeteros.....	81
Figura 14. Dinámica del Magnesio en los agrosistemas cafeteros.....	83
Figura 15. Dinámica del Potasio en los agrosistemas cafeteros.....	84

## LISTA DE GRÁFICAS

Gráfica 1. Prueba de Kruskal-Wallis para precipitación neta por agrosistema .....	46
Gráfica 2. Prueba de Kruskal-Wallis para precipitación neta por sitio en café a libre exposición .....	47
Gráfica 3. Prueba de Kruskal-Wallis para precipitación neta por sitio en café pino .....	47
Gráfica 4. Prueba de Kruskal-Wallis para precipitación neta por sitio en café eucalipto .....	48
Gráfica 5. Prueba de Kruskal-Wallis para precipitación neta por sitio en café nogal .....	48
Gráfica 6. Prueba de Kruskal-Wallis para precipitación neta en la calle del cultivo por agrosistema .....	49
Gráfica 7. Prueba de Kruskal-Wallis para precipitación neta bajo el café por agrosistema .....	49
Gráfica 8. Prueba de Kruskal-Wallis para el flujo de agua a través de la hojarasca por agrosistema .....	55
Gráfica 9. Prueba de Kruskal-Wallis para interceptación por hojarasca por agrosistema .....	56
Gráfica 10. Prueba de Kruskal-Wallis para escorrentía por agrosistema .....	57

## RESUMEN

Con el objeto caracterizar y cuantificar los procesos hidrológicos y del ciclo de nutrientes en agrosistemas forestales de café y a libre exposición y conocer la dinámica y funcionamiento de estos agrosistemas, se realizó un estudio en tres agrosistemas forestales con café (*Cordia alliodora*, *Eucalyptus grandis* y *Pinus oocarpa*) y uno a libre exposición en la subestación experimental de Paraguaicito (CENICAFE) en el municipio de Buenavista (departamento del Quindío) , donde se caracterizaron y cuantificaron variables hidrológicas (precipitación total, neta, escorrentía, flujo a través de la hojarasca y flujos a 15 y 30 cm) y los nutrientes solubles (K, Ca, Mg y P) en estas mismas variables entre los meses de octubre de 2006 y mayo de 2007.

Como resultado de dicho estudio se pudo establecer que el comportamiento y los flujos de agua y de nutrientes entre agrosistemas forestales de café y a libre exposición presentan algunas diferencias en las variables y compartimientos (dosel y hojarasca) debido a las características propias del componente arbóreo que lo constituyen, como su estructura, características del follaje, estructura del tronco y requerimientos nutricionales.

La interceptación de agua por el dosel fue mayor en café pino y la menor en café a libre exposición, por tanto la mayor precipitación neta se encontró en este último agrosistema, presentándose mayor cantidad de agua en las calles del cultivo que bajo las plantas de café.

Respecto al flujo de agua por debajo de la hojarasca, no existen diferencias significativas entre los cuatro agrosistemas de acuerdo al análisis estadístico, sin embargo, el menor flujo se presentó en el café pino, lo cual puede estar relacionado con la cantidad, las características y la disposición de la hojarasca en este agrosistema, favoreciendo el proceso de escorrentía más que el de infiltración. Respecto a la escorrentía, esta fue la única variable hidrológica que presentó diferencias estadísticas significativas entre los agrosistemas, siendo el café pino, el de mayor variación.

Los balances hídrico general y por compartimientos indican pérdidas de agua para el agrosistema; las cuales pueden significar en términos generales que durante el paso por el agrosistema, este gana agua de otros compartimientos, que posteriormente pueden ser llevados a capas más profundas del suelo o ser aprovechada para la evapotranspiración.

Se presentó un aumento en la concentración de todos los nutrientes al pasar por el dosel en los agrosistemas y en el paso por la hojarasca; siendo el agrosistema de café nogal el que presentó mayores flujos y concentraciones de P, Mg y Ca, lo que significa que los flujos de agua se enriquecen al pasar por este mantillo; solamente el K se presenta en mayor cantidad y concentración en el agrosistema de café a libre exposición. El agrosistema café pino tuvo la menor cantidad de nutrientes por debajo de la capa de hojarasca.

El balance de los flujos de nutrientes presenta ligeras variaciones en las proporciones y concentraciones en los diferentes agrosistemas, debido a las características particulares de las especies, así como los requerimientos hidrológicos de cada una y a las características físicas, químicas y biológicas de la capa de hojarasca y del suelo.

## 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.

Algunos de los sistemas productivos en los que se han reconocido bondades en el manejo de nutrientes y agua son los agroforestales, definidos como sistemas de uso de la tierra que implican la combinación de árboles forestales con cultivos agrícolas o pecuarios. Estos, han sido considerados como benéficos en el aspecto de nutrientes, ya que los árboles son capaces de mantener o aumentar la fertilidad de los suelos a través del reciclaje de nutrientes, mantenimiento de la materia orgánica del suelo por medio de la producción y descomposición de hojarasca (Palm y Sánchez, 1990; Wallace y otros, 2005). Respecto a la hidrología, mejoran el uso eficiente del agua a través de la producción de hojarasca, que permite la disminución de flujos como escorrentía, evaporación del suelo y drenaje; redistribuyen la lluvia, sus raíces pueden absorber agua desde capas inferiores del suelo y depositarla en las superiores, proporcionando humedad (Bonnell, 2005; Wallace y otros, 2005; Fassbender, 1987; Giraldo y Jaramillo, 2004).

El presente trabajo, cuyo objetivo fue caracterizar y cuantificar los procesos hidrológicos y del ciclo de nutrientes en tres agrosistemas forestales con café (*Cordia alliodora*, *Eucalyptus grandis* y *Pinus oocarpa*) y uno a libre exposición, busca suministrar bases para comprender cómo se distribuye y manejan el agua y los nutrientes en estos sistemas productivos.

El experimento se realizó en cuatro agrosistemas ubicados en la subestación Paraguaicito del Centro Nacional de Investigaciones de Café - CENICAFE, en el municipio de Buenavista, departamento del Quindío, y para el logro de los objetivos se caracterizaron y cuantificaron variables hidrológicas (precipitación total, neta, escorrentía, flujo a través de la hojarasca y flujos a 15 y 30 cm) y los nutrientes solubles (K, Ca, Mg y P) en estas mismas variables.

## 1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Las formaciones vegetales naturales han sido modificadas por el hombre para establecer sus asentamientos y sistemas productivos, entre ellos el café, que inicialmente se manejó bajo sombrero y posteriormente a libre exposición solar en busca de una mayor producción y productividad (Jaramillo y Chaves, 1998). Los cambios en las coberturas vegetales y en el manejo de los sistemas productivos ocasionan alteraciones al entorno y afectan en diferentes magnitudes los flujos y balances de radiación solar, energía, hídricos y de nutrientes (Bruijnzeel, 1990). Como consecuencia de los impactos de estas alteraciones, se ha prestado, de nuevo, interés y atención a prácticas con mayor eficiencia en el uso de la tierra y del agua como la agroforestería (Wallace y otros, 2005; Montagnini y otros, 2000).

Estos sistemas agroforestales han sido considerados como benéficos para el ambiente y para el sistema productivo, tanto en aspectos de nutrientes como en la regulación y redistribución del agua dentro del cultivo, factores importantes en la su producción y desarrollo, por ello es necesario continuar evaluando las características y el comportamiento hidrológico y de nutrientes de los sistemas agroforestales del café, con el fin de conocer el impacto positivo o negativo del componente arbóreo y por tanto comprender el funcionamiento y estructura de estos sistemas productivos.

### 1.1 PREGUNTAS DE INVESTIGACIÓN

¿Cuál es el comportamiento de los flujos de agua y del transporte de nutrientes a través de los diferentes compartimientos de los agrosistemas forestales de café y a libre exposición en Colombia?

¿Cuáles son las principales características de los procesos hidrológicos y del transporte de nutrientes en los agrosistemas forestales de café y a libre exposición?

## 2. HIPOTESIS DE TRABAJO

Los sistemas agroforestales de café con nogal, eucalipto y pino presentan dinámicas hidrológicas diferentes en todos los compartimientos del agrosistema con respecto al café a libre exposición, porque el componente arbóreo genera condiciones específicas que regulan el movimiento del agua.

Los flujos y concentraciones de nutrientes en los compartimientos y variables hidrológicas difieren entre los sistemas agroforestales de café con nogal, eucalipto y pino con el agrosistema de café a libre exposición debido a la presencia y características del componente arbóreo que los constituyen.

### 3. JUSTIFICACION

El movimiento del agua y de los nutrientes dentro de los ecosistemas, naturales o transformados, es vital para el desarrollo de sus procesos físicos, químicos, biológicos y productivos, por lo tanto, profundizar en el conocimiento de estos procesos y las interacciones de los componentes de los sistemas agroforestales cafeteros, se convierte en una contribución al conocimiento y comprensión del funcionamiento, requerimientos y limitaciones de estos sistemas productivos y las especies forestales usadas como sombrío.

Se han realizado diferentes estudios relacionados con balance hidrológico, transporte y lixiviación de nutrientes en sistemas agroforestales de café (Giraldo y Jaramillo, 2004; Arguello, 1995; Imbach y otros, 1989) que indican relaciones directas entre la hidrología y la cantidad de nutrientes que entran, así como estudios sobre la interceptación, percolación, comportamiento de la humedad volumétrica que indican y evalúan el comportamiento de estas variables en los sistemas agroforestales y que en algunos casos muestran como la cobertura arbórea es un factor importante en estos procesos.

Sin embargo, dentro de los componentes del agrosistema, la capa de hojarasca y el horizonte orgánico han sido poco estudiados y considerados dentro del manejo de los sistemas agroforestales cafeteros, por ello, su estudio hidrológico y de nutrientes suministra las bases para comprender cómo se distribuye y maneja el agua y los nutrientes en estos sistemas productivos. Los resultados pueden reflejarse en la generación de criterios técnicos y prácticas de manejo adecuadas y eficientes que conlleven a beneficios sociales, económicos y ambientales, como la disminución de costos de producción, el aprovechamiento de especies forestales, la protección de las fuentes de agua, el suelo y la diversidad biológica.

Este estudio generará la información básica necesaria para proponer un manejo adecuado del sombrío, teniendo en cuenta su influencia en la dinámica y disponibilidad de agua y de nutrientes para los cultivos de café, así como para dar un uso racional de los fertilizantes una vez determinados los aportes de nutrientes que se presentan por el reciclaje dentro de los agrosistemas.

Ampliar el conocimiento de la hidrología y los nutrientes en sistemas agroforestales es relevante puesto que éstos han sido considerados como una opción promisoría para el uso eficiente y sostenible del suelo y el agua, lo cual daría bases o criterios para su promoción e implementación, de acuerdo con los beneficios, limitaciones y ventajas que estos sistemas productivos pueden ofrecer.

Los resultados del estudio son una base fundamental para iniciar el proceso de modelación de la hidrología y el ciclaje de nutrientes en estos sistemas agroforestales cafeteros, siendo la modelación una herramienta útil tanto en la descripción de los ecosistemas como en la representación simplificada de procesos e interacciones, que permite resaltar los aspectos más sobresalientes de un sistema. La modelación de la hidrología y el movimiento de los elementos químicos en los agrosistemas cafeteros permite formular relaciones entre los componentes y predecir comportamientos, que pueden ayudar en la comprensión de la estructura y el funcionamiento de los mismos y por tanto en el manejo y eventual mejoramiento de los componentes del sistema. Para llevar a cabo la modelación, algunas de las etapas necesarias son la identificación y conocimiento de los componentes y los procesos involucrados dentro del sistema y la toma de mediciones en cada uno de los componentes, etapas que se llevarán a cabo y producirán los resultados necesarios durante este estudio para la modelación en sistemas agroforestales cafeteros.

## **4. OBJETIVOS**

### **4.1 OBJETIVO GENERAL**

Caracterizar y cuantificar los procesos hidrológicos y del ciclo de nutrientes en agrosistemas forestales de café y a libre exposición.

### **4.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

4.2.1 Llevar a cabo un estudio del ciclo hidrológico en los sistemas agroforestales de café y en café a libre exposición.

4.2.2 Cuantificar el contenido de nutrientes solubles en cada uno de los compartimientos de los sistemas agroforestales de café y en café a libre exposición.

4.2.3 Elaborar un balance hídrico y de nutrientes solubles en tres agrosistemas forestales con café y en café a libre exposición.

## 5. MARCO TEÓRICO

### 5.1 SISTEMAS AGROFORESTALES

El ecosistema es la base unitaria de estructura y funcionamiento de la naturaleza, está conformado por los organismos vivos y su ambiente; se caracterizan por tener una serie de elementos definidos y muy bien establecidos; ellos son sus límites, los flujos de entrada y salida, sus componentes abióticos y bióticos y la interrelaciones o interacciones que existen entre los diferentes componentes (Odum, 1965).

Los ecosistemas están expuestos a diferentes perturbaciones naturales y antropogénicas que afectan en diferentes magnitudes los balances de radiación solar, de energía, hídricos y de nutrientes (Bruijnzeel, 1990). Entre los disturbios se encuentran los cambios en la cobertura vegetal, las quemadas, talas, producción o cosecha de plantaciones forestales, cambios en el uso del suelo y extracción de madera, entre otras (Cavelier, 2002; Jordán, 1985; Montagnini y otros, 2002; Price, 1982), los cuales producen alteraciones y modificaciones en el suelo en cuanto a su flora y fauna (disminución en la actividad biológica), hidrología (disminución de la interceptación de la vegetación, disminución en la retención y en el movimiento del agua en el suelo), microclima (incremento de la temperatura, disminución en la humedad relativa, incremento en la radiación incidente en la superficie del suelo), balance de energía (incremento en las fluctuaciones de la temperatura del suelo, cambio en la capacidad calórica del suelo) y nivel de nutrientes (disminución de la materia orgánica, disminución en el nivel de bases, disminución en el ciclaje de nutrientes), así mismo estos disturbios humanos se convierten en la mayor amenaza a la biodiversidad local (Bonnell, 2005; Price, 1982; Dobson y otros, 1997).

El establecimiento de cultivos o plantaciones de café, cacao, pino o caucho han ocasionado fuertes alteraciones sobre el entorno; como consecuencia de ello, en los últimos años se ha prestado atención e interés a prácticas de manejo con mayor eficiencia en el uso de la tierra y del agua como la agroforestería, que propone un manejo tradicional de la tierra para aumentar su productividad y

sostenibilidad (Wallace y otros, 2005; Montagnini y otros, 2000). Este sistema de uso de la tierra brinda beneficios importantes a los ecosistemas y mejora las condiciones biofísicas y biológicas de los mismos, y al ser, un sistema de manejo de los recursos naturales dinámicos, con bases ecológicas, diversifica y sustenta la producción de productores para un aumento de los beneficios sociales, económicos y ambientales (Leakey, 1997).

La agroforestería se ha definido como una serie de sistemas y tecnologías de uso de la tierra que implican la combinación de árboles forestales con cultivos agrícolas y/o pecuarios en función del tiempo y el espacio para incrementar optimizar la producción en forma sostenible (Wallace y otros, 2005; Fassbender, 1987; Schroth y Sinclair, 2003) aprovechando los efectos benéficos de las interacciones de los componentes arbóreos con el componente animal o cultivo, para obtener un patrón productivo comparable con el que se obtiene generalmente de los mismos recursos disponibles en el monocultivo (Farrel y otros, 1997). Los sistemas agroforestales han sido considerados como benéficos tanto para el ambiente como para el sistema productivo, especialmente en el aspecto de nutrientes, ya que los árboles son capaces de mantener o aumentar la fertilidad de los suelos a través del reciclaje de nutrientes, mantenimiento de la materia orgánica del suelo por medio de la producción y descomposición de hojarasca y de los residuos de podas (Mafongoya y otros, 1998; Palm y Sánchez, 1990; Wallace y otros, 2005).

Los árboles en los sistemas agroforestales contribuyen en la regeneración de la fertilidad del suelo: a través de sus raíces toman los nutrientes de capas inferiores del suelo y los transportan a las zonas más superficiales con el fin de ser disponibles para los cultivos; la hojarasca producida por ellos permite que las plantas tomen los nutrientes almacenados allí; los árboles aumentan la cantidad de nutrientes circulando en el suelo, ya que a través de las asociaciones de micorrizas pueden capturar una mezcla de nutrientes a las que no son accesibles los cultivos y proveen fuentes adicionales de nitrógeno por la utilización de especies fijadoras de este nutriente (CATIE y OTS, 1986; Schroth y otros, 2001; Schroth y Sinclair, 2003; Beer, 1988). Todas estas ventajas permiten una mayor eficiencia en el ciclo de nutrientes en los sistemas agroforestales que en los sistemas basados en cultivos anuales tradicionales.

Las características del reciclaje de nutrientes tales como la cantidad de hojarasca producida, su composición química y su tasa de descomposición influyen en los impactos que tienen los árboles sobre el suelo. La hojarasca de los árboles

puede ser usada como abono verde con diferentes resultados: la rápida descomposición del abono puede acelerar el crecimiento de cultivos asociados en suelos pobres, mientras que en otros casos, una hojarasca más persistente puede constituirse en una fuente constante de nutrientes y una mejor cobertura del suelo a lo largo del año (Montagnini y otros, 2000).

Respecto a la hidrología, los sistemas agroforestales mejoran el uso eficiente del agua a través de la producción de hojarasca, que permite la disminución de flujos como escorrentía, evaporación del suelo y drenaje; los árboles del sistema agroforestal redistribuyen la lluvia, sus raíces pueden absorber agua desde capas inferiores del suelo y depositarla en las superiores, proporcionando humedad (Bonnell, 2005; Wallace y otros, 2005; Fassbender, 1987; Giraldo y Jaramillo, 2004; Jose y otros, 2004; Ong y otros, 2002; Schroth y otros, 2001).

Los sistemas agroforestales también conservan y protegen el suelo debido a la habilidad de mantener buena y abundante cobertura de hojarasca que disminuye el efecto erosivo de las gotas de lluvia, proporcionan estructura al suelo; protegen al cultivo de los vientos, pueden modificar el microclima en términos de temperatura, regulan la radiación en los diferentes estratos vegetales, el contenido de vapor de agua, la velocidad del viento, es decir, reducen los impactos negativos sobre el ambiente y los recursos naturales; permiten una captura más eficiente de la energía solar y favorecen la adsorción, retención o captura de carbono y nitrógeno sobre y bajo el suelo (Altieri, 1999; Shepherd y Montagnini, 1999; Beer y otros, 2003; Bonnell, 2005; Fassbender, 1987; Jose y otro, 2004;); la agroforestería provee una mezcla de beneficios y servicios comerciales y no comerciales como alimento, productos maderables, conservación de suelos, mejoramiento de la calidad del agua y del aire, captación de carbono y conservación de biodiversidad (Alavalapati y otros, 2004; Montagnini y Fair, 2004) que en algún momento podrían representar beneficios o incentivos económicos a las comunidades.

A pesar de las múltiples ventajas atribuidas al uso de sombrero en los cultivos, se recalca que el éxito de la agroforestería radica fuertemente en la explotación de las interacciones y que su uso no solo depende de los efectos fisiológicos que puede provocar en el desarrollo del cultivo, sino también de factores edáficos, climáticos, de los recursos y de las especies usadas como sombrero (Beer y otros, 1998; Beer, 1997). En el caso de las especies forestales, aún se desconocen los efectos de éstas sobre los sistemas productivos, debido a la competencia por agua, nutrientes, luz, capacidad de acidificar el suelo, causar erosión, entre otras

(Farfán y Urrego, 2004; García y Ong, 2004), que se podrían convertir en desventajas de los sistemas agroforestales, por lo cual es necesario conocer las características y bondades o efectos de diversas especies potenciales de sombrero sobre la hidrología y los nutrientes.

Existe la necesidad de ampliar el conocimiento de los sistemas agroforestales en aspectos como la hidrología, la profundidad de las raíces de árboles en cultivo y el papel de las raíces profundas en el mantenimiento y restauración de la fertilidad del suelo y el ciclaje de nutrientes (Bonnell, 2005) que conlleven a un uso eficiente de la tierra y el agua, ya que estos sistemas productivos se han propuesto como una buena alternativa. En el caso de los sistemas productivos cafeteros, estos han sufrido diversas transformaciones, inicialmente con un manejo bajo sombrero y posteriormente a libre exposición, sin embargo en los últimos años las prácticas agroforestales con café han retomado importancia; estas transformaciones conllevan a cambios en los componentes de los ciclos energéticos y del agua, que no han sido evaluados y cuantificados para la zona cafetera (Bruijnzeel, 1990).

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 (Proctor, 2005; Fassbender, 1987; O'connell y Sankaran, 1997; Parker, 1983). Además, del ciclo de nutrientes dependen otras funciones del ecosistema como la fotosíntesis y la respiración. Por tanto, 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 (Nilsson y otros, 1995). 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.

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, 2003). 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.

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; Jordán, 1985; Montagnini y otros, 2002; Price, 1982; Vitousek y Sanford, 1986).

## 5.2 DINÁMICA DEL AGUA Y LOS NUTRIENTES

### 5.2.1 Precipitación.

La precipitación se refiere a alguna forma de depósito de agua sólida o líquida proveniente de la atmósfera, incluye la lluvia, la nieve, el granizo, el rocío y la neblina. La lluvia como tal se refiere a depósito de agua líquida. Según (Cavelier y otros, 2002), el agua de las lluvias se obtiene de la condensación del agua que se evapora de la superficie (de océanos y continentes) y del agua que transpiran las plantas, formando las nubes, en donde y de acuerdo a la temperatura, las gotas de agua o cristales crecen hasta que por su peso y la acción de la gravedad se precipitan a la superficie del suelo (Jaramillo, 2005).

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 (Zona de Convergencia Intertropical – ZCIT), entre otros factores (Fassbender y Grimm, 1981).

### 5.2.2 Precipitación neta y escurrimiento a través de los troncos de los árboles.

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 (lluvia neta) y como escurrimiento a través de los troncos de los árboles. Tobón (1999) definió precipitación neta como la suma de la proporción de la precipitación que pasa 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. De acuerdo con varios autores, 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 y otros, 2000; Veneklaas, 1990; Parker 1983), asimismo, el flujo de nutrientes en la lluvia neta es mayor en los sistemas con doseles más cerrados (Tobón y otros, 2000; Schrot y otros, 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 y otros, 1997).

La medición de la precipitación neta es uno de los componentes del ciclo hidrológico que ha tenido mayor atención debido a los resultados de alta variabilidad espacial y temporal en los diversos estudios realizados, dicha variabilidad se ha atribuido a la diferencias climáticas, de vegetación y de procedimientos para su medición (Bruijnzeel, 1990).

La movilización de nutrientes desde las diferentes partes de la planta al suelo con el paso de la precipitación a través del dosel, se convierte en una forma de transferir adicionalmente elementos directamente a la mezcla de nutrientes disponibles sin la intervención de ningún proceso de descomposición (Eaton y otros, 1973).

### 5.2.3 Interceptación.

La interceptación de la precipitación por la vegetación se ha definido como la parte del agua que ingresa al ecosistema y es retenida por la parte aérea de las plantas e hidrológicamente, es agua que retorna a la atmósfera por evaporación, en función de la temperatura y la radiación solar, es decir, no alcanza el suelo (Fassbender y Grimm, 1981; Walsh, 1996; Tobón, 1999,); por lo tanto esta

fracción representa una pérdida de agua desde el ecosistema, ya que no aporta en la humedad del suelo y por tanto en la toma de agua por las raíces y la posterior transpiración.

La fracción de agua interceptada por el dosel de la vegetación depende de la cantidad de agua incidente, la intensidad de la lluvia, la distribución, el índice de área foliar, el tipo de vegetación, condiciones que modifican las tasas de interceptación de la lluvia (Tobón, 1999, Imbach y otros, 1989) y que originan cambios en las relaciones en el balance hídrico, especialmente en los volúmenes de agua de escorrentía, de infiltración y en la cantidad de agua almacenada en el suelo.

En los bosques montanos tropicales, el agua absorbida por epífitas es considerada como pérdida de agua por interceptación, ya que este tipo de vegetación modifica las condiciones de almacenamiento en la parte aérea de la planta. La abundancia de epífitas sugiere una influencia potencial importante en los flujos de agua y nutrientes de la parte aérea del bosque; la absorción de nutrientes por epífitas puede contribuir a la disminución de los flujos de nutrientes en este tipo de bosque. (Tobón y otros, 2010; Veneklaas, 1990).

#### 5.2.4 Evapotranspiración.

La evapotranspiración es considerada como una salida dentro del ecosistema e incluye el volumen de agua que se evapora desde la superficie del follaje y del suelo, y el agua que se pierde desde las hojas a través de los estomas por la transpiración, pérdida inevitable como consecuencia de la asimilación del carbono y el proceso de fotosíntesis (Cavelier y otros, 2002). La evaporación es un proceso determinante en el ciclo hidrológico y es un factor de gran importancia en el microclima y en el balance de energía de los agrosistemas (Jaramillo, 2005). La transpiración se considera un proceso complejo determinado directamente por las condiciones climáticas (radiación, temperatura, humedad relativa), las características de la vegetación (resistencia estomática, resistencia aerodinámica) y la disponibilidad de agua en el suelo (Cavelier y otros, 2002).

Las condiciones específicas de evaporación y transpiración de los sistemas agroforestales son diferentes de acuerdo a sus características microclimáticas (temperatura, humedad, viento), influenciadas por la arquitectura de la vegetación, el sistema radicular, la biomasa de las hojas y la actividad fotosintética, determinando una transpiración específica para cada sistema (Imbach y otros, 1989).

### 5.2.5 Entrada de nutrientes en el suelo.

Además de la entrada de nutrientes al suelo vía escurrimiento cortical y lluvia neta, la hojarasca y la descomposición de la materia orgánica del suelo proveen nutrientes en forma disponible a las plantas, con lo cual se completaría el ciclo de nutrientes en los ecosistemas (Muoghalu, 2003; Tobón y otros, 2000a; Parker, 1983; Vitousek y Sanford, 1986.)

5.2.5.1 Hojarasca. Sobre el suelo de algunos ecosistemas se encuentra una capa de hojarasca, producida por la pérdida de la biomasa de los ecosistemas y está constituida por restos de la vegetación, la cual al ser descompuesta libera nutrientes a la superficie o al interior del suelo; las raíces de las plantas pueden tomar estos nutrientes directamente de la hojarasca o a través de la humedad del suelo e incorporarlos de nuevo a su biomasa, completando así una parte importante del ciclo de nutrientes como es la toma de los elementos para el crecimiento y la producción de los ecosistemas; procesos en los cuales, y como se mencionó anteriormente, son claves la hidrología y los nutrientes. Según Veneklaas (1990) en los bosques montanos, la hojarasca cumple un papel determinante en los ciclos del nitrógeno y del fósforo.

Tobón (1999) y Tobón y otros (2000a) en sus estudios en el Amazonas, definieron que la hojarasca, además de tener un rol significativo en el ciclo de nutrientes, es importante en el balance hídrico de los ecosistemas, ya que controla el flujo del agua, intercepta parte de la lluvia neta, interviene en la escorrentía, protege el suelo de procesos erosivos y contribuye a la estabilidad de las características del suelo; además allí se ubican gran proporción de raíces finas que toman el agua almacenada en este compartimiento. Otros autores (Giraldo, 1992); Golding y Stanton, 1972; Putuhena y Corddery, 1996) han determinado también que la capa de hojarasca puede influir en el contenido de humedad de las capas superficiales del suelo y en la interceptación de agua bajo diferentes tipos de cobertura; reiterándose su importancia en la hidrología del suelo.

Con base en diferentes estudios realizados que comparan el aporte de nutrientes a los ecosistemas entre precipitación (lluvia) y hojarasca, se determina que cada uno de estos flujos o reservorios aporta en diferente magnitud, concentración y cantidad al ciclo de nutrientes y que existen factores que determinan estas diferencias como es el caso de la época de lluvia o sequía; Muoghalu (2003) encontró que en la época lluviosa se deposita la mayor cantidad de nutrientes por precipitación y durante la época seca por hojarasca, la mayoría de nutrientes

provenientes de la precipitación son solubles y por tanto más disponibles para las plantas. Estas diferencias inducen a que los estudios del ciclo de nutrientes en un ecosistema debe abarcar ambas vías de entrada para conocer el aporte de cada una.

La hojarasca garantiza el ciclaje de nutrientes y de materia orgánica y logra efectos importantes en la protección del suelo (insolación directa, aceleración de la humificación), además del mejoramiento de las condiciones microclimáticas (microorganismos) y físicas (aireación y retención del agua); es una reserva transitoria de elementos nutritivos (Tobón y otros, 2010a; Fassbender, 1987).

5.2.5.2 Descomposición de la materia orgánica. La materia orgánica es el resultado de los procesos biológicos del sistema de producción y descomposición y está constituida por una mezcla heterogénea de residuos animales y/o vegetales en diferentes estados de alteración, y de productos sintetizados a partir de la microflora y microfauna edáfica (Burdon, 2001; Fassbender, 1987). Es reconocida como un importante medio de transferencia y reservorio de nutrientes para las plantas, interviene en la regulación del pH y en la capacidad de intercambio catiónico (Jordán, 1985; Suárez, 2001), se considera que ésta, unida a los minerales del suelo es el mayor reservorio para nitrógeno y azufre, además de otros nutrientes como fósforo, calcio, potasio y magnesio; su descomposición juega un rol importante en el desarrollo de suelo y piso del bosque (Kimmins, 2003).

La descomposición es considerada como un paso crítico en el funcionamiento del ecosistema, ya que si los nutrientes se liberan rápidamente, se pueden perder por medio de la escorrentía, volatilización o percolación y esta pérdida de materia orgánica puede causar efectos sobre las condiciones físicas y químicas del suelo como la fertilidad, humedad y resistencia a la erosión (Clark, 2002; Kimmins, 2003); por el contrario, si se descomponen de manera muy lenta, hay poca disponibilidad de nutrientes para las plantas, lo cual puede inhibir su crecimiento y productividad. Así mismo, el contenido de materia orgánica en el suelo puede afectar positivamente la capacidad de almacenamiento de agua y la retención de humedad (Tobón y otros 2010a).

Es importante resaltar que tanto la hojarasca como los procesos de descomposición de la materia orgánica están determinados por una variedad de factores como son la composición de las especies del ecosistema, estado de

sucesión, temperatura, precipitación, altitud, latitud, contenido de humedad del suelo, actividad microbiana, contenido de lignina y polifenoles, características morfológicas y calidad del material vegetal, composición química y acidez de la hojarasca, estado de fertilidad del suelo, entre otros, que deben ser tenidos en cuenta en el momento de estudiar este compartimiento y su proceso de descomposición (Austin y Vitousek, 2000; Goncalves y otros, 1997; Kimmins, J., 2003; Bonnell, 2005; Montagnini y otros, 2002; Palm, PALM, 1995; Sundarapandian y Swamy, 1999)

#### 5.2.6 Infiltración y Escorrentía.

Además de ser el suelo un reservorio de nutrientes y de agua, allí se llevan a cabo procesos o flujos que se convierten en salidas o pérdidas del ecosistema como son la infiltración y la escorrentía, los cuales alimentan el caudal de las quebradas o ríos y además arrastran nutrientes que no han sido almacenados o absorbidos por las plantas. La escorrentía es considerada como la proporción de lluvia que llega al suelo y fluye sobre la superficie del terreno, sin infiltrarse hacia las capas profundas del suelo para llegar a los cauces. La infiltración se refiere a la proporción de lluvia neta que ingresa al perfil del suelo, una parte es tomada por las plantas y regresa a la superficie vía transpiración y otra parte drena para suplir las aguas subterráneas (Bruijnzeel, 1990). Estos flujos están determinados por factores como la cobertura vegetal del ecosistema y del suelo, las características físicas y químicas del suelo, condiciones climáticas y perturbaciones en el ecosistema, entre otros.

Como en la mayoría de los casos no existe una sola variable que determine el patrón del ciclo hidrológico y por tanto el de nutrientes, es posible señalar que la diversidad de características edáficas, geomorfológicas, climáticas, fertilidad de los suelos, uso del suelo, estado sucesional del ecosistema, puede producir diferencias en los flujos y almacenamientos de agua lo que afecta los patrones del ciclo de nutrientes (Fassbender, 1981; Grimm y Parker, 1983; Landsberg, 1997; Sollins, 1989). Por lo tanto, aunque los procesos sean los mismos, su importancia y magnitud puede cambiar de forma considerable entre ecosistemas, es decir, de un bosque a otro, de una cobertura vegetal a otra, de un tipo de suelo a otro y de una zona climática a otra.

#### 5.2.7 Almacenamiento de agua y nutrientes en el suelo.

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). La cantidad de agua disponible en el suelo es importante para determinar los procesos de transpiración de la vegetación. El contenido de agua en el suelo y la concentración de nutrientes varía ampliamente y están determinados por diversos factores como la cobertura vegetal, topografía, características físicas y químicas del suelo como profundidad, textura, estructura, mineralogía, carga química, drenaje local, condiciones microbiológicas y contenido de materia orgánica (Jaramillo, 2005; Fassbender, 1987; Sollins, 1989; Walsh, 1996).

### 5.3 LA HIDROLOGÍA Y EL CICLO DE NUTRIENTES SOLUBLES EN SISTEMAS AGROFORESTALES DE CAFÉ

Las ventajas atribuidas a los sistemas agroforestales pueden representar productividad y sostenibilidad en estos sistemas productivos, por lo cual se han realizado diferentes estudios en sistemas agroforestales de café en cuanto a hidrología y nutrientes con el fin de conocer y evaluar los beneficios o efectos negativos de ellos; tal es el caso de Giraldo, (2003) y Giraldo y Jaramillo (2004) quienes describieron los fenómenos de redistribución de la lluvia y el transporte de nutrimentos en los componentes del ciclo hidrológico en cafetales bajo diferentes densidades de sombrío y concluyen que dichos sistemas de producción son importantes en la regulación de las pérdidas hídricas debido al sombrío y la hojarasca producida por los árboles, la cual retiene una parte del agua que de otra manera se perdería como escorrentía o percolación. Así mismo, exponen que algunos de los nutrientes en los ecosistemas dependen de las especies de sombrío debido a que éstas difieren significativamente en la composición de la biomasa.

Además se ha encontrado que las tasas de descomposición de la hojarasca de las especies arbóreas varían y esto se debe a la composición química del follaje de cada una de las especies (Arguello, 1995), por lo cual es importante saber qué especies se van a manejar en los sistemas agroforestales, además el tipo y la cantidad de follaje pueden variar de acuerdo a las especies y la densidad de siembra de las mismas, lo que influye en la capacidad de retención de humedad y de nutrientes en la hojarasca. Estos resultados se pueden relacionar con los obtenidos por Beer y otros (1998) quienes estudiaron la producción de hojarasca y el ciclaje de nutrientes en plantaciones de café y cacao bajo sombrío, con conclusiones similares.

Diferentes investigadores han realizado estudios relacionados con balance hidrológico, transporte y lixiviación de nutrientes en sistemas agroforestales de café (Giraldo y Jaramillo, 2004; Arguello, 1995; Imbach y otros, 1989) que indican relaciones directas entre la hidrología y la cantidad de nutrientes que entran, se almacenan en compartimentos de los ecosistemas y finalmente salen de los mismos, siendo la cobertura arbórea un factor importante en estos procesos. Así mismo, Jaramillo y Cháves (1998, 1999) realizaron diferentes estudios comparando la hidrología de cafetales con bosques tanto a nivel de interceptación como de movimiento del agua en el suelo. En uno de sus estudios (1998) se evaluó y caracterizó la interceptación por estos ecosistemas, encontrando diferencias en los valores debido a la presencia de cobertura arbórea. En otra de sus investigaciones (1999) cuantificaron las diferencias que ocurren en los componentes del balance hidrológico debido al cambio de la cobertura vegetal en sistemas agroforestales de café, encontrando diferencias significativas en los valores de percolación y en el comportamiento de la humedad volumétrica del suelo durante un periodo de gran deficiencia de lluvia como el ocurrido durante el Fenómeno Cálido del Pacífico (El Niño 1997 – 1998), presentándose deficiencia de agua en el suelo del cafetal a libre exposición, el cual tiene un horizonte orgánico muy deteriorado; contrario a lo ocurrido en el suelo del cafetal bajo sombrío, con un mayor horizonte orgánico. Estas condiciones también pueden afectar la disponibilidad de nutrientes para los cultivos.

Entre otros autores que han estudiado las características y redistribución de las lluvias en cafetales se encuentran Trojer (1955), quien concluye que la cantidad de lluvia que logra humedecer las hojas o llegar al suelo, depende de la intensidad y cantidad de lluvias así como de los vientos. Jaramillo (1999, 2003, 2004) ha realizado diversos estudios relacionados con la distribución, caracterización de la lluvia y balances hídricos, así como su relación con el movimiento de nutrientes en sistemas productivos de café llegando a conclusiones similares de otros estudios, como es el caso de la menor pérdida de nutrientes por escorrentía que por percolación, variación en la cantidad de agua almacenada en la parte aérea de los diferentes ecosistemas y en las cantidades de los elementos químicos para los diferentes sombríos del café, las cuales están relacionadas con las especies de sombrío.

También se ha evaluado el escurrimiento y la pérdida de suelo en diferentes agrosistemas de café, encontrando menor tasa de escurrimiento en el cafetal a libre exposición pero altas tasas de infiltración, lo que se atribuye a la presencia de hojarasca en el suelo (Arellano, 2001). Al estudiar el movimiento del agua en el

suelo, Suárez y Rodríguez (1958) determinaron que las pérdidas por escorrentía y percolación y el contenido de humedad en el suelo son afectadas por la presencia de cobertura sobre éste, así mismo, encontraron que las mayores pérdidas de elementos nutricionales se presentan por percolación, variando su concentración de acuerdo a la distribución de las lluvias, la fertilidad y el tratamiento de los suelos.

Igualmente, se han estudiado el ciclo de nutrimentos y la actividad microbiana en cafetales a libre exposición y con sombrío de guamo (*Inga sp*), encontrando diferencias en la cantidad de materia orgánica en el suelo y por tanto de hojarasca y en el ingreso de nutrimentos, siendo mayores en los sistemas agroforestales, mientras que las tasas anuales de descomposición de la hojarasca fueron menores en éstos, sin embargo algunos nutrientes como potasio, hierro y magnesio presentaron valores más altos en los agrosistemas a libre exposición, los cuales estuvieron relacionados con la aplicación de fertilizantes (Cardona, 2004 y Cardona y Sadeghian, 2005).

Respecto a la hojarasca, Urrego y Farfán, (2002) realizaron un estudio referente a los aportes de hojarasca en cafetales a libre exposición y con sombrío de tres especies forestales (pino, eucalipto y nogal); durante la primer colección (al tercer año) se encontraron diferencias marcadas en la iniciación de los aportes de hojarasca de las especies de sombrío, siendo el pino la especie con mayor periodo de retención foliar; no se detectaron diferencias estadísticamente significativas en las cantidades de hojarasca aportadas por los cafetos bajo ninguno de los sombríos; la especie de sombrío que mayor aporte de biomasa tuvo fue el eucalipto; los patrones de aportes de hojarasca del café y las especies de sombrío están influenciados por las variaciones en la humedad del suelo, en el café también influyen los patrones de producción y cosecha del grano. En la segunda colección (séptimo año) se presentaron diferencias significativas en las cantidades de hojarasca aportadas, siendo mayores los aportes en el café a libre exposición y café bajo pino. Se concluye que cantidad de hojas aportadas está relacionada directamente con la edad y el tamaño del árbol, así como el desarrollo y la expansión de sus copas.

Sin embargo y a pesar de los trabajos realizados, es necesario continuar con los estudios, así como lo propone Ranger y otros, (2001) al plantear que investigaciones del componente suelo, hojarasca, flujos hídricos y de nutrientes y factores que los pueden afectar son necesarios, debido a que la poca atención a

estos, constituye un vacío de conocimiento importante para la comprensión del funcionamiento y estructura de los sistemas.

## 6. MATERIALES Y MÉTODOS

### 6.1 LOCALIZACIÓN

El estudio se llevó a cabo en la subestación experimental Paraguaicito de CENICAFÉ (Centro Nacional de Investigaciones en Café), ubicada en el municipio de Buenavista, departamento del Quindío, en coordenadas geográficas 04°24' Latitud Norte y 75°44' Longitud oeste, a una altitud de 1.203 metros.

Las características climáticas anuales en la estación experimental son: una precipitación de 2.150 mm, evaporación de 1.324 mm, brillo solar de 1.720 horas/año, temperatura media de 21,3°C y una humedad relativa de 77% (Federación Nacional de Cafeteros de Colombia, archivos de información climática).

La zona de estudio y por tanto las parcelas en las que se desarrolló la investigación, se encuentra ubicada sobre suelos de la unidad cartográfica Montenegro y algunas de las características físicas y químicas se presentan en la Tabla 1.

Tabla 1 . Algunas características físicas y químicas del horizonte orgánico de los suelos en la subestación Paraguaicito.

<b>Propiedades</b>	<b>Descripción</b>
Clasificación Taxonómica	Melanudands, Fulvudands, Hapludands
Unidad Cartográfica	Unidad Montenegro
Textura	Franco, Franco arenoso
Estructura	Tipo: Migajosa, Bloques subangulares Grado: Débil - Moderado
Materia Orgánica	3 – 8%
Saturación de Bases	7 – 16%
Capacidad de Intercambio Catiónico	85 – 16 meq/100 g de suelo
pH	5,0 – 6,2
Fertilidad	Baja
Retención de Humedad	Media – baja
Productividad	Alta
Pendiente	5 – 20%
Altitud	1250 – 1750 m
Temperatura	17 – 22°C
Vocación	Café al sol y a la sombra Plátano Banano
Susceptibilidad a la erosión	Alta, Tipo laminar, en surcos, cárcavas y soliflucción
Densidad aparente (g/cm <sup>3</sup> ) del horizonte orgánico	0,75
Potasio (cmol <sub>c</sub> /Kg)	1,10
Calcio (cmol <sub>c</sub> /Kg)	3,46
Magnesio (cmol <sub>c</sub> /Kg)	0,73

Fuente: Cenicafé

## 6.2 MÉTODOS

Para caracterizar los procesos relacionados con la hidrología y los nutrientes solubles se seleccionaron cuatro parcelas correspondientes a tres sistemas agroforestales cafeteros y uno a libre exposición, las cuales se encuentran ubicadas sobre la misma zona de la subestación Paraguaicito, en condiciones de terreno similares y de forma continua. Los sistemas agroforestales tuvieron como componentes arbóreos las especies de, 1- nogal cafetero (*Cordia alliodora*), 2- eucalipto (*Eucalyptus grandis*) y 3- pino (*Pinus oocarpa*), los cuales fueron establecidos en el año 1994 y un año más tarde se estableció el café (Farfán y Urrego, 2004); sus características se presentan en la Tabla 2.

Tabla 2. Características de los sistemas agroforestales de café.

Características	Agrosistemas	
	Libre exposición	Agroforestal
Área de la parcela (m <sup>2</sup> )	900	900
Distancia de siembra de café (m)	1.5 x 1.5	1.5 x 1.5
Densidad de siembra de café (plantas/Ha)	4.500	4.500
Plantas de café por parcela	405	405
Distancia de siembra de la especie forestal (m)		6 x 6
Densidad de siembra del sombrío (árboles/Ha)		278
Árboles totales por parcela		36

Fuente: Farfán y Urrego (2004).

Los sistemas agroforestales en los cuales se realizó el experimento presentaron una cobertura de dosel muy similar, el agrosistema de café eucalipto presentó el mayor porcentaje con el 76%; seguido de café – pino con 73% y por último el de café nogal con 71% de cobertura.

### 6.2.1 Medición de las variables hidrológicas.

La caracterización del ciclo hidrológico se realizó entre los meses de octubre de 2006 y mayo de 2007 (231 días), período durante el cual se midieron las variables hidrológicas después de cada evento de precipitación (80) en cada uno de los agrosistemas, de acuerdo al siguiente procedimiento:

6.2.1.1 Precipitación Total (PT). La lluvia por fuera de los agrosistemas se cuantificó mediante seis (6) pluviómetros con un área de captación de 0,011 m<sup>2</sup> cada uno, instalados alrededor de los cuatro agrosistemas, con el fin de abarcar toda el área de estudio (Figura 1).

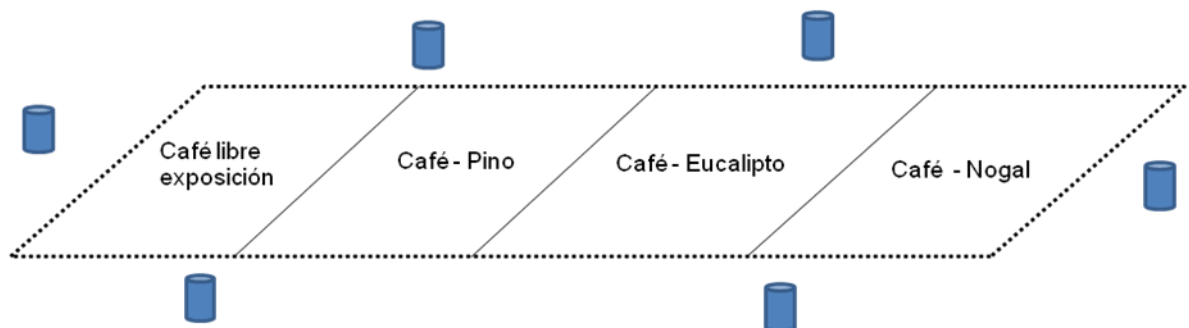


Figura 1. Distribución de los pluviómetros por fuera de los agrosistemas

6.2.1.2 Precipitación neta (PN). Para este estudio se considera precipitación neta a la cantidad de agua que alcanza el suelo, después de atravesar el dosel. La cantidad de agua lluvia que pasó a través de la vegetación se determinó por medio de 10 pluviómetros con un área de captación de 0,011 m<sup>2</sup> cada uno, ubicados sobre la superficie del suelo (cinco de ellos se instalaron por debajo de las plantas de café y los cinco restantes en las calles del cultivo), es decir, se ubicó un pluviómetro bajo el café y el siguiente fue ubicado en la calle del cultivo y así sucesivamente hasta cruzar todo el cultivo (Figura 2). Durante el tiempo de medición, los pluviómetros se rotaron por cuatro filas más.

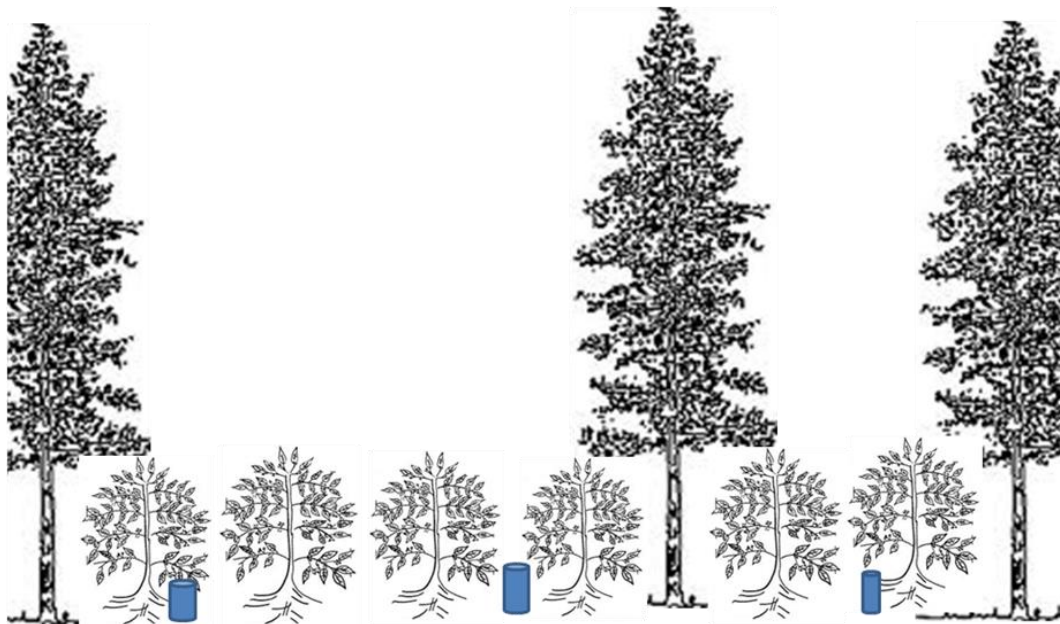


Figura 2. Distribución de los pluviómetros al interior de los agrosistema

6.2.1.3 Interceptación (I). Para el cálculo de la interceptación (ecuación 1), se usó lo propuesto por Rutter y otros (1975) y se considera como la diferencia entre los acumulados de precipitación total (PT) y los de la precipitación neta (PN).

$$I = PT - PN \quad (\text{Ecuación 1})$$

En el análisis de la interceptación se tuvo en cuenta la cobertura del dosel de los sistemas agroforestales del estudio, la cual fue determinada por Smurfit Cartón de Colombia S.A (2004) a través del software PIPEcv (Procesador de imágenes para estimación de Cobertura Vegetal) mediante 13 fotos digitales en cada parcela (la cámara fotográfica se ubicó de manera horizontal a una altura de 1 m desde el nivel del suelo).

6.2.1.4 Flujo de agua a través de la hojarasca (FH). Para la medición de la cantidad de precipitación neta que atraviesa la capa de hojarasca en cada uno de los agrosistemas, se adecuaron e instalaron tres lisímetros de succión cero, con un área de captación de 0.064 m<sup>2</sup> en cada una de las parcelas, mediante

recipientes plásticos cubiertos por una malla para evitar la entrada de material sólido, conectados a colectores de agua a través de una manguera. Estos lisímetros se instalaron en el límite entre la capa de hojarasca y el suelo mineral.

6.2.1.5 Humedad del suelo. La tensión de humedad del suelo se determinó mediante la instalación de dos tensiómetros de mercurio a diferentes profundidades, uno a 15 cm y otro a 30 cm, ubicados en los mismos tres sitios de muestreo del flujo de agua a través de la hojarasca en cada agrosistema.

6.2.1.6 Infiltración. La infiltración se calculó haciendo uso del método indirecto, calculándola como la diferencia entre la precipitación neta (PN) y la escorrentía (E) (ecuación 2).

$$Inf = PN - E \quad (\text{Ecuación 2})$$

6.2.1.7 Flujo de agua a 15 y 30 cm de profundidad. Para la medición de la cantidad de agua que llega a profundidades de 15 y 30 cm, en cada agrosistema se adecuaron e instalaron dos lisímetros de succión con un área de captación de 0.008 m<sup>2</sup> cada uno, los cuales se construyeron con tubos de PVC biselados en uno de sus extremos para facilitar su penetración en el suelo (adaptado de Giraldo y Jaramillo, 2004); estos tubos fueron introducidos en el perfil de suelo hasta 15 y 30 cm de profundidad respectivamente, haciendo coincidir el borde superior con el nivel de la superficie; cada tubo fue taponado en su parte inferior y conectado mediante una manguera a un recipiente plástico para recolectar el agua que fluye a estas profundidades (Figura 3).

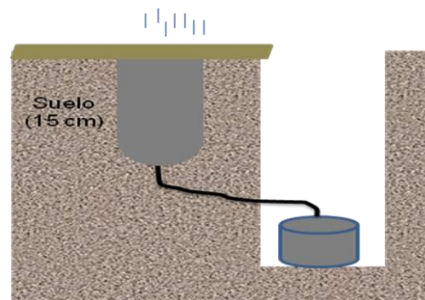


Figura 3. Esquema de lisímetros para coleccionar agua a 15 y 30 cm de profundidad (tomado y adaptado de Jaramillo 2004 y 2005)

6.2.1.8 Escorrentía (E). La escorrentía superficial se determinó en cada parcela mediante la adecuación y limitación de tres predios de escorrentía, ubicados en sentido de la pendiente y con un área de captación de 6 m<sup>2</sup> cada uno; en su parte inferior se instaló una canaleta que condujo el agua desde el predio de escorrentía hasta un colector. Para cada predio de escorrentía se calculó la pendiente.

6.2.1.9 Balance Hídrico. El balance hídrico para cada agrosistema se basó en Jiménez (1986), el cual propone la siguiente ecuación para calcularlo (ecuación 3):

$$P = \Delta H + E + ET + D \quad (\text{Ecuación 3})$$

Donde P (mm) es la precipitación total;  $\Delta H$  es el cambio en el contenido de humedad; E (mm) es la escorrentía; ET (mm) es la evapotranspiración y D (mm) es el drenaje.

Para el cálculo de la evapotranspiración se utilizó la ecuación propuesta por CENICAFE (Ecuación 4), en donde esta variable se calcula con función de la elevación sobre el nivel del mar. Esta ecuación fue obtenida realizando una regresión a los valores obtenidos de aplicar el método de Penman a los datos de estaciones climáticas en Colombia.

$$ETP = 1700,17 \exp(-0,0002h) \quad (\text{Ecuación 4})$$

Donde, ETP es la evapotranspiración potencial (mm/ año) y  $h$  es la altura sobre el nivel del mar (m).

Además de elaborarse un balance hídrico para todo el agrosistema, se realizaron balances hídricos por compartimientos, los cuales permiten identificar procesos y facilitar su cuantificación, para este estudio se realizaron balances hídricos en el dosel y en la capa de hojarasca siguiendo las ecuaciones propuestas por Tobón

(1999 y 2005), quien establece que el balance hídrico está compuesto por cada una de las entradas en balance con las salidas de cada compartimiento; las entradas son determinadas por encima de la cobertura a estudiar.

Para el balance hídrico en el compartimiento del dosel, este se calculó con base en la siguiente ecuación (ecuación 5):

$$\Delta S_v / \Delta t = PT - (I + PN) \quad (\text{Ecuación 5})$$

Donde, PT (mm/día) es la precipitación total, I (mm/día) es la cantidad de agua interceptada por la vegetación y evaporada directamente desde el dosel; PN es la precipitación neta y  $\Delta S_v$  es cambio en la cantidad de agua en el dosel de la vegetación, en un tiempo dado.

Para el balance hídrico en el compartimiento de la hojarasca, que está dado por la precipitación neta (PN) en balance con la cantidad de agua que drena hacia el suelo mineral al pasar por la hojarasca (FIH), la escorrentía y la interceptación por la hojarasca; se adaptó la ecuación de Tobón (1995 y 2005) y se planteó la siguiente (ecuación 6):

$$\Delta S_{ff} / \Delta t = PN - (IH + FIH + E) \quad (\text{Ecuación 6})$$

### 6.2.2 Cuantificación de los nutrientes solubles.

Para conocer el comportamiento y el flujo de nutrientes solubles en el agua (Ca, K, Mg y P) en cada una de las variables hidrológicas de todos los agrosistemas, se realizaron cuatro jornadas de muestreo (diciembre de 2006, febrero, abril y mayo de 2007), de acuerdo al siguiente procedimiento:

El día del muestreo, después de la medición de las variables hidrológicas, se recolectaron, de los correspondientes colectores de precipitación total, precipitación neta, escorrentía y flujo a través de la hojarasca, muestras

mezcladas de agua, formando una sola muestra por variable y por agrosistema, la cual se etiquetó, almacenó a 6°C, y se transportó a los laboratorios de Multilab en CENICAFE el mismo día del muestreo, para su posterior análisis químico.

Las muestras de agua para el análisis de los nutrientes a 15 y 30 cm de profundidad, se tomaron por medio de microlisímetros de succión aplicada (tubos con una cápsula de cerámica porosa en un extremo y un tapón de ajuste en el otro, cuya bomba de succión fue una jeringa plástica de 15 cm<sup>3</sup>) y para su recolección, se extrajo el aire del tubo para lograr la absorción de agua desde el suelo. En cada parcela se adecuaron tres sitios de muestreo, donde se introdujeron de forma horizontal en el suelo dos microlisímetros a estas profundidades.

El análisis químico para determinar Ca, K, Mg y P de las muestras de agua se llevó a cabo a través de las técnicas de espectrofotometría de absorción atómica Micro - Kjeldahl, KCl 2 M.

Con los datos obtenidos y las cantidades de nutrimentos en mg l<sup>-1</sup> para cada una de las variables evaluadas, se efectuaron comparaciones teniendo en cuenta el componente del ciclo hidrológico y el agrosistema.

Se realizó el balance de todos nutrientes para cada uno de los agrosistemas, de modo análogo a la ecuación del balance hídrico, expresándose como una diferencia entre las cantidades de elementos que entran al agrosistema y las que salen (Aboal, 1998).

### 6.3 ANÁLISIS ESTADÍSTICO

El modelo estadístico que describe el comportamiento de las variables hidrológicas estudiadas en los cuatros agrosistemas es el siguiente:

$$Y_{ij} = \mu + B_j + e_{ij}$$

Donde, **Y** es la variable hidrológica (precipitación total, precipitación neta, flujo de agua a través de la hojarasca, escorrentía, flujo de agua a 15 y 30 cm de profundidad), **i** es la observación (dato) registrado (1,2... 80) , **j** es el agrosistema (café a libre exposición, café pino, café eucalipto y café nogal), **B<sub>j</sub>** es el efecto del agrosistema **j** en las variables hidrológicas y **e<sub>ij</sub>** es el término de error aleatorio.

Debido a que no se cumplen los supuestos de normalidad y homocedasticidad en los errores, las estimaciones se realizaron utilizando la prueba de Kruskal – Wallis.

## 7. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 7.1 VARIABLES HIDROLÓGICAS

Durante las 80 observaciones realizadas, consistentes en los eventos de lluvia registrados en los pluviómetros ubicados por fuera de los agrosistemas evaluados, se recolectó un total de 1226,4 mm durante el período de estudio (231 días). Los meses en los cuales se presentó mayor precipitación fueron diciembre (2006) y abril (2007) con un acumulado de 231,18 mm y 281,17 mm respectivamente. El evento que presentó la mayor precipitación se registró en el mes de mayo con 67,67 mm, sin embargo fue la acumulación de dos días de lluvia; el evento con menor precipitación se registró en el mes de octubre con 0.46 mm. En la Figura 4 se presenta el comportamiento de la precipitación total durante el período de estudio.

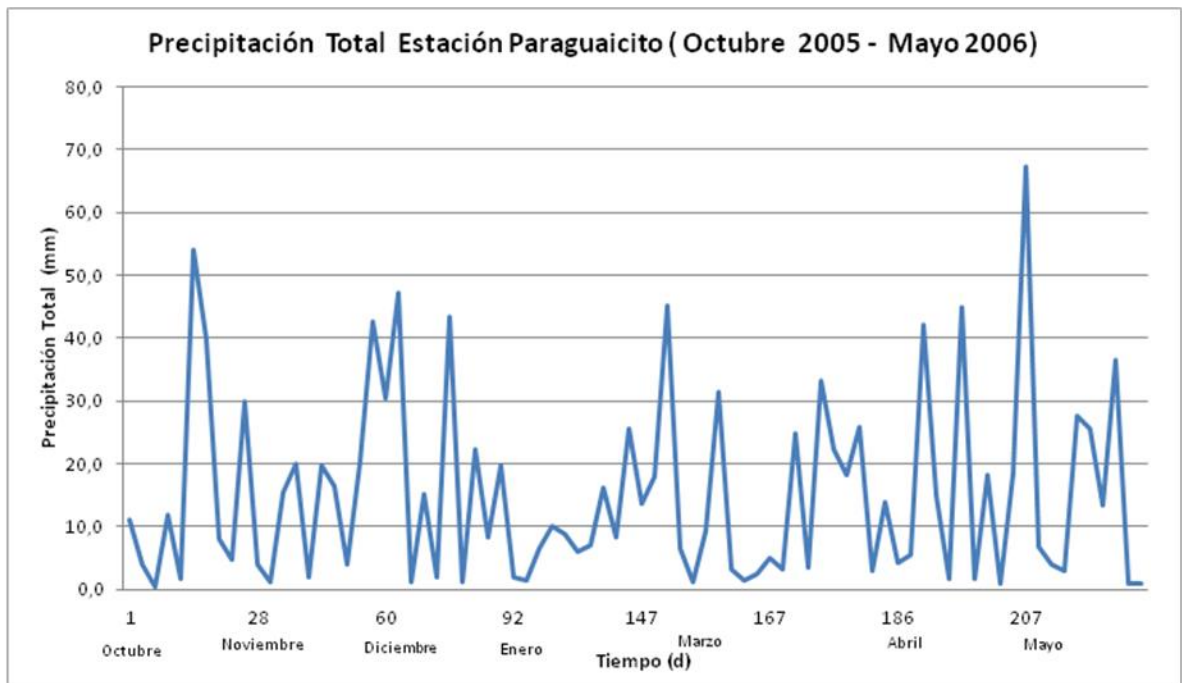


Figura 4. Precipitación total entre octubre (2006) y mayo (2007) alrededor de los agrosistemas evaluados.

### 7.1.1 Precipitación neta e interceptación por el dosel.

En la Tabla 3 se presentan los datos de la precipitación neta (PN) en cada uno de los agrosistemas, en las calles y bajo el café, y su porcentaje respecto a la precipitación total (PT).

Tabla 3. Precipitación neta acumulada en los agrosistemas de café

Agrosistema	PT (mm)	PN calle (mm)	PN bajo café (mm)	PN Neta	% de PN respecto a PT	% de cobertura del dosel*	No. de Datos de PN superiores a la PT
				(mm) Promedio PN calle y PN bajo café			
Café Libre exposición	1226,51	1621,54	975,83	1298,68	105,88		42
Café Pino	1226,51	1112,50	733,38	922,94	75,25	73	6
Café Eucalipto	1226,51	1519,09	723,27	1121,18	91,41	76	11
Café Nogal	1226,51	1419,96	841,78	1130,87	92,20	71	10

\* Fuente: Cartón Colombia, 2004.

El agrosistema que presentó mayores valores de precipitación neta respecto a la precipitación total (1226,51 mm) fue el café a libre exposición (105% de la precipitación total) con 1298,68 mm acumulados durante el período del estudio, seguido de Le sigue el café – nogal (92,20%) con 1130,87 mm, café – eucalipto (91,41%) con 1121,18 y por último el café - pino (75,25%) con 922, 94 mm (Figura 5).

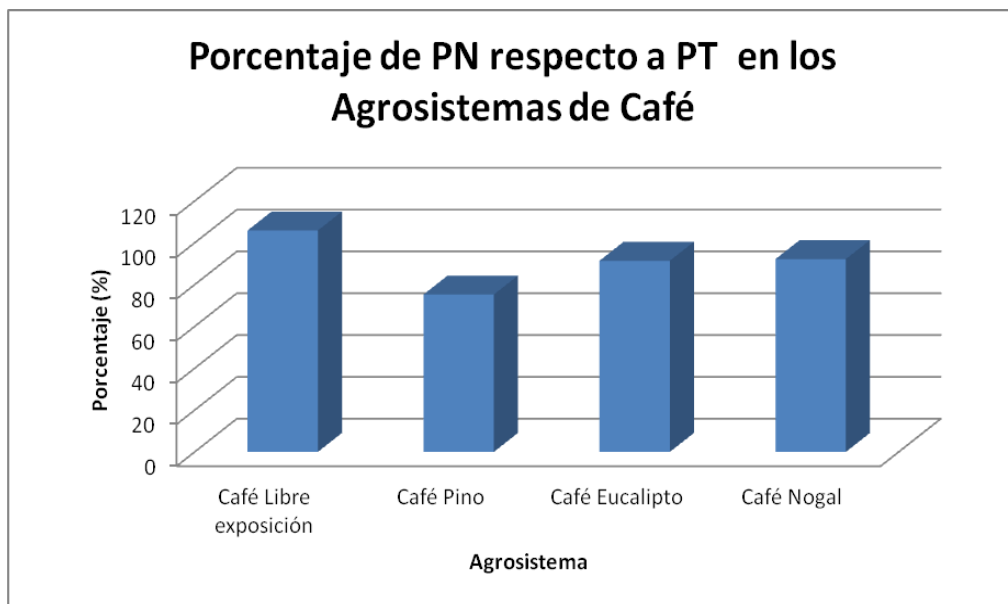


Figura 5. Porcentaje de precipitación neta respecto a la precipitación total en los agrosistemas.

En general, entre un 7,5 % y 52,5% de las mediciones (datos) de precipitación neta (PN) (promedio entre la precipitación neta de la calle del cultivo y bajo café) en los agrosistemas, fueron superiores a la precipitación total (PT); para las mediciones de la calle del cultivo, el 53,43 % en promedio, presentó este comportamiento, y bajo las plantas de café, en promedio, el 7,13% de las mediciones superó a la precipitación total. Datos similares fueron reportados por Giraldo y Jaramillo (2004) para la precipitación neta determinada en las calles del cultivo, con 56.5% de lecturas superiores a la lluvia total. Jaramillo y Chaves (1999) encontraron que entre el 11% y 17 % de los datos de lluvia neta fueron superiores a la lluvia registrada en el exterior de las parcelas. Mayor precipitación neta que precipitación total puede demostrar que la cobertura vegetal retiene y concentra agua en algunos puntos (gotera del árbol y del cafeto), por lo tanto no hay una distribución uniforme dentro de los cultivos. Esos puntos pueden coincidir con los pluviómetros ubicados dentro del cultivo.

En el caso de la parcela de café a libre exposición, la matriz de paisaje está constituida por café en ese mismo sistema, por lo que la influencia de lluvias totales derivadas de vientos puede ser responsable del aumento de la precipitación neta en este agrosistema. En la zona de estudio, cercana al río Verde, se presentan frecuentemente nieblas bajas en las mañanas, que pueden mantener un grado de humedad muy alto durante varias horas sobre las hojas del café; algunos investigadores registran acumulaciones de varios litros por metro cuadrado debido a esta depositación acuosa. Sin embargo, se deben tener más

conocimientos sobre los procesos biológicos y climáticos que controlan la precipitación oculta, para dar razones más confiables sobre la ocurrencia de estos fenómenos de exceso de agua en la precipitación neta, en relación con la precipitación total.

Jaramillo y Chaves (1998) citan resultados similares en Clarke (1987) y Bruijnzeel (1990), quienes sugieren presentaron que las mayores cantidades de agua registradas en puntos determinados dentro de las plantaciones sugieren un mayor incremento en el tamaño de las gotas con relación a las registradas en la parte externa; la variabilidad encontrada es mayor en los bosques de follaje heterogéneo que en los bosques de vegetación uniforme. La precipitación neta en las calles de los cultivos sobrepasa el 100% de la precipitación total, a excepción del agrosistema café pino, donde hubo retención de agua por la vegetación arbórea; estos resultados también pueden verse influenciados por el método de recolección de datos, ya que se hizo en algunos puntos y no abarcando toda la calle del cultivo. La precipitación neta varía entre el 75 % (café pino) y 105% (café a libre exposición) respecto a la precipitación total.

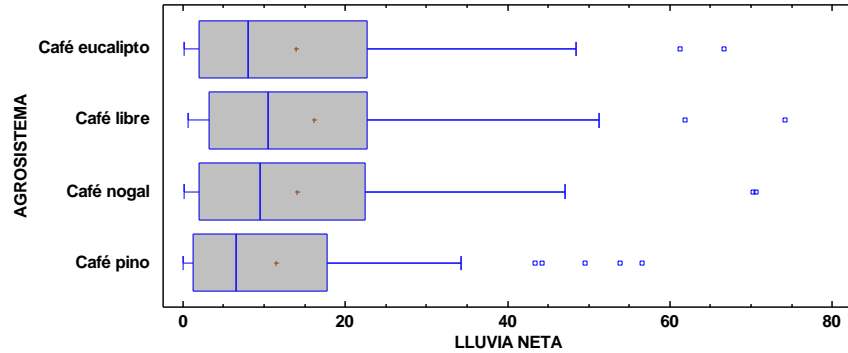
En el caso de los sistemas agroforestales, el porcentaje de precipitación neta promedio respecto a la precipitación total es menor debido al componente arbóreo existente, que interfiere en el paso directo de la precipitación total hacia el suelo; sin embargo, no hay relación directa de la precipitación neta con su porcentaje de cobertura vegetal (dosel). Las parcelas de estos agrosistemas tienen gran influencia de árboles del mismo porte de los establecidos en el arreglo productivo, por tanto, la intercepción puede haber sido mayor y reducido la cantidad de precipitación neta en dichos sistemas.

De acuerdo al análisis estadístico, no existe diferencia significativa en la precipitación neta entre los agrosistemas (Tabla 4 y

). El dato de máxima precipitación neta fue de 74,62 mm en el agrosistema de café a libre exposición y la menor fue de 0 en el café pino. Se halló una relación directa entre los volúmenes de precipitación neta y precipitación total en todos los agrosistemas.

Tabla 4. Prueba de Kruskal-Wallis para precipitación neta por agrosistema

Agrosistema	Tamaño Muestra	Rango Promedio
Café eucalipto	80	160,219
Café libre	80	177,387
Café nogal	80	161,387
Café pino	80	143,006



Estadístico = 5,53353 Valor-P = 0,136644

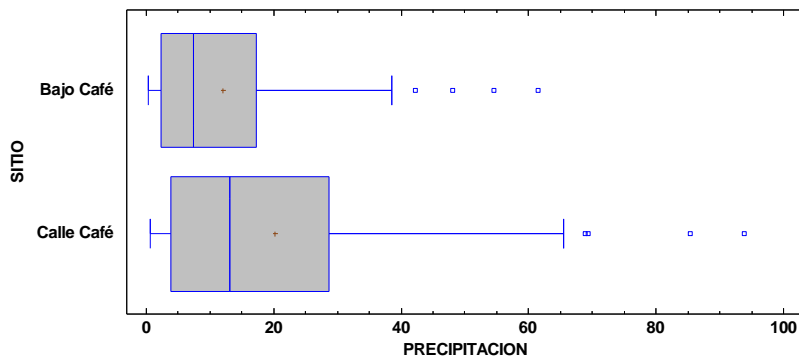
Gráfica 1. Prueba de Kruskal-Wallis para precipitación neta por agrosistema

De acuerdo al análisis estadístico, existen diferencias significativas entre la precipitación neta en la calle y la precipitación neta bajo el café en cada uno de los agrosistemas, como se presenta en las Tablas 5,6,7 y 8 y las Gráficas 2,3,4 y 5.

Tabla 5. Prueba de Kruskal-Wallis para precipitación neta por sitio en café a libre exposición

Sitio	Tamaño muestra	Rango promedio
Bajo Café	80	70,3625
Calle Café	80	90,6375

Estadístico = 7,65988 Valor-P = 0,00564473

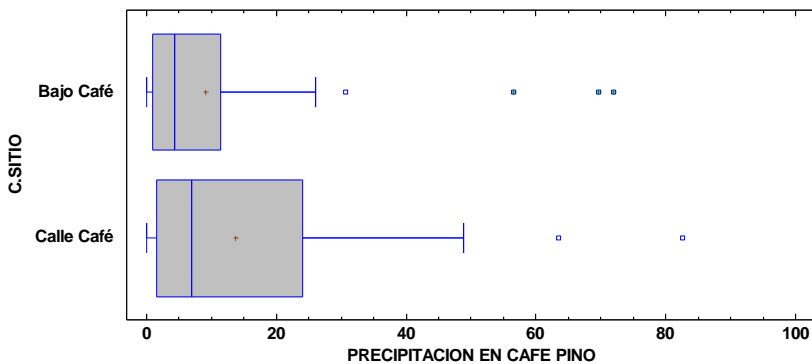


Gráfica 2. Prueba de Kruskal-Wallis para precipitación neta por sitio en café a libre exposición

Tabla 6. Prueba de Kruskal-Wallis para precipitación neta por sitio en café pino

Sitio	Tamaño muestra	Rango promedio
Bajo Café	80	72,5125
Calle Café	80	88,4875

Estadístico = 4,75553 Valor-P = 0,0292011

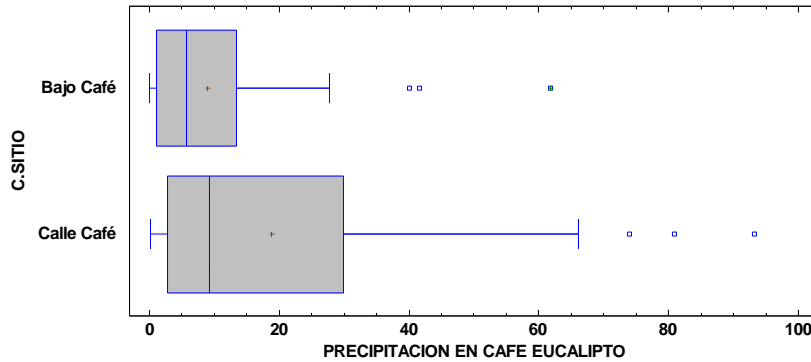


Gráfica 3. Prueba de Kruskal-Wallis para precipitación neta por sitio en café pino

Tabla 7. Prueba de Kruskal-Wallis para precipitación neta por sitio en café eucalipto

Sitio	Tamaño muestra	Rango promedio
Bajo Café	80	69,1375
Calle Café	80	91,8625

Estadístico = 9,62299 Valor-P = 0,00192078

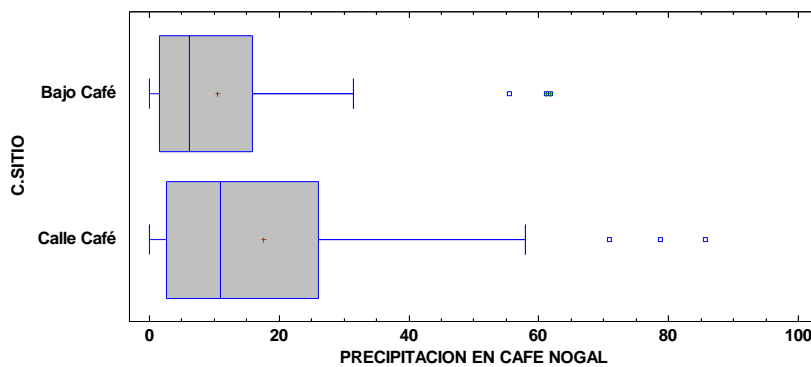


Gráfica 4. Prueba de Kruskal-Wallis para precipitación neta por sitio en café eucalipto

Tabla 8. Prueba de Kruskal-Wallis para precipitación neta por sitio en café nogal

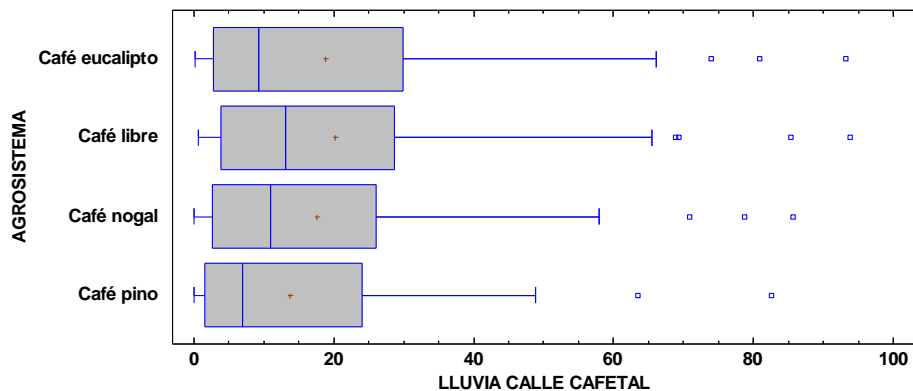
Sitio	Tamaño muestra	Rango promedio
Bajo Café	80	71,1625
Calle Café	80	89,8375

Estadístico = 6,4987 Valor-P = 0,0107932

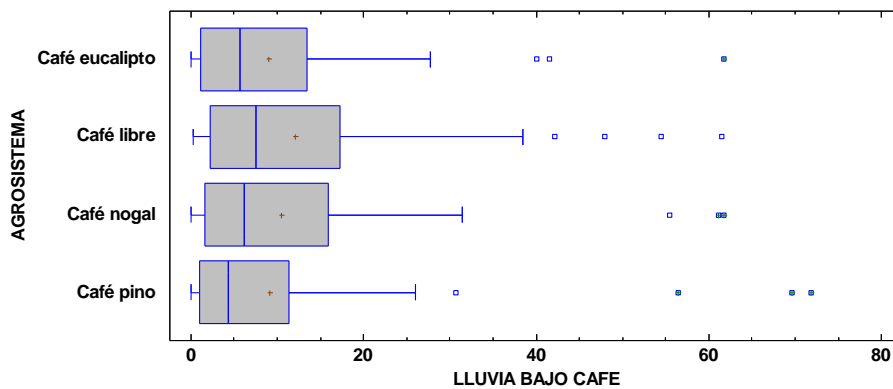


Gráfica 5. Prueba de Kruskal-Wallis para precipitación neta por sitio en café nogal

Al comparar la precipitación neta en la calle y bajo el café entre los cuatro agrosistemas, no existen diferencias significativas de acuerdo al análisis estadístico (Gráfica 6 y 7).



Gráfica 6. Prueba de Kruskal-Wallis para precipitación neta en la calle del cultivo por agrosistema



Gráfica 7. Prueba de Kruskal-Wallis para precipitación neta bajo el café por agrosistema

Al considerar solamente los sistemas agroforestales se registró un promedio de 1341,9 mm (10% más de la precipitación total) de precipitación neta en las calles del cultivo, representando entre un 90% y 123% de la precipitación total; diferente a los hallado por Giraldo y Jaramillo (2004), quienes reportan que entre un 70% y 85% de la precipitación total es precipitación neta; estas diferencias pueden darse por la especie y la distancia de siembra del componente arbóreo.

El acumulado promedio de la precipitación neta bajo las plantas de café fue de 818,56 mm (68,63% de la precipitación total) y varió entre un 59 y 80% de precipitación total, resultados superiores a los de Jaramillo (1999 y 2003), quien reporta promedios y rangos inferiores.

Los resultados indican que la mayor cantidad de precipitación total se convierte en precipitación neta; de los 1226,51 mm de precipitación total acumulados durante el estudio, en promedio 1118,4 mm corresponden a la precipitación neta (promedio de precipitación en calles y bajo cultivo), es decir, el 91,19% y los 108,09 mm restantes fueron retenidos por la vegetación. En los sistemas agroforestales, el 86,29% (1058,33 mm) de la precipitación total en promedio es neta y el 13,71% (168,18 mm) es interceptada, ya sea por la vegetación forestal o por el cultivo de café; Wallace y otros (2005) también reportan valores semejantes en sistemas agroforestales. Según Tobón (1999), la lluvia directa (lluvia que pasa por el dosel) varía entre 82 a 87% de la precipitación total.

El café pino es el que presenta menor porcentaje de precipitación neta respecto a la precipitación total (75,25%) y el café a libre exposición el mayor (105,88%). Esto está relacionado con la interceptación por el dosel, ya que el agrosistema que presentó la mayor interceptación durante todo el período de estudio fue el de café pino con 307,57 mm acumulados (24,75% de la precipitación total), seguido de café eucalipto con 105,33 mm (8,58% de la precipitación total) y café nogal con 95,64 mm (7,79%); por el contrario, en el café a libre exposición, ingresaron 72,18 mm de agua más del valor de la precipitación total, con un 5,88% de aporte de agua al sistema (Figura 6**Figura 1**).

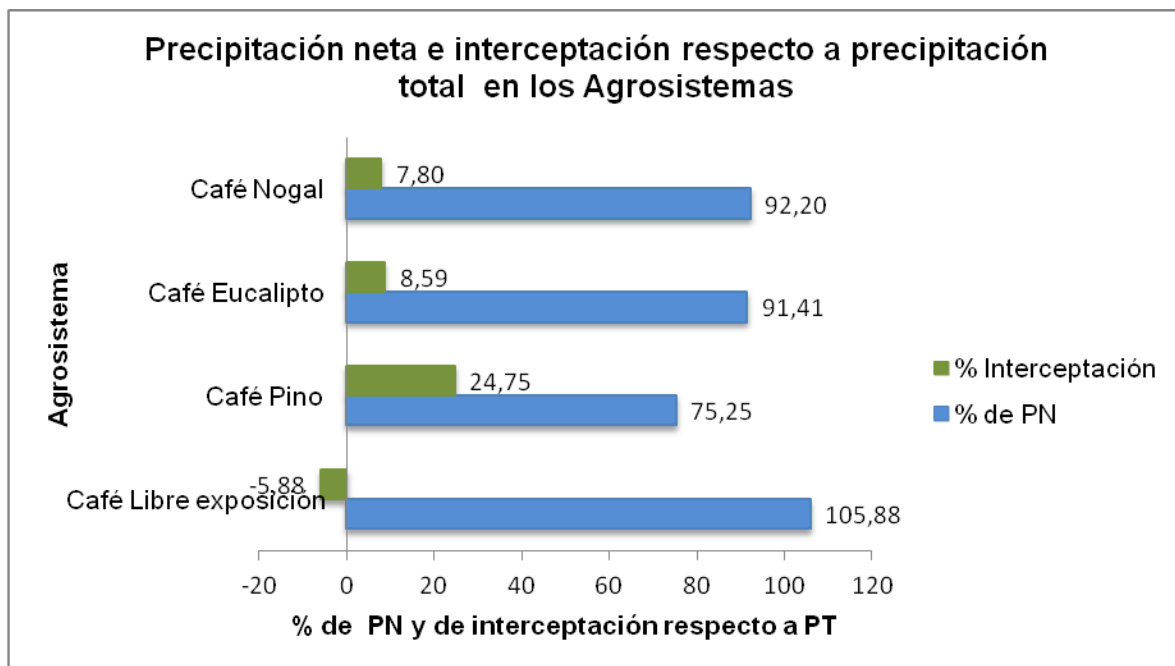


Figura 6. Porcentaje de precipitación neta e interceptación en los agrosistemas, respecto a la precipitación total.

Estos resultados no se relacionan directamente con el porcentaje de la cobertura vegetal del dosel, pero sí pueden tener relación con la mayor área foliar del pino, que posee mayor superficie de evaporación y menor albedo, por consiguiente mayor capacidad de interceptación del agua, mayor disponibilidad de energía solar para la evaporación y finalmente, mayor consumo de agua en comparación con las latifoliadas. Para Fanken y otros (1982), citados por Suna Hisca (sf), las distintas tasas de interceptación de Pinus están relacionadas con la edad y las distancias de siembra y son superiores a las de los bosques de latifoliadas. Jaramillo y Chaves (1999) registraron que la lluvia interceptada fue mayor en café bajo sombrío (60,3%), seguido de bosque (53,7 mm) y por último el café a libre exposición (45,1%).

Los valores máximos de interceptación en los sistemas agroforestales coinciden con los valores máximos de precipitación total, contrario a lo que sucede en el café a libre exposición donde no hubo interceptación con la lluvia máxima reportada. Sin embargo, los resultados no indican que exista una relación directa entre la cantidad de precipitación total y la interceptación ya que es posible tener interceptaciones altas durante lluvias de poca o mediana cantidad y lluvias fuertes con mínimas interceptaciones o sin ellas, por lo tanto no es posible considerar un promedio fijo para la interceptación, lo cual concuerda con lo enunciado por Imbach y otros (1996), al afirmar que la porción de agua interceptada no solo depende de la cantidad de agua incidente sino también de la intensidad de la

lluvia, la distribución y densidad de la parte aérea de la vegetación y características de las hojas (rugosidad, cerocidad, tamaño, arquitectura).

Según Salas y García (2000), la interceptación depende de la capacidad de la copa, la resistencia aerodinámica, la resistencia estomática, el tamaño de la hoja, la evaporación, la duración del aguacero, el agua antecedente y los vientos. Kilteredge, citado por los mismos autores, adiciona la capacidad de almacenamiento del follaje, la evapotranspiración durante la lluvia y la cantidad de aguaceros, entre otros. Tobón (1999) en el estudio sobre el funcionamiento de los ecosistemas forestales de la Amazonia, incluye como factores que afectan las pérdidas por interceptación, la forma de las hojas, la rugosidad y la flexibilidad, el contenido de fenoles o esclorofilas, la biomasa aérea total del bosque, el tamaño, textura, flexibilidad y orientación de las hojas y ramas, la cantidad de hojas por unidad de área, vegetación caduca o no y capacidad de almacenamiento del dosel. Así mismo expresa que la energía solar incidente modifica la temperatura de las hojas y afecta de esta manera la interceptación y la evaporación de su superficie.

Ibrahim y otros (2001), citado por Ríos y otros (2007) establece que bajo condiciones de precipitación, la interceptación de la lluvia por las copas de los árboles reduce la cantidad de agua que cae al suelo. Así mismo, Young (1997) citado por los mismos autores, reconocen que la presencia de árboles afecta la dinámica del agua en varias formas: actuando como barrera que reduce la escorrentía, como cobertura reduciendo el impacto de las gotas, y como mejoradora del suelo, incrementando la infiltración y la retención de agua. Estos efectos dependen del tamaño del árbol principalmente de su altura y la cobertura de copa.

Los resultados de este estudio son inferiores a los de De Salas y García (2000) quienes encontraron porcentajes de interceptación del 28%, 20% y 57% de la lluvia total para las coberturas de bosque nativo, eucalipto y ciprés respectivamente, así como los de Ballesteros (1993) y Giraldo (1989) (reportados en De Salas, 2000) con porcentajes de interceptación de 45 % y 35 % respectivamente en plantaciones de pino. Estas diferencias pueden estar dadas, entre otras causas, por las densidades del componente arbóreo, ya que son plantaciones forestales y en el presente estudio se analiza una asociación con el cultivo de café. También hay diferencia con el resultado de Imbach y otros (1989) quienes reportan un 13,5 % de interceptación de la lluvia total para el sistema agroforestal de café con nogal, mientras que en éste se reporta un 7,8 %.

Para Tobón (1999), una vegetación de pino es capaz de interceptar una mayor cantidad de precipitación que una vegetación latifoliada, lo que puede estar relacionado con el hecho de que el viento a su paso mueve más fuertemente las hojas de los árboles que las acículas de pino. Rutter (1967), citado por Aboal (1998) encontró que la tasa de evaporación por interceptación de agua en un bosque de pinos era varias veces mayor que la tasa de transpiración para las mismas condiciones, mostrando como causa que la resistencia aerodinámica al transporte del vapor de agua a través de la cubierta era mucho más pequeña en comparación con la resistencia interna a la difusión de vapor en las vías de la transpiración.

En este estudio, la interceptación es una proporción menor que la precipitación neta, lo cual difiere de Jaramillo (1999), quien encontró que la mayor proporción de la lluvia total (56%) en cultivos de café a libre exposición y bajo diferentes sombríos es interceptada por la parte aérea del cultivo; sin embargo en ambos estudios, el agrosistema de café a libre exposición es el que menos cantidad de agua intercepta. Los resultados también difieren de Giraldo y Jaramillo (2004), quienes reportan un rango entre el 15% y el 30% para la interceptación en la calle del cultivo.

De acuerdo al análisis estadístico, si existen diferencias significativas en la interceptación entre los agrosistemas, lo cual puede tener relación con la estructura de los árboles y el IAF de las diferentes especies. La mayor diferencia se da entre el café a libre exposición y el café pino.

#### 7.1.2 Evapotranspiración.

Con base en la evapotranspiración calculada (1336,60 mm) para la Subestación Paraguacito, se encontró la mayor pérdida de agua hacia la atmósfera en el agrosistema de café a libre exposición con 1289,04 mm, seguido de café nogal (1165,82 mm), café eucalipto (1150,66 mm) y café pino (1018,10 mm).

Las pérdidas del cultivo de café a libre exposición se deben a la transpiración por la exposición de su follaje a la radiación solar en ausencia de la sombra de otro estrato. El nogal posee una alta tasa transpiratoria, con apertura de estomas casi permanente; igual reporte hacen De Salas y otros, 2000, acerca de la transpiración del eucalipto, que se debe al tamaño de sus hojas y número de estomas permanentemente abiertos. El comportamiento del agrosistema de café

pino está relacionado con las características de la cutícula cerosa y la forma de la hoja de esta especie.

### 7.1.3 Flujo de agua a través de la hojarasca (FH).

El mayor flujo de agua a través de la hojarasca se presentó en el agrosistema de café a libre exposición, con 1282, 21 mm y el menor en el café pino con 975, 65 mm. En el café eucalipto se midieron 1274, 18 mm y en el café nogal 1186 mm.

Los resultados obtenidos se asemejan a los de Putuhena y Cordery (1995), quienes afirman que entre la hojarasca del agrosistema de café pino y café eucalipto se presentan algunas diferencias como la distribución de la misma sobre el suelo, es decir, la hojarasca del pino está distribuida de manera más uniforme que la del eucalipto y esto puede incidir en la mayor retención del agua sobre la hojarasca provocando mayor escorrentía y por ende menor flujo a través de ella.

Los flujos de agua a través de la hojarasca representan entre el 98,73 % y 113,65% de la precipitación neta como se presenta en la Tabla 9. Aunque el flujo de agua por los tallos es despreciado en casi todos los estudios, se considera que puede tener un papel importante en el incremento de la precipitación que llega hasta el compartimento de la hojarasca, lo que podría incrementar la cantidad de agua que la atraviesa. La cantidad de hojarasca producida por el café a libre exposición de hasta 8,4 ton/Ha, reportada por Urrego y Farfán (2002), contribuye al incremento de los flujos de agua y nutrientes. La precipitación reducida en el período de estudio -que favoreció la caída de las hojas, en mayor cantidad asociada a la mayor temperatura en árboles sin sombra-, pudo haberse concentrado en la capa gruesa de hojarasca, lo que permitiría un flujo conservado de humedad a través de este compartimento del agrosistema. Así mismo, la contribución de los árboles de eucalipto puede tener relación con la estructura misma de los tallos, con la exfoliación de su corteza, que acumularía mayor cantidad de agua en los espacios que se forman con la epidermis que se está desprendiendo, lo que aportaría al flujo de hojarasca, aún después de los eventos de precipitación, así como su gran aporte de hojarasca (hasta 8,1 ton/Ha.) según resultados de los mismos autores.

Tabla 9. Flujo de agua a través de la hojarasca en los Agrosistemas

Agrosistema	PN (mm)	Flujo de agua Hojarasca (FH) (mm)	% de FH respecto a PN
Café Libre exposición	1298,68	1282,21	98,73
Café Pino	922,94	975,65	105,71
Café Eucalipto	1121,18	1274,18	113,65
Café Nogal	1130,87	1186,41	104,91

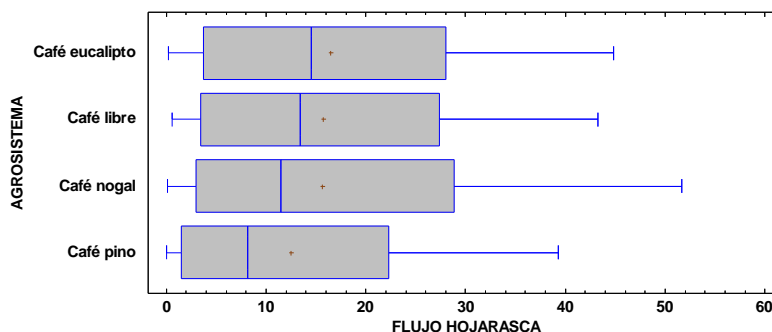
De acuerdo a los análisis estadísticos, no se presentan diferencias significativas en el flujo de agua a través de la hojarasca entre los cuatro agrosistemas, como se presenta en la Tabla 10 y

**Gráfica 8;** sin embargo los registros de este flujo en el agrosistemas de café pino presentaron mayor variación, es decir, fueron más dispersos frente a su media (12,48 mm).

Tabla 10. Prueba de Kruskal - Wallis para el flujo de agua a través de la hojarasca por agrosistema.

Agrosistema	Tamaño muestra	Rango promedio
Café eucalipto	80	171,406
Café libre	80	170,219
Café nogal	80	160,956
Café pino	80	139,419

Estadístico = 6,14983    Valor-P = 0,104542



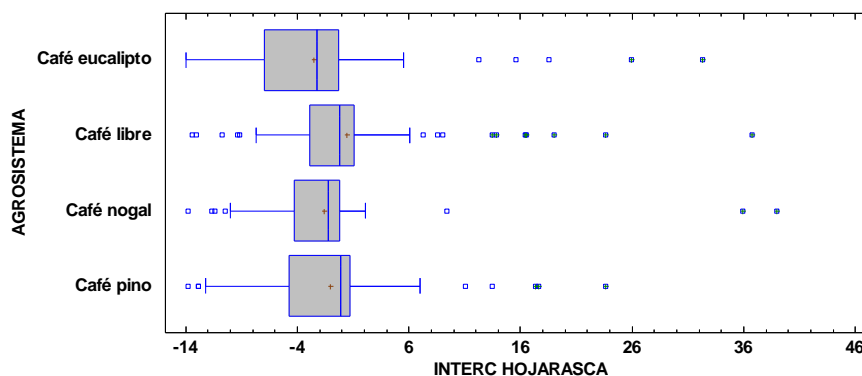
Gráfica 8. Prueba de Kruskal-Wallis para el flujo de agua a través de la hojarasca por agrosistema

El análisis estadístico indica que no existen diferencias significativas en la interceptación por la hojarasca entre los agrosistemas, a pesar que se observa alguna diferencia entre los agrosistemas de café a libre exposición y el café eucalipto (Tabla 11 y Gráfica 9).

Tabla 11. Prueba de Kruskal-Wallis para interceptación por hojarasca por agrosistema

Agrosistema	Tamaño muestra	Rango promedio
Café eucalipto	80	132,956
Café libre	80	177,594
Café nogal	80	157,887
Café pino	80	173,563

Estadístico = 11,4796 Valor-P = 0,00939555



Gráfica 9. Prueba de Kruskal-Wallis para interceptación por hojarasca por agrosistema

Ward y Robinson (2000), citados por Díaz y otros establecen que la precipitación pluvial es interceptada por distintos compartimentos como es el mantillo forestal donde el agua puede permanecer por un tiempo y otra parte se pierde por evapotranspiración o se infiltra en el suelo. Parte de esa agua acumulada en la hojarasca puede ser evaporada y no llegar a infiltrarse, contribuyendo a las pérdidas de humedad en el compartimento. Para Wallace y otros (2005), la evaporación total del suelo está determinada (al menos en parte) por la energía radiante que alcanza la superficie del suelo, entonces la evaporación del suelo podría afectarse por la sombra del dosel y las propiedades hidráulicas del suelo, que generalmente aumentan las velocidades de evaporación.

#### 7.1.4 Escorrentía.

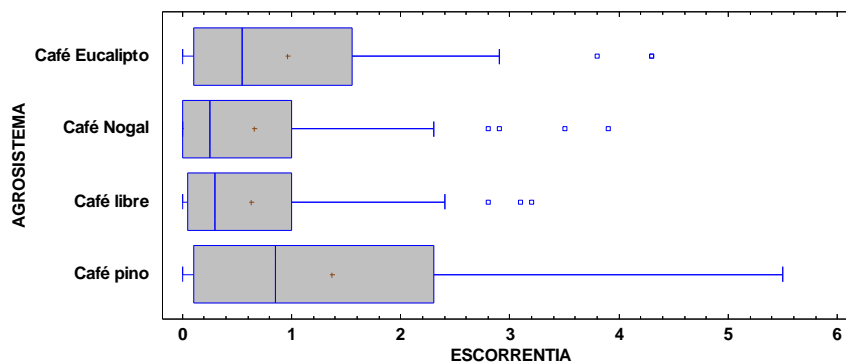
El agrosistema café pino presenta el mayor valor de escorrentía con 109,05 mm, seguido del café eucalipto donde escurrieron 71,56 mm de agua, café nogal con 51,75 mm y el de menor escorrentía fue el café a libre exposición con 50,46 mm.

Con base en los valores obtenidos y el análisis estadístico, se presentaron diferencias significativas entre los agrosistemas; la mayor diferencia estadística la presenta el agrosistema de café pino; entre los otros tres agrosistemas no hay mayores diferencias (Tabla 12 y Gráfica 10).

Tabla 12. Prueba de Kruskal-Wallis para escorrentía por agrosistema

Agrosistema	Tamaño muestra	Rango promedio
Café eucalipto	80	167,05
Café nogal	80	150,363
Café libre	80	143,131
Café pino	80	181,456

Estadístico = 8,29153 Valor-P = 0,0403544



Gráfica 10. Prueba de Kruskal-Wallis para escorrentía por agrosistema

Las diferencias que se presentan en la escorrentía pueden estar influenciadas por diversos factores, como la pendiente del terreno y la cobertura vegetal del suelo y del ecosistema como lo afirma Bruijnzeel (1990). Se puede asociar la disposición y cantidad de la hojarasca en el piso, como un factor influyente en el movimiento superficial del agua, contrario a los resultados de Jaramillo y Chaves (1999),

quienes afirman que la cobertura vegetal produce un drenaje lento, que a su vez favorece la infiltración y reduce la escorrentía, ya que en el agrosistema de café – pino con presencia alta de cobertura vegetal en el suelo, se reportó la mayor escorrentía. Respecto a la precipitación neta, el mayor porcentaje de escorrentía se presentó en el agrosistema de café pino (11,82%) y la menor en el sistema café a libre exposición (3,89%) (Tabla 13 **Tabla 13**).

Tabla 13. Representatividad de la Escorrentía frente a la precipitación neta y precipitación total

Agrosistema	PN (mm)	Escorrentía (E) (mm)	% E respecto a PN	% E respecto a la PT
Café libre exposición	1298,68	50,46	3,89	4,11
Café Pino	922,94	109,05	11,82	8,89
Café Eucalipto	1121,18	71,56	6,38	5,51
Café Nogal	1130,87	51,75	4,58	5,61

En este estudio, la escorrentía para los agrosistemas de café a libre exposición y café nogal fue muy similar y presentaron los valores más bajos; sin embargo, Arellano (2001) reportó que en el sistema agroforestal de café con nogal, la escorrentía fue dos veces mayor que en café a libre exposición. También hay diferencias respecto a los estudios de Jaramillo y Chaves (1999) que reportan un máximo valor de escorrentía en la parcela de café a libre exposición con 5,2 mm, contrario al registrado en este estudio con 3,18 mm; sin embargo los porcentajes de escorrentía frente a la precipitación total son muy similares (promedio de 6,01% y variaciones entre 4,11% y 8,89%).

Giraldo y Jaramillo (2004) reportan que en los sistemas agroforestales la escorrentía equivale a un 4,6 % de la lluvia total, diferente a lo obtenido en este estudio, ya que en los sistemas agroforestales, la escorrentía promedio equivale al 6,67 % de la precipitación total. Respecto al trabajo de Vahrson y Cervantes (1991), se obtienen resultados similares, siendo mayor el porcentaje de escorrentía frente a la lluvia total, en los sistemas agroforestales que en el café a libre exposición.

Resultados contrarios se obtuvieron en Costa Rica, donde la escorrentía fue menor con el incremento en la cobertura arbórea (Ríos y otros, 2007) y en los

estudios de Hong (1978) y Humphreys (1991), quienes concluyen que la escorrentía superficial está inversamente relacionada con la cobertura vegetal. Wallace y otros (2005) en Kenia, demostraron que con cercas de *Senna siannea*, se redujo la escorrentía entre 30-50%, debido al incremento de la infiltración.

#### 7.1.5 Flujos de agua en el suelo.

##### 7.1.5.1 Infiltración

El agrosistema donde se presentó la mayor infiltración (calculada) fue el de café a libre exposición, con 1248,22 mm (equivalentes al 96,11% de la precipitación neta) y el menor el café pino (813,89 mm), con un 88,18% de la precipitación neta (Tabla 14 **Tabla 14**), sin embargo, al realizar el análisis estadístico, no se encuentran diferencias significativas entre los agrosistemas y esto puede deberse a que todas las parcelas están ubicadas en el mismo tipo de suelo, derivados de cenizas volcánicas, con textura franco arenosa, materia orgánica entre el 3% y 5% y entre media y baja retención de humedad, con excelente profundidad neta, por lo tanto no se establece ninguna diferencia en cuanto a la capacidad de infiltración en los diferentes agrosistemas en estudio.

La baja infiltración en el café pino puede deberse a la estructura y disposición de las acículas que favorecen la escorrentía y dificultan la infiltración, así como las características de la cutícula hidrófoba, que rechaza la acumulación en la hojarasca.

Tabla 14. Infiltración en los Agrosistemas

<b>Agrosistema</b>	<b>PN (mm)</b>	<b>Infiltración (calculada)</b>	<b>% Infiltración respecto a PN</b>
Café libre exposición	1298,68	1248,22	96,11
Café Pino	922,94	813,89	88,18
Café Eucalipto	1121,18	1049,62	93,62
Café Nogal	1130,87	1079,12	95,42

La mayor infiltración en los agrosistemas de café eucalipto y café nogal puede deberse al diseño de las hojas de estas especies, las cuales pueden concentrar mayor cantidad de agua en la hojarasca, que no se pierde por escorrentía, sino que puede pasar a las capas inferiores del suelo (Taniguchi y otros, 1996).

### 7.5.1.2 Flujos de agua a 15 y 30 cm de profundidad

Los mayores registros se dieron en el agrosistema de café eucalipto, con 2995,43 mm y 2782,91 mm respectivamente, acumulados en el período de estudio. En este mismo se presentaron los valores máximos de flujo de agua (246,69 mm) en ambas profundidades y en el mismo evento de precipitación total (25,68 mm). Los menores flujos de agua medidos en ambas profundidades se presentaron en el agrosistema de café a libre exposición. Los aportes de agua en estas capas pueden atribuirse al escurrido cortical, que concentra agua alrededor de los troncos aumentando su flujo que drena a las capas inferiores (Taniguchi y otros, 1996).

La cantidad de agua preexistente puede dar razón de la cantidad de agua encontrada (medida) en las dos profundidades analizadas, relacionada con la capacidad de almacenamiento del suelo aún en condiciones de poca precipitación, como el período estudiado. La infiltración favorecida por las raíces de los árboles de sombrero, pueden también incrementar el contenido de agua en las capas subsuperficiales. En algunos casos de bajas precipitaciones, los árboles pueden extraer agua de las capas más profundas y redistribuirla en zonas más superficiales, dependiendo de los requerimientos hídricos de las plantas.

En la Tabla 15 se presentan los flujos de agua medidos a 15 y 30 cm de profundidad y la tensión de humedad de cada uno de los agrosistemas en ambas profundidades; así mismo se observa que debido a los valores altos de flujo de agua a 30 cm de profundidad en los agrosistemas, la tensión de humedad es baja, lo cual puede indicar que el suelo se satura fácilmente y que las características del suelo permiten que haya infiltración hacia capas más profundas, sin una demanda de succión por parte de los sistemas radiculares.

Tabla 15. Flujo de agua y tensión de humedad a 15 y 30 cm de profundidad en los Agrosistemas.

Agrosistema	Flujo de agua a 15 cm (mm)	Tensión media a 15 cm (atm)	Humedad Volumétrica media a 15 cm. (mm)	Flujo de agua 30 cm (mm)	Tensión media a 30 cm (atm)	Humedad Volumétrica media a 30 cm (mm)
Café libre exposición	1758,16	0,14	44,28	1705,12	0,14	42,82
Café Pino	2129,68	0,21	42,92	2073,68	0,23	41,49
Café Eucalipto	2995,43	0,21	42,11	2782,91	0,24	41,43
Café Nogal	2471,71	0,14	44,51	1792,33	0,17	42,51

A pesar que estadísticamente no existen diferencias significativas en los flujos de agua a 15 y 30 cm entre los agrosistemas, si existen estas diferencias en la tensión de humedad entre ambas profundidades en dos de los agrosistemas.

Las diferencias en la tensión de humedad entre los agrosistemas pueden estar relacionadas con la estructura de las plantas establecidas en cada uno de ellos (especie forestal o la planta de café); en cuanto el diseño del sistema radicular, sus requerimientos de agua y la extracción de agua que en estas capas se realiza, puede incrementar la tensión de humedad en la zona de raíces de las especies arbóreas, a diferencia de la menor extracción de agua por parte del café; los aportes de materia orgánica al suelo, que favorecen la infiltración lenta con aportes permanentes de humedad en las capas inferiores, también tiene influencia sobre la retención de humedad, que sumado a las características de la porosidad en suelos de cenizas volcánicas, modifica la tensión de humedad

En los agrosistemas, solo hay diferencia significativa entre las dos profundidades en el café nogal y en el café eucalipto. Giraldo y Jaramillo (2004) reportaron comportamientos similares a 20 y 40 cm de profundidad en los sistemas agroforestales de café con guamo. Poveda y otros (2000) registran mayor humedad volumétrica del suelo a 40 cm que a 20 cm. Para Jiménez (1986) a mayor profundidad, la densidad aparente aumenta y por tanto la capacidad de retención de agua, dando como resultado mayor humedad en el suelo.

Comparando la tensión de humedad a 15 y 30 cm entre las diferentes coberturas se presenta una tendencia al aumento de la tensión a mayor profundidad. Este comportamiento está relacionado con las diferencias del tamaño de las partículas a medida que se profundiza en el horizonte, con un aumento de los macroporos, aumento en la densidad aparente a incremento en la capacidad de infiltración del agua a través de las capas de textura franco arenosa.

Esta tensión de humedad está relacionada con el tipo de suelos donde se desarrollan los agrosistemas, los cuales pertenecen a la unidad Montenegro, suelos derivados de ceniza volcánica, buen drenaje interno, de baja a media capacidad de retención de humedad en los suelos, y de texturas franco arenosa. El flujo de agua medido a 15 cm y a 30 cm en todos los agrosistemas es muy similar, con excepción del café nogal, lo que indica un comportamiento uniforme en estas dos capas de suelo.

### 7.1.6 Balances hídricos.

Para los cuatro agrosistemas se realizaron balances generales (asumiendo el flujo de agua a 30 cm, como el drenaje profundo) y en los compartimientos de dosel y hojarasca, cuyos resultados se presentan en las Tabla 16, 18 y 19.

Tabla 16. Balance hídrico general de los agrosistemas

<b>Agrosistema</b>	<b><math>\Delta H</math></b>
Café a libre exposición	-1881,33
Café Pino	-2345,15
Café Eucalipto	-2623,30
Café Nogal	-1990,68

Tabla 17. Balance hídrico en el dosel

<b>Agrosistema</b>	<b><math>\Delta H</math></b>
Café a libre exposición	-3,8
Café Pino	-4,4
Café Eucalipto	-3,6
Café Nogal	-4,4

Tabla 18. Balance hídrico en la capa de hojarasca

<b>Agrosistema</b>	<b><math>\Delta H</math></b>
Café a libre exposición	-51
Café Pino	-109,8
Café Eucalipto	-76,8
Café Nogal	-52,4

De acuerdo al balance hídrico general, todos los agrosistemas presentaron pérdidas de agua, es decir, salió más agua de la que entró al agrosistema.

Las mayores pérdidas (salidas) se dieron en el agrosistema café eucalipto, seguido por el café pino. En ambos sistemas los mayores valores se dan por el agua drenada a los 30 cm. La infiltración en estos agrosistemas aporta grandes cantidades de agua a las capas del suelo, lo que se evidencia en el contenido de agua a 15 y 30 cm en el suelo. Las salidas en café a libre exposición están dadas por el valor de la evapotranspiración calculada.

El balance hídrico para el dosel indica que los agrosistemas tuvieron ganancia en flujo de agua, es decir pasó por el dosel más cantidad de agua de la que se interceptó o se evaporó, agua que posteriormente entraría al suelo del cultivo o se escurriría sobre la superficie; sin embargo, son tan bajos estos cambios y poco significativos que pueden ser rechazados o no tenidos en cuenta en la hidrología de los agrosistemas.

El balance hídrico para la hojarasca muestra cambios en la cantidad de agua en la hojarasca, presentándose salidas (pérdidas) en todos los agrosistemas, es decir, la cantidad de agua que atravesó la hojarasca fue mayor que la que llegó como precipitación neta, hecho que puede darse por los aportes del escurrimiento cortical o por la misma capacidad de acumulación de agua por la hojarasca, que al saturarse, la libera y pasa a capas más profundas del suelo.

## 7.2 DINÁMICA DE LOS NUTRIENTES EN LOS AGROSISTEMAS DE CAFÉ

### 7.2.1 Nutrientes en la precipitación total.

En los cuatro muestreos de nutrientes solubles en las diferentes variables hidrológicas (precipitación total, neta, escorrentía, flujo de agua a través de la hojarasca, percolación a 15 y 30 cm de profundidad), durante el período de estudio, se obtuvieron los resultados que se presentan a continuación, para los diferentes compartimentos de los agrosistemas.

Los resultados promedios de los cuatro elementos analizados con sus respectivas desviaciones estándar (3,97 en K, 0,73 en P; 0,34 en Mg y 0,50 en Ca), encontrados en la precipitación total, se presentan en la Figura 7.

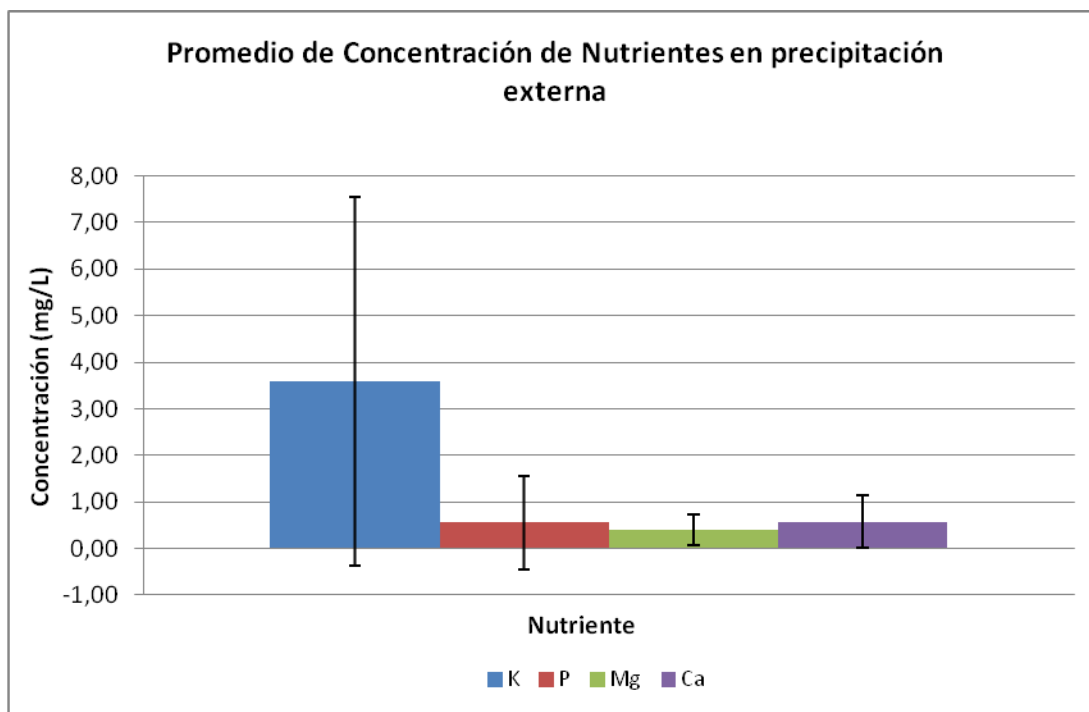


Figura 7. Concentración de nutrientes en la precipitación total

De acuerdo a la anterior figura, en la precipitación total registrada (1219,4 mm), en promedio, se presentó mayor cantidad de K respecto a los demás nutrientes

solubles (3,59 mg/L) y menor cantidad de Mg (0,40 mg/L); el pH en promedio para la precipitación neta fue de 6,3; al comparar con otros estudios, los resultados difieren con similares realizados tanto en Colombia como en otros países como Venezuela, Puerto Rico, Jamaica (Giraldo y Jaramillo, 2004; Veneklaas, 1990; Tanner, 1977; Steinhardt, 1979); estas diferencias pueden estar relacionadas con la duración del estudio y las técnicas de muestreo.

La presencia de estos elementos en la precipitación puede tener varios orígenes, algunos de ellos naturales, como las deposiciones de partículas de suelo desplazadas por los vientos, algunos nutrientes que pueden ser transportados en las nubes bajas, y otros generados por actividades antrópicas, como el uso de la leña como combustible y los abonamientos con fertilizantes ricos en potasio, como lo han explicado diferentes autores; entre ellos Aboal (1995), que establece que algunos de los elementos depositados sobre la cubierta boscosa desde la atmósfera tienen un origen natural, pero el gran incremento de sustancias contaminantes, sobre todo en recientes décadas, ha significado un importante cambio en la química de la atmósfera (Mesanza y Casado, 1994); Lovett y otros (1989), Kloeti y otros (1989) y Neary and Gizyn (1994), citados por Aboal (1998) también refieren aportes atmosféricos de origen antrópico, como la lluvia ácida y la deposición seca de contaminantes a algunos bosques. Así mismo se ha encontrado que las nubes contienen importantes cantidades de nutrientes minerales, que los agregan al llover, junto con la deposición atmosférica seca, al suelo (Jordan y otros, 1980, Lovett y otros, 1985; Lindberg y otros, 1986, 1990). Matzner y Meiwes, 1994; Lovett, 1994, citados por Aboal (1995), consideran que durante los períodos secos los colectores de precipitación completa recogen los aerosoles y partículas así como las anomalías, incluido el material de origen local que no debe de ser considerado como un aporte alecosistema, tal como excrementos de pájaros, polen, insectos y el polvo de formación "in situ" que es lavado en el colector en la siguiente lluvia.

Los elementos minerales existentes en la atmósfera entran en los ecosistemas terrestres en forma de iones disueltos y núcleos de condensación en el agua de lluvia o por el arrastre, o en la forma elemental, de partículas suspendidas existentes en el aire. Estos ingresos varían en función de la localización geográfica, estación del año y de la cantidad de partículas existentes en el aire (Andrade y otros, 1995). En zonas de actividad volcánica, en eventos de expulsión de cenizas, pueden presentarse incrementos en la cantidad de partículas azufradas, con aportes de fósforo, magnesio y micronutrientes, pero son menos importantes que los aportes de la fertilización con sustancias ricas en sales. En el período de estudio no se registraron eventos de caída de cenizas en la región.

La cantidad e intensidad de la precipitación es una de las variables que afecta a los flujos netos de Ca, Mg, y K, porque estos son los constituyentes que están derivados primariamente del lavado de la cubierta (Schaefer, 1992). El contenido mayor de K en la precipitación total durante este estudio, podría estar relacionado con las quemas, el uso generalizado de leña para la cocción de alimentos en zonas aledañas, así como la utilización de fertilizantes potásicos en los cultivos de plátanos de la región, que en épocas de poca precipitación puede elevarse en las partículas del suelo que se mueven en las capas bajas de la atmósfera. La baja cantidad de fósforo muestra su poca movilidad, debido a la fijación que se presenta en suelos ácidos.

A pesar que tres (3) de los cuatro (4) muestreos se realizaron en días que no fueron precedidos por lluvias, es decir, en periodo secos, solo el K y el Ca presentan una concentración un poco más alta con relación al día de muestreo que estuvo precedido por dos (2) días de lluvias, que fueron bajas; esta puede ser la causa de la poca diferencia en la concentración de nutrientes, teniendo en cuenta la tendencia general de mayor concentración de nutrientes después de períodos secos.

#### 7.2.2 Nutrientes y flujos netos bajo el dosel, en las calles del cultivo y bajo la planta de café.

El agua que fluye a través de las cubiertas vegetales juega un papel fundamental en el transporte de elementos disueltos y sólidos suspendidos, y esta agua dentro de la cubierta vegetal influye en los procesos químicos, físicos y biológicos que ocurren sobre la superficie de las plantas (Hansen, 1995). Los datos sobre la composición química de los flujos bajo cubierta son indispensables para entender los procesos químicos de los contaminantes en las cubiertas vegetales, para estimar la deposición atmosférica en parcelas de bosque y para construir los ciclos de nutrientes de los ecosistemas (Fenn y otros, 1995).

El flujo neto incluye el flujo de fuentes externas, debido al lavado de materiales de deposición seca, y el flujo de fuentes internas, debido al lavado e intercambio de la cubierta (Hibata y Sakuma, 1996, citados por Aboal, 1998). Los flujos netos de iones proporcionan una primera aproximación a la transferencia de elementos a través de la vegetación, reflejando la contribución de iones por la deposición seca y el lavado interno de la cubierta, o la pérdida de iones a través de la absorción por la cubierta. Sin embargo, cierta cantidad de agua permanece inevitablemente

en la cubierta después de cada lluvia, la cual es evaporada dejando los iones asociados (Neary y Gizyn, 1994).

Al analizar cada uno de los agrosistemas, respecto a los contenidos de nutrientes en la precipitación neta, se encontraron los siguientes resultados:

#### 7.2.2.1 Agrosistema de café a libre exposición.

De acuerdo a los resultados obtenidos (Tabla 19) se observa que al atravesar el agua el agrosistema de café a libre exposición, se presenta un aumento en la concentración del K y Mg, ya sea en la calle del cultivo o bajo el cafeto; el Ca y el P reducen su concentración en la lluvia que cae a las calles del cultivo; la concentración de K se incrementa más de cuatro veces con relación a la precipitación total, así como su flujo, debido a alta movilidad. Similar comportamiento presenta el Mg. Estas “ganancias” en el flujo de agua pueden significar una pérdida de los nutrientes para el follaje, pero un ingreso a la zona de raíces, donde puede ser aprovechado en los procesos de nutrición del cultivo.

Tabla 19. Flujo de nutrientes en el agrosistema de café a libre exposición

Nutriente	Concentración en PT (mg/L)	Concentración en PN bajo café (mg/L)	Flujo	Concentración en PN en calle cultivo (mg/L)	Flujo
Ca	0,57	1,90	1,33	0,47	-0,10
P	0,55	1,25	0,70	0,32	-0,23
Mg	0,4	1,61	1,21	0,58	0,18
K	3,59	14,91	11,32	6,31	2,72

#### 7.2.2.2 Agrosistema de café pino.

Según Kozlowski y Pallardy (1997), en los sistemas forestales, sus cubiertas o doseles son una importante fuente de nutrientes (elementos minerales lavados de los tejidos de las plantas, exudados y productos de descomposición), denominados deposición interna, que hace que estos regresen al suelo y además, interceptan elementos que se encuentran en la precipitación total. Usualmente, cuando la lluvia pasa a través de la cubierta arbórea, su concentración en nutrientes minerales aumenta (Kozlowski y Pallardy, 1997 en Aboal, 1998). En la Tabla 20 se presentan los cambios en la cantidad de nutrientes una vez el agua pasa el dosel y se dirige hacia los compartimentos inferiores del agrosistema.

Tabla 20. Flujo de nutrientes en la precipitación neta en el agrosistema de café pino

Nutriente	Concentración en PT (mg/L)	Concentración en PN bajo café (mg/L)	Flujo	Concentración en PN en calle cultivo (mg/L)	Flujo
Ca	0,57	0,86	0,29	1,11	0,53
P	0,55	0,83	0,28	0,78	0,23
Mg	0,4	0,91	0,51	1,31	0,91
K	3,59	12,18	8,59	8,93	5,34

Se observa que al atravesar el dosel del agrosistema de café pino, existe un aumento en la concentración de todos los nutrientes en la precipitación neta bajo el café; el K presenta el mayor flujo neto e incrementa más de tres veces su concentración, explicable por su gran capacidad de ser lavado de las estructuras de la planta, debido a su forma iónica y a su alta solubilidad en el agua; este resultado coincide con el de Aboal (1998). Para Torii y Kiyaro las causas de los cambios en las concentraciones y las propiedades de la precipitación penetrante están relacionadas con las sustancias provenientes desde las hojas y las cortezas. Los elementos pueden ser transferidos de la deposición seca o el lavado, al pasar por la cubierta; el agua que permanece en el dosel se puede evaporar y dejar los iones a la espera de otro evento de lluvia y aportando nutrientes como el K a la precipitación neta.

### 7.2.2.3 Agrosistema de café eucalipto.

De acuerdo a los resultados obtenidos, existe un aumento en la concentración de todos los nutrientes en la precipitación neta bajo el café y en las calles, respecto a la concentración en la precipitación total en este agrosistema (

Tabla 21); se presentan mayores flujos en el K, los cuales pueden ser tomados por la cubierta forestal y por las hojas del cultivo del café, que presenta altas demandas de este nutriente.

En la precipitación neta se observa un incremento en la concentración del Mg, seis veces mayor en la calle del sistema, que la encontrada en la precipitación total; Coinciden estos resultados con los experimentos en eucalipto realizados por Andrade (1995), quien concluye que el K, Ca Mg y S, por regla general, son enriquecidos durante el paso del agua de lluvia por la copa y tronco de los árboles.

Tabla 21. Flujo de nutrientes en la precipitación neta en el agrosistema de café eucalipto.

Nutriente	Concentración en PT (mg/L)	Concentración en PN bajo café (mg/L)	Flujo	Concentración en PN en calle cultivo (mg/L)	Flujo
Ca	0,57	1,17	0,60	1,41	0,83
P	0,55	0,96	0,41	1,50	0,95
Mg	0,4	1,14	0,74	2,43	2,03
K	3,59	13,07	9,48	13,34	9,75

Según Andrade (1995), las contribuciones medias para los tratamientos en la oferta de nutrientes para el eucalipto, a través del agua de precipitación neta son de 1,3% para el N, 10,5% para el P, 16,8% para el K, 18,8% para el Ca y 26,3% para el Mg, lo que muestra la importancia para la nutrición de los agrosistemas, el paso por el dosel y el aumento de la concentración de nutrientes que llega al suelo.

#### 7.2.2.4 Agrosistema de café nogal.

En la Tabla 22 se observa que el contenido de todos los nutrientes aumentó de manera considerable, en la precipitación neta bajo el café y en las calles, respecto a la precipitación total, con mayores flujos de K y Mg. En la precipitación neta en las calles también aumentó la concentración en todos los nutrientes, pudiéndose inferir una alta contribución al aporte de las hojas de este cultivo forestal, a la nutrición del sistema. Para Andrade (1995), los nutrientes K, Ca, Mg y azufre, por regla general, son enriquecidos durante el paso del agua de lluvia por la copa y tronco de los árboles.

Tabla 22. Flujo de nutrientes en la precipitación neta en el agrosistema de café nogal.

Nutriente	Concentración en PT (mg/L)	Concentración en PN bajo café (mg/L)	Flujo	Concentración en PN en calle cultivo (mg/L)	Flujo
<b>Ca</b>	0,57	2,48	1,91	1,28	0,71
<b>P</b>	0,55	1,33	0,78	0,67	0,12
<b>Mg</b>	0,4	2,26	1,86	1,72	1,32
<b>K</b>	3,59	22,85	19,26	14,55	10,96

La capacidad de absorción foliar de nutrientes varía entre especies, y depende de la composición de las ceras epicuticulares y de la entrada de soluciones acuosas

por los estomas a través de la cutícula (Schönherr y Bukovac, 1972 citados por Aboal (1998). Sin embargo, la mayoría de los nutrientes depositados en la cubierta o excretados por las hojas, son lavados y llegan al suelo en la precipitación neta. La mayor concentración de K en la precipitación neta lo convierte en el nutriente más móvil en la dinámica de nutrientes en estos compartimentos.

En general, hubo aumento de la concentración de todos los nutrientes al ingresar a los cuatro agrosistemas, atravesando el dosel y las hojas del café, pero existieron variaciones en el aumento de dicha concentración, lo cual es corroborado por Kozłowski y Pallardy (1997), quienes afirman que cuando la lluvia pasa a través de la cubierta arbórea, su concentración en nutrientes minerales aumenta. Además, estas variaciones en las cantidades de elementos químicos confirman lo encontrado por Beer y otros (1998), quienes manifiestan que el ciclo de nutrientes está directamente afectado por las especies de sombrero debido a que estas difieren significativamente en la composición de la biomasa.

Los datos muestran que las cantidades de K aumentan en la precipitación neta tanto bajo el cafeto como en las calles del cultivo en todos los agrosistemas, al compararlas con las cantidades aportadas inicialmente por la precipitación total; este resultado concuerda con varios autores como Golley (1991) y Giraldo y Jaramillo (2004). Así mismo, Cape (1993) afirma que el lavado de cationes recae especialmente en el K, Ca, Mg, por lo que a priori estos elementos deberían de poseer flujos positivos; Kozłowski y Pallardy (1997) afirman que los cationes monovalentes (p.e., Na, K) son rápidamente lavados de las hojas y transferidos al suelo principalmente por la precipitación penetrante, en comparación con los cationes divalentes (p.e. Ca y Mg) que son más fuertemente retenidos y son transferidos al suelo en mayor medida por la caída de las hojas.

El K fue el nutriente que tuvo los mayores flujos en la precipitación neta tanto en las calles como bajo el café en todos los agrosistemas; cabe resaltar que además fue el elemento con mayor concentración en la precipitación total. Este resultado podría expresar una alta movilidad del elemento, como ya ha sido referido y una presencia abundante debido posiblemente a la fertilización en plátano en la zona, que incluye una gran cantidad de potasio en esta práctica y la facilidad de lavado de este elemento; este patrón es similar al expuesto por Veneklass (1990) y Ferm y Hultberg (1995) que afirmaron que el K, es el nutriente más fácilmente lavable y cuenta con una gran circulación interna en los bosques, y por ello se dificulta la realización de conclusiones concernientes a la deposición seca sobre el K. Así mismo, este resultado concuerda con lo reportado por Jaramillo y Giraldo (2004), quienes encontraron que los contenidos de K en el agua de lavado foliar fueron

más altos que los encontrados en la lluvia total; Jaramillo (2005) también indica que en diferentes estudios se ha incrementado la concentración del K (hasta en 9,6 veces) en el agua de lavado foliar en diferentes agrosistemas. Golley (1991) encontró que el K aparece en concentraciones hasta diez veces mayores que las registradas en el agua lluvia que ingresa al ecosistema. Su participación en los procesos estomáticos, que facilitan su exudado a la superficie de las hojas, favorece su incremento en la precipitación que ha pasado por el dosel.

El Mg también presentó flujos netos positivos en los agrosistemas con cubierta arbórea, evidenciando pérdidas netas mayores en el dosel del eucalipto y en el nogal. La permanencia de las hojas de pino, que inician su senescencia después que las del eucalipto y el nogal, puede ser la razón de la permanencia de este nutriente en las hojas.

En general, se puede observar que el agrosistemas donde se presentó mayor flujo de nutrientes en la precipitación neta bajo el café fue en el agrosistema de café nogal, y esto puede estar influenciado por la composición y características de las hojas de las especies que lo conforman. Kozlowski y Pallardy (1997) concluyen que existen algunas diferencias entre los agrosistemas, en donde hubo mayor flujo de nutrientes entre la precipitación total y la neta, debido al tipo de especie del dosel, ya que la capacidad de la pérdida de nutrientes por el lavado varía entre las especies; por ejemplo, las hojas con una superficie gruesa y ceramentosa son lixiviadas y mojadas con mayor dificultad, mientras que la permanencia de las hojas en el árbol, puede incrementar la acumulación de nutrientes en ellas.

Las ganancias netas o pérdidas de estos elementos pueden estar relacionadas con la concentración en la lluvia; cuando la concentración de lluvia es baja, los flujos netos/mm de lluvia son positivos (pérdidas netas del dosel) pero cuando la concentración en lluvia es alta, los flujos netos son negativos (ganancias netas para el dosel). Este patrón contrasta con el comportamiento de los elementos fácilmente lavables (potasio). Algunos autores explican que aunque el flujo neto sea negativo, esos iones no son realmente absorbidos por la cubierta; se asume que los iones que permanecen en la cubierta han quedado estrechamente ligados a esta cubierta tras la lluvia (Neary y Gizyn, 1994) y son lavados con el siguiente evento de precipitación o pueden ser tomados por la microflora presente en la superficie vegetal (Eatonet y otros, 1995). La cubierta puede ser una fuente de Na, K, Ca y Mg para cubrir parte de los requerimientos de las plantas.

### 7.2.3 Nutrientes en la escorrentía, a través de la hojarasca y en el suelo en los agrosistemas.

En estos compartimentos se realizan procesos bióticos, físicos y químicos complejos. Estos procesos influyen en la composición de la solución edáfica, consistentes en las entradas de los elementos de las soluciones gravitacionales (la lluvia y su posterior redistribución), la producción interna de elementos por mineralización de la materia orgánica del suelo y la meteorización, complejos equilibrios de iones intercambiables y las salidas por absorción (raíces y microbiota) y por drenaje profundo (Álvarez, 2007).

#### 7.2.3.1 Agrosistema de café a libre exposición.

En la Figura 8 se observa que en este agrosistema, el Ca, P, Mg y K tienen flujos negativos en la escorrentía, lo cual indica que disminuyen su concentración por esta vía y por tanto pueden estar siendo depositados o almacenados en la hojarasca y de allí dirigirse hacia el suelo; esto se corrobora con los resultados del flujo a través de este compartimento, que muestran que estos mismos elementos aumentan su concentración al pasar por la hojarasca, aunque el aumento en el Mg, es menor, lo que indica que una gran parte queda almacenado en la capa de hojarasca del agrosistema, debido posiblemente a su capacidad de adsorción por la materia orgánica. Además, estas diferencias entre las concentraciones entre la escorrentía –con flujos negativos en todos los nutrientes–, y el flujo a través de la hojarasca se relacionan con la cantidad de agua que llega al piso del agrosistema, siendo menor la cantidad en la escorrentía, por tanto la concentración de nutrientes es menor.

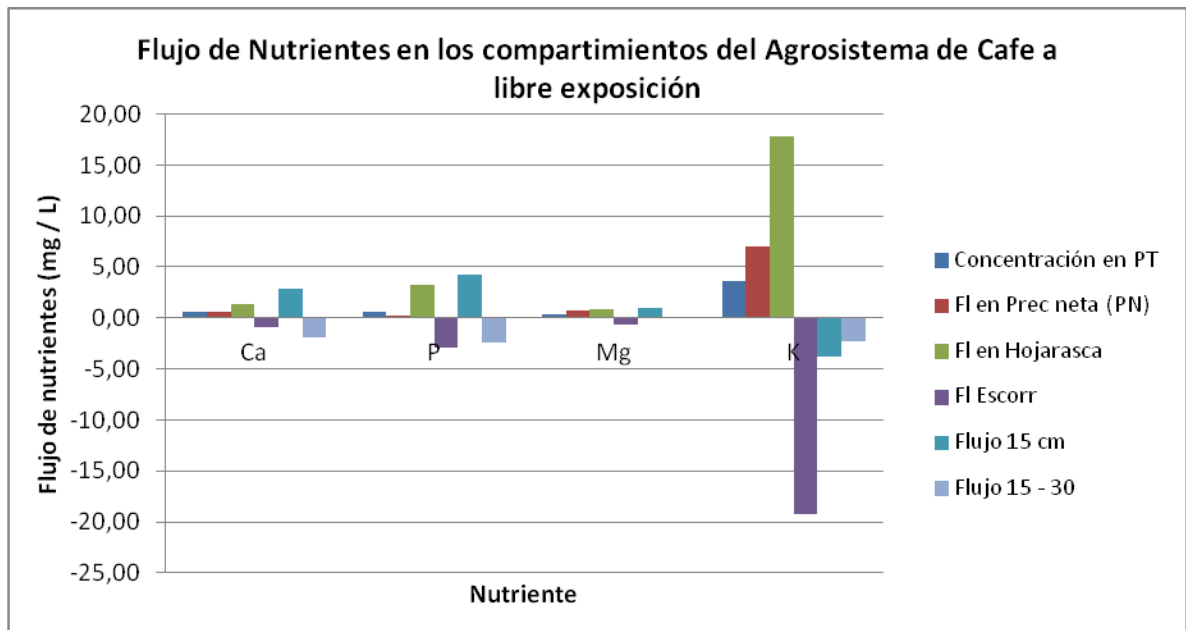


Figura 8. Flujo de nutrientes en agrosistema de café a libre exposición.

El flujo de los nutrientes a través de la hojarasca en este agrosistema se puede ver favorecido por las características de la hojarasca que se produce en éste, que según Urrego y Farfán (2002), no difiere de la cantidad aportada cuando se encuentra en asocio con el componente arbóreo.

En el flujo de agua a 15 cm de profundidad del suelo se observa que hay movimiento de Ca, Mg y P, con aumento en la concentración de los mismos, lo que indica que hay un lavado de los nutrientes presentes en esta capa; el flujo del K, indica que se ha absorbido por el café - que presenta altos requerimientos de este nutriente, por su acumulación en los frutos -, o ha sido fijado en estos primeros centímetros de suelo. Todos los nutrientes disminuyeron su concentración los 30 cm de profundidad, respecto a los primeros 15 cm, lo que indica que se han almacenado en esta capa o han sido aprovechados por el cultivo.

#### 7.2.3.2 Agrosistema de café pino.

Los resultados de los flujo de nutrientes en este agrosistema se presentan en la Figura 9, donde se muestra una pérdida neta del Mg, Ca, P y K en el flujo de la precipitación neta, con respecto a la precipitación total, mostrando su incremento en el agua que llega a los compartimientos inferiores, debido al lavado de ellos desde la cubierta.

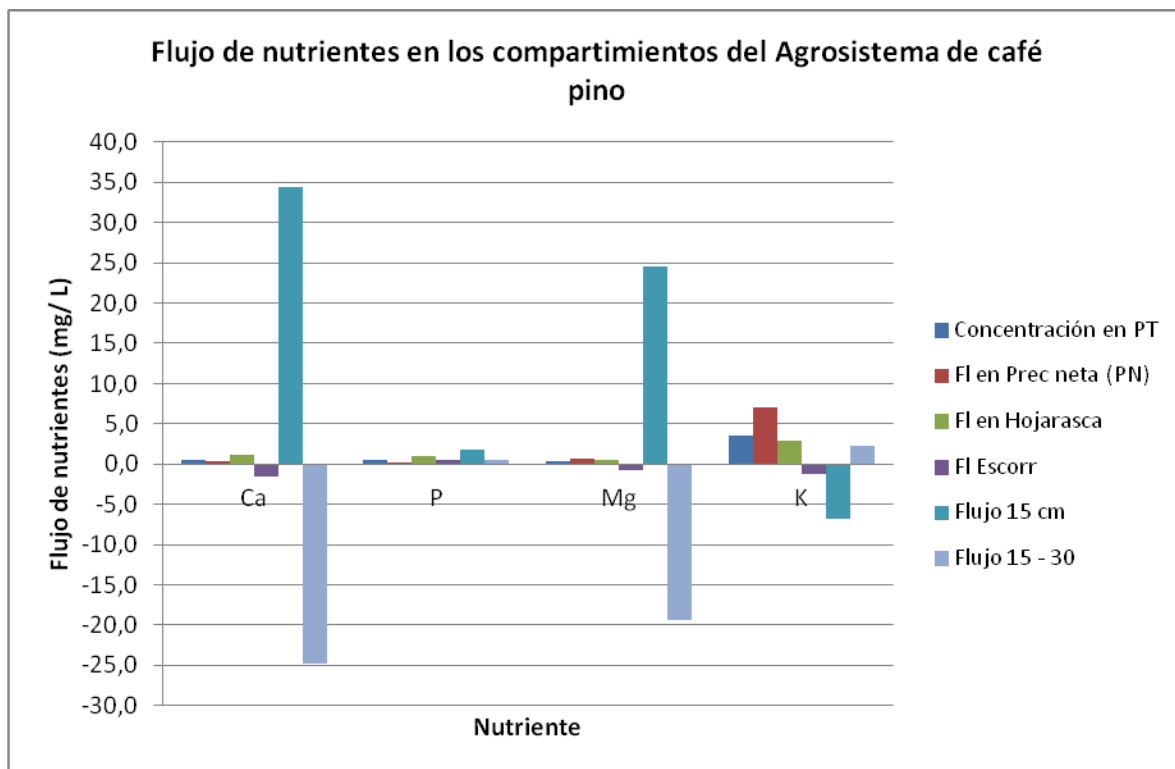


Figura 9. Flujo de nutrientes en agrosistema de café pino

Todos los nutrientes analizados evidencian ganancias netas respecto a la escorrentía, lo que muestra un incremento de dichos nutrientes en la hojarasca y por tanto una disminución en la concentración por esta vía. En el flujo de agua al pasar por la hojarasca, todos los elementos aumentaron su concentración, lo que indica que los procesos que se llevan a cabo en este compartimento, permiten la liberación de nutrientes al sistema y que existe un lavado y el movimiento hacia capas más profundas del suelo. El impacto de los árboles en la fertilidad del suelo depende de las características del reciclaje de nutrientes, tal como la química de la hojarasca y las tasas de descomposición (Montagnini, 2000).

Al llegar a los 15 cm de profundidad, todos los elementos, a excepción del K, presentan aumento en su cantidad, lo que indica que se han arrastrado o lavado de esta capa del suelo. El lavado de nutrientes es particularmente un problema en suelos con alta infiltración y bajo retención de nutrientes como en suelos arenosos de la zona cafetera. El P y el K aumentan su concentración al llegar a los 30 cm de profundidad, es decir pueden ser lavados hacia capas más profundas; mientras

que el Ca y Mg pueden ser fijados o almacenados a esta profundidad. El Ca puede ser fijado con el P o con los hidrogeniones en suelos ácidos.

### 7.2.3.3 Agrosistema Café Eucalipto.

Los resultados del flujo de nutrientes en este sistema agroforestal se presentan en la Figura 10, donde se muestra que el flujo entre la precipitación neta y precipitación total indica una gran interceptación por parte de la cubierta arbórea y su conjunción con la cubierta del cultivo del café.

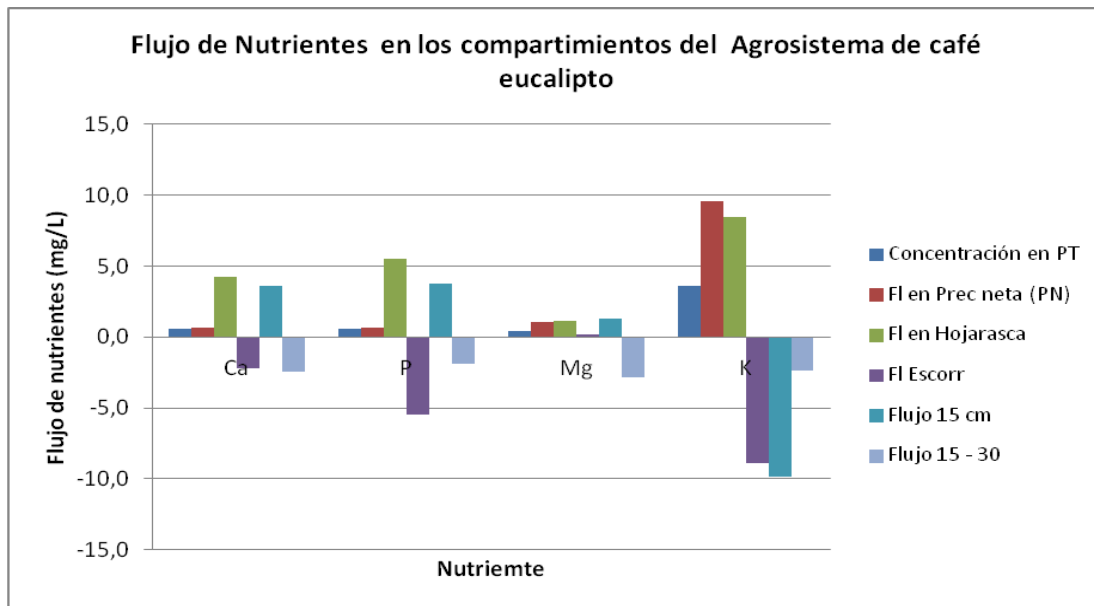


Figura 10. Flujo de nutrientes en agrosistema de Café Eucalipto

La escorrentía presenta un flujo positivo (pérdidas netas para la hojarasca) para Ka, Ca y P; mientras que los demás elementos tuvieron ganancias netas, lo que indica que estos nutrientes pueden estar quedando almacenados en la hojarasca para luego ingresar al suelo a capas superficiales o subsuperficiales. A los 15 cm de profundidad, el Mg y el Ca presentaron flujos positivos, es decir fueron arrastrados desde la primera capa del suelo, mientras que a los 30 cm, los resultados indican que hay disminución de la concentración de todos los nutrientes, por tanto hay absorción, fijación o almacenamiento entre los 15 y 30 cm de profundidad.

### 7.2.3.4 Agrosistema Café Nogal.

En la Figura 11 se presenta el flujo de nutrientes en el agrosistema de café nogal.

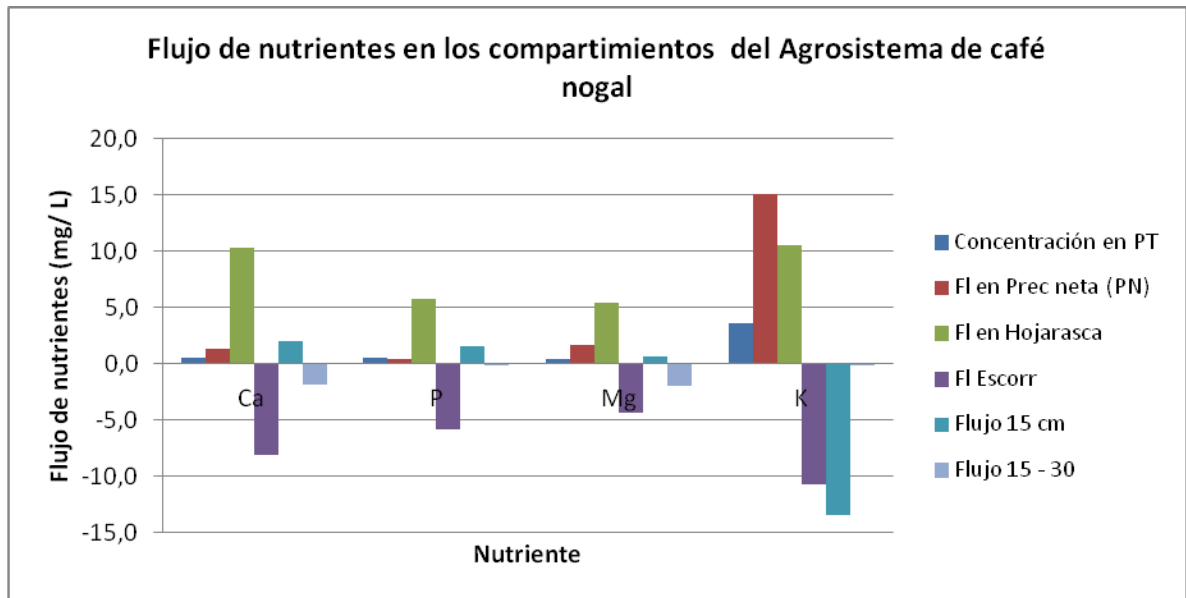


Figura 11. Flujo de nutrientes en agrosistema de Café nogal.

En este sistema, todos los nutrientes presentan flujo neto positivo en la PN, con pérdidas para el dosel; resalta como ya se ha señalado, la alta movilidad del K.

Los nutrientes en este agrosistema presentan un flujo neto negativo (ganancias netas) para la escorrentía, lo que indica que pueden ser retenidos por la hojarasca para ser infiltrados hacia las capas inferiores del suelo.

En el flujo de hojarasca, todos los nutrientes presentan pérdidas netas, lo que indica que se liberan en los procesos que se desarrollan en este compartimento, con menores concentraciones de Mg. Jaramillo (1995) sugiere que en algunos andisoles, este nutriente puede ser menos susceptible a la lixiviación que los demás cationes básicos. Los elementos son lavados desde este manto hacia capas más profundas. A los 15 cm, el Ca, P y el Mg, tienen pérdidas netas, que muestran que estos nutrientes se movilizan a través del suelo y se dirigen hacia las capas subsuperficiales. El K presenta ganancia neta, que muestra que puede ser retenido o absorbido por el cultivo de café o la especie forestal en los primeros 30 centímetros del suelo, zona de mayor contenido de raíces de esta especie.

En general, la concentración de los nutrientes en la escorrentía de los agrosistemas es menor respecto a la concentración en el flujo de agua que pasa la hojarasca; esto puede darse debido a que la proporción de agua de escorrentía es mucho menor que la que fluye hacia el interior del suelo, pasando por la

hojarasca; además este mantillo en los sistemas agroforestales permite que se retenga humedad y con ella los nutrientes en este compartimiento, que pueden ingresar más adelante al suelo para ser aprovechados por el cultivo, resultados similares reporta Jaramillo (2005), en sistemas agroforestales donde las cantidades de nutrientes que se movilizan en la escorrentía son inferiores a las registradas en el agua que se infiltra.

Existe un aumento en la cantidad de nutrientes bajo la hojarasca, la cual puede estar dada por el aporte del escurrimiento cortical, que aunque suele ser pequeño desde un punto de vista de volúmenes y porcentajes, y por ello su poca atención (Taniguchi *et al.*, 1996), en algunas ocasiones ha registrado grandes cantidades (Herwitz, 1986; Lloyd y Marques, 1988) o altos porcentajes de respecto de la precipitación total, con un valor extremo de 42% (Slatyer, 1965), lo que beneficiaría el transporte de nutrientes hacia el suelo. Parker (1993), en sus estudios encuentra que la lluvia a través del dosel y el flujo por escurrimiento de los tallos permiten el retorno de nutrientes desde la vegetación al suelo, aunque el flujo por los tallos es una fracción pequeña (menor al 10%) con respecto a la lluvia a través del dosel.

La composición y concentración de nutrientes en los flujos a través de la hojarasca también están determinadas por las características propias de la hojarasca de cada uno de los agrosistemas como son la producción de hojarasca y la concentración de nutrientes que varía en cada uno de ellos, presentándose por ejemplo mayor concentración de todos estos elementos en el flujo de agua al atravesar la hojarasca en agrosistema de café nogal, mientras que en el café pino se presentaron las concentraciones más baja en todos los elementos; así mismo se pueden establecer diferencias entre las concentraciones de las hojas secas de las especies forestales y las hojas secas del café, presentándose mayores concentraciones en las últimas.

Al comparar estadísticamente el movimiento de nutrientes al pasar por la hojarasca, solo se presentan diferencias significativas en este agrosistema en los elementos de Ca y Mg.

En general, al observar el movimiento de los nutrientes desde el paso por la hojarasca hasta 30 cm de profundidad del suelo, se encuentra que la mayoría de ellos disminuyen su concentración, lo que indica que estos son aprovechados por las plantas o se van depositando o fijando en las primeras capas del suelo para

una posterior absorción, como lo indica Imbach y otros (1989) citado por Schrot y otros (2001), quienes encontraron bajas concentraciones de K, Ca y Mg en el agua de percolación a 1 m de profundidad en el agrosistema de cacao y *Cordia*.

#### 7.2.4 Dinámica de los nutrientes

##### 7.2.4.1 Dinámica del Calcio.

El Ca aumenta su concentración al atravesar el dosel de todos los agrosistemas, excepto bajo las calles del café a libre exposición. El mayor incremento se registra bajo la cubierta en este mismo agrosistema y bajo la cubierta de café Nogal.

La concentración de Ca al pasar la hojarasca, aumentó respecto a la lluvia neta en todos los agrosistemas; sin embargo, el agrosistema donde mayor flujo de calcio hubo fue el de café nogal, con un flujo de 0,88 Kg / Ha, es decir, este nutriente fue arrastrado desde la hojarasca hacia el suelo y esto puede darse porque la mineralización rápida de la hojarasca del árbol puede liberar este nutriente de las hojas caídas. El agrosistema donde se presentó el menor aumento fue el de café pino; este comportamiento se debe a las características de las hojas de pino, que se descomponen más lentamente y cuya disposición en el suelo puede impedir el paso de agua a través de la hojarasca, impidiendo la liberación de este elemento y la continuidad de su flujo a través de los demás compartimentos.

En la escorrentía, se presentan flujos netos negativos en todos los agrosistemas, lo que muestra una acumulación en la hojarasca. Al pasar este nutriente a las capas del suelo, muestra una tendencia positiva, lo que indica que hay pérdidas en la hojarasca y en las capas inmediatamente por debajo de ésta, ya sea por acumulación en la primera o por absorción del nutriente en la capa superficial del suelo, que en el caso del eucalipto puede contribuir hasta con un 18,8% los requerimientos de este mineral para la plantación (Andrade y otros, 1995). La acumulación del Calcio se puede deber a la fijación en las partículas resultantes de la formación de ácidos orgánicos en la descomposición de la biomasa o a su capacidad de fijación por parte del P o de los hidrogeniones presentes en los suelos ácidos de la zona de estudio. Este comportamiento depende de la capacidad de intercambio catiónico de los suelos, la presencia de otros nutrientes con estado de oxidación positivo y las aplicaciones de Ca y Mg en los fertilizantes usados en la producción cafetera. En la Figura 12 se muestra la dinámica de este elemento al pasar por los diferentes compartimentos de los agrosistemas cafeteros. Solo existe diferencia estadísticamente significativa entre los cuatro

agrosistemas en el flujo de hojarasca y esta diferencia la hace el agrosistema de café nogal.

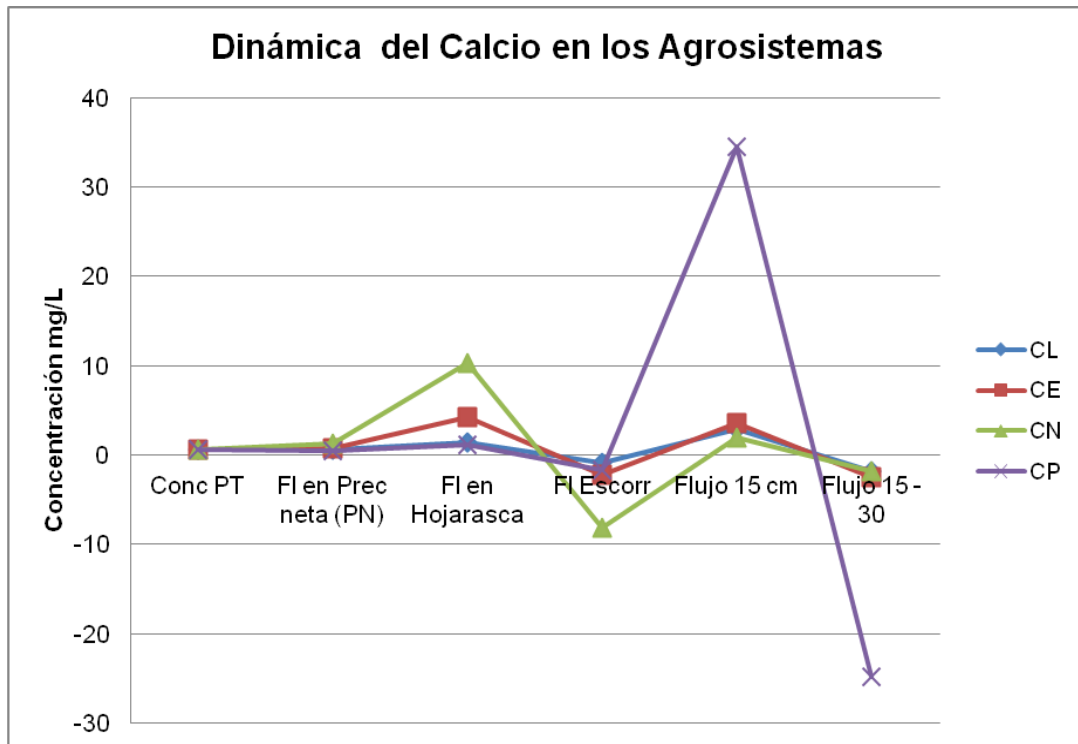


Figura 12. Dinámica del Calcio en los agrosistemas cafeteros.

#### 7.2.4.2 Dinámica del fósforo.

El P, al atravesar el dosel de los sistemas agroforestales aumenta su concentración, especialmente bajo el café, sin embargo, es el menor incremento entre los agrosistemas en estudio. Este elemento puede depositarse o ser absorbido durante su paso por el dosel de la especie forestal o por las hojas del cultivo.

La concentración de P al pasar por la hojarasca, presentó un flujo positivo en todos los agrosistemas, en este compartimento. Los flujos positivos al llegar a los 15 cm de profundidad, indican que este nutriente se mueve en la solución del suelo entre la hojarasca y los primeros 15 cm, en todos los agrosistemas; posteriormente se incrementa la fijación del fósforo, entre los 15 y los 30 cm,

debido a la naturaleza ácida de los suelos donde se llevó a cabo el estudio, con excepción del café pino, en el cual esta solución enriquecida en fósforo sigue infiltrándose hacia capas inferiores, lo que podría ser causado por la presencia de sustancias con mayor contenido alcalino, liberadas de la descomposición de las acículas de pino, que impidan que se fije rápidamente en las primeras capas del suelo.

En la escorrentía, los flujos netos negativos muestran que el fósforo reduce su concentración en esta vía en todos los agrosistemas, lo que significa que se acumula en la hojarasca o se fija en los suelos ácidos de la zona de estudio. La excepción en el flujo en café pino, puede deberse a la dificultad para la trascolación en la hojarasca debido a la disposición de las hojas de esta especie, como ya se ha analizado. En la Figura 13 se muestra la dinámica de este elemento al pasar por los diferentes compartimientos de los agrosistemas cafeteros, sin embargo, estadísticamente no hay diferencias entre ellos.

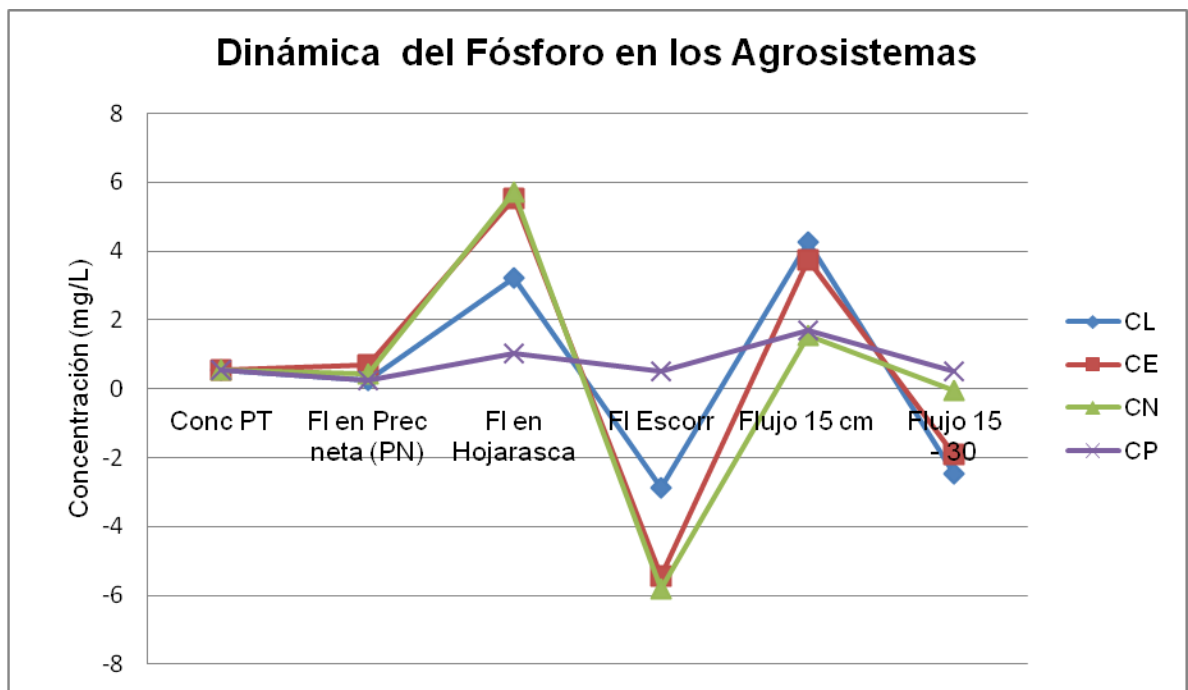


Figura 13. Dinámica del Fosforo en los agrosistemas cafeteros.

#### 7.2.4.3 Dinámica del Magnesio.

El Mg presenta un comportamiento similar a la mayoría de los elementos en los agrosistemas, con menores valores en los flujos respecto a los demás nutrientes, con excepción de los resultados en café nogal, que muestra un notable incremento al pasar por la hojarasca.

En la escorrentía, se presentan flujos negativos en los agrosistemas, con excepción del café eucalipto, en el cual puede perderse este elemento por esta vía.

A 15 cm, existe flujo positivo, con movimiento de nutrientes en las capas subsuperficiales del suelo. A los 30 cm de profundidad, existe flujo negativo para los cuatro agrosistemas, es decir, que este elemento puede haber sido fijado por la fracción de partículas arcillosas presentes en estas primeras capas del suelo, o absorbido por los componentes del sistema agroforestal. En la Figura 14 **Figura 13** **Figura 12** se muestra la dinámica de este elemento al pasar por los diferentes compartimientos de los agrosistemas cafeteros, solo existe diferencia estadísticamente significativa entre los cuatro agrosistemas en el flujo de hojarasca y esta diferencia la hace el agrosistema de café nogal.

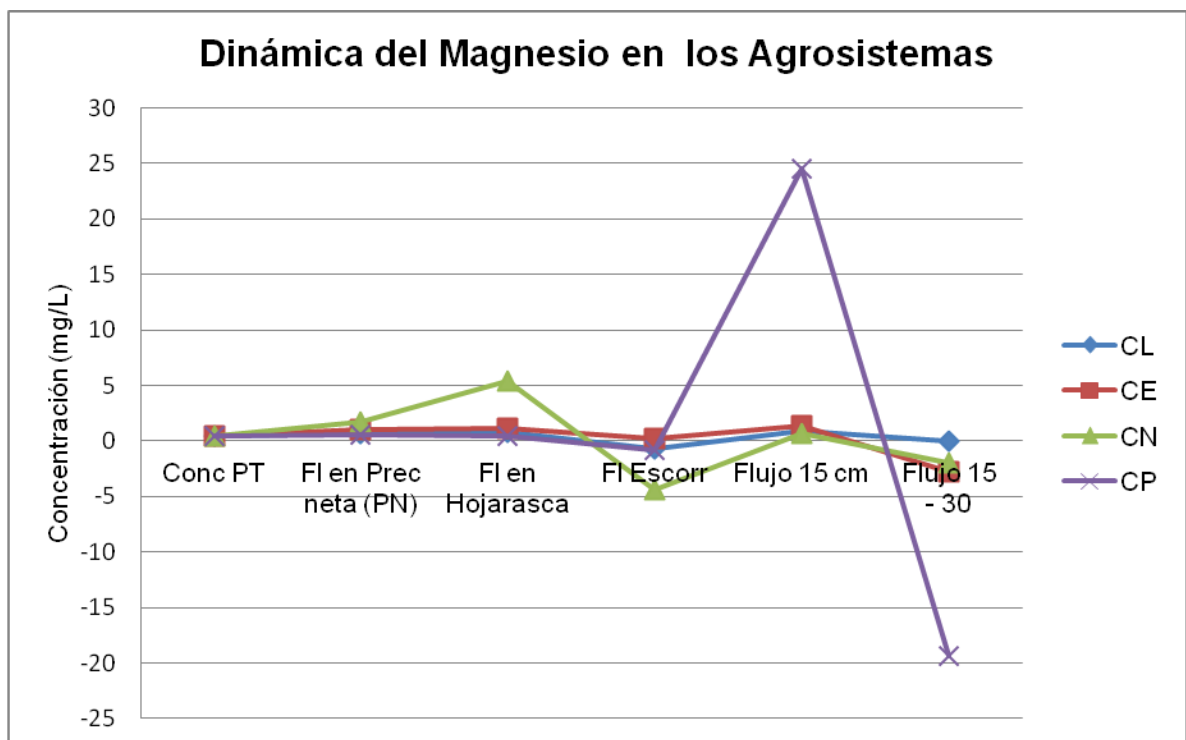


Figura 14. Dinámica del Magnesio en los agrosistemas cafeteros.

#### 7.2.4.4 Dinámica del Potasio.

En todos los agrosistemas se presentó un incremento en la concentración de este elemento, al pasar por el dosel y por la capa de hojarasca. En café nogal y café a libre exposición fue el elemento con mayor concentración en la precipitación neta, convirtiéndolo en el nutriente más móvil en estos agrosistemas.

Todos los agrosistemas presentaron flujo positivo al pasar por la hojarasca y negativo en la escorrentía, es decir, este elemento puede haberse acumulado en el mantillo; así mismo su concentración fue disminuyendo en las capas subsuperficiales del suelo. El agrosistema con mayor flujo en la hojarasca, fue el café nogal y el de menor flujo fue el café pino; en este caso, coincide con Londoño y otros (2007), que reportan que las coníferas como el pino, acumulan menores cantidades de K en la hojarasca.

En los flujos a 15 cm se encontraron ganancias netas de este nutriente en todos los agrosistemas. Estos flujos negativos indican que el K fue acumulado en los primeros centímetros del suelo o absorbido como nutriente en las primeras capas de raíces del cafeto y de los árboles de sombrío, que presentan una mayor proporción de sus raíces finas en los primeros 30 cm de suelo, antes de llegar a esta profundidad. En este caso, las pocas lluvias durante los días de muestreo, disminuyen el lavado de nutrientes hacia las capas del suelo, así como la liberación desde la hojarasca, e incrementan la retención en las capas superficiales del suelo. En la Figura 15 **Figura 13** Figura 12 se muestra la dinámica de este elemento al pasar por los diferentes compartimientos de los agrosistemas cafeteros, sin embargo, estadísticamente no hay diferencias entre ellos.

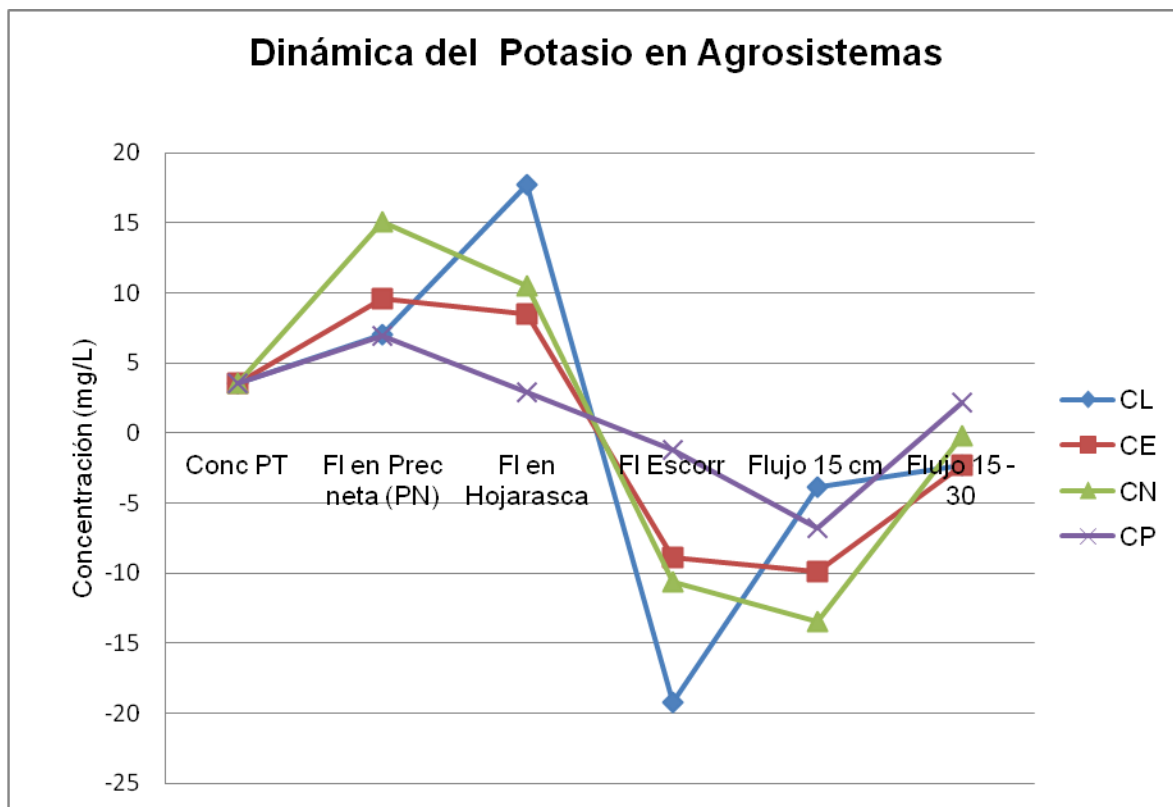


Figura 15. Dinámica del Potasio en los agrosistemas cafeteros.

#### 7.2.5 Balance de los nutrientes.

El balance de todos los nutrientes en cada uno de agrosistemas fue negativo, en algunos con mayores o menores valores, pero con el mismo comportamiento, es decir, las salidas de los nutrientes por escorrentía y por flujo a 30 cm fueron superiores a los ingresos, producto de la precipitación total.

Agrosistema	Balance Ca	Balance P	Balance Mg	Balance K
CL	-3,71	-3,55	-2,90	-8,52
CP	-7,21	-3,97	-3,79	-9,80
CE	-7,93	-2,81	-4,63	-19,93
CN	-10,28	-6,38	-6,14	-16,40

Las mayores pérdidas para los agrosistemas, respecto al potasio, se dieron por su mayor ingreso en concentración y por su alta movilidad durante el paso por los diferentes compartimentos de los agrosistemas.

Para el caso del fósforo, que en general presenta las menores pérdidas en todos los agrosistemas, puede presentarse este comportamiento posiblemente, debido a la fijación de este elemento a los suelos ácidos, derivados de ceniza volcánica de la zona cafetera Colombiana.

Esta información sobre los balances de nutrientes es de gran importancia para las decisiones sobre la fertilización del cultivo de café en esta región del país.

## 8. CONCLUSIONES

El comportamiento y los flujos de agua y de nutrientes entre agrosistemas forestales de café y a libre exposición presentan algunas diferencias en los compartimientos, debido a las características propias del componente arbóreo que lo constituyen, como su estructura, características del follaje, estructura del tronco y requerimientos nutricionales.

De acuerdo a los análisis estadísticos, solo se presentó diferencias significativas entre los agrosistemas en la variable hidrológicas de escorrentía.

Todos los agrosistemas presentaron los balance hídricos (general, dosel y la hojarasca) negativos, es decir, hubo pérdidas de agua para el agrosistema en general. En la capa de hojarasca, estas pérdidas pueden significar en términos generales que durante el paso por el agrosistema y por la hojarasca, se ganó agua de otros compartimientos, que posteriormente pueden ser llevados a capas más profundas del suelo, del agrosistema como drenaje profundo o por evapotranspiración. Mientras que para el dosel, los cambios son tan bajos y poco significativos que pueden no considerarse dentro de los estudios hidrológicos.

El agrosistema de café pino tuvo la mayor interceptación por el dosel respecto a la precipitación total, por tanto la precipitación neta en las calles del cultivo y bajo el cafeto fueron las menores; la alta interceptación del dosel de la especie forestal puede estar relacionada con características propias de la especie, como área foliar (mayor superficie de evaporación), albedo (menor) y consumo de agua en comparación con las latifoliadas.

Respecto al flujo de agua por debajo de la hojarasca, no existen diferencias significativas entre los cuatro agrosistemas, de acuerdo al análisis estadístico; sin embargo, el menor flujo se presentó en el café pino, lo cual puede estar relacionado con la cantidad, las características y la disposición de la hojarasca en este agrosistema, favoreciendo el proceso de escorrentía más que el de infiltración; esto se evidenció en la mayor escorrentía que presentó el café pino respecto a los demás agrosistemas.

Se presentó un aumento en la concentración de todos los nutrientes al pasar por el dosel en los agrosistemas, como producto del lavado de la deposición atmosférica, de la deposición seca o la exudación o excreción de elementos por las hojas o en los procesos de senescencia, o a factores de manejo de los sistemas productivos en la zona, como fertilización, quema de leña para consumo doméstico o movimientos de suelo por procesos atmosféricos (vientos con arrastre de polvillo enriquecido).

El agrosistema de café nogal presenta mayores flujos y concentraciones de P, Mg y Ca después de pasar por la hojarasca, que los demás agrosistemas, lo que significa que los flujos de agua se enriquecen al pasar por este mantillo; solamente el K se presenta en mayor cantidad y concentración en el agrosistema de café a libre exposición y esto puede darse por la cantidad de agua que llega al piso del agrosistema (mayor que la precipitación total) y que posteriormente se infiltra, la cual viene cargada de un alto contenido de K que no solo está en la precipitación total sino que además puede ser arrastrada de las hojas del café. El agrosistema café pino tuvo la menor cantidad de nutrientes por debajo de la capa de hojarasca.

Existen diferencias en la concentración y cantidad de nutrientes en el flujo que pasa a través de la hojarasca, debido a la composición y producción de la biomasa de las especies forestales.

La mineralización rápida en la hojarasca puede aportar nutrientes a las plantas de los agrosistemas, en formas asimilables por medio del flujo que llega a las capas del suelo, como el caso de K, Ca y Mg; sin embargo la descripción de las características individuales del comportamiento de cada uno de ellos, se dificulta por las interacciones entre la química de los nutrientes, la absorción por las raíces finas y por la biota asociada a la hojarasca.

El balance de los flujos de nutrientes presenta ligeras variaciones en las proporciones y concentraciones en los diferentes agrosistemas, debido a las características particulares de las especies, así como los requerimientos hidrológicos de cada una y a las características físicas, químicas y biológicas de la capa de hojarasca y del suelo. Se observa en general, que hay movimiento en la mayoría de los nutrientes pero va disminuyendo su concentración a medida que pasa por los diferentes compartimientos del agrosistema, con acumulación o fijación de nutrientes.

## BIBLIOGRAFÍA

ABOAL VIÑAS, Jesús R. Flujos Netos Hidrológicos y Químicos Asociados de un Bosque de Laurisilva en Tenerife. Universidad de la Laguna. Departamento de Biología Vegetal. 1998.

ALAVALAPATI, J., et al. J. Agroforestry development: and environmental economic perspective. En: Agroforestry Systems , 2004, vol. 61/62, p. 299-310.

ALTAMIRANO TINOCO, José Andrés. Biomasa y nutrientes de mantillo en diferentes sistemas de producción de café (*Coffea arabica* L.) en el Municipio de Masatepe, departamento de Masaya, Nicaragua. Managua, Nicaragua. Universidad Nacional Agraria. Departamento de Producción Vegetal, 2005. 46 p.

ANDRADE, Guilherme de C., et al. Contribución del agua de lluvia en la oferta de nutrientes minerales para *Eucalyptus grandis*. En: Bosque, 1995, vol. 16, no. 1, p. 47-51.

ARELLANO, G. Pérdida de suelo y nutrientes en agroecosistemas de café en la subcuenca del río Castán, Trujillo-Venezuela. En: Revista Forestal Venezolana, 2001, vol. 45, no. 1, p. 9-14.

ARGUELLO, H. Cambios en la composición bioquímica y su aplicabilidad en el uso de follajes verdes como fuente de materia orgánica y nutrientes en sistemas agroforestales. En: Agronomía Colombiana, 1995, vol. XII, no. 2, p. 169 - 181.

AUSTIN, A. y VITOUSEK, P. Precipitation, decomposition and litter decomposability of *Metrosideros polymorpha* in native forests on Hawaii. En: Journal of Ecology, 2000, vol. 88, p. 129 – 138.

BARRERA, Marcelo D., et al. Descomposición del mantillo y liberación foliar neta de nutrientes de *Austrocedrus chilensis* (D. Don) Pic. Serm. et Bizzarri en El Bolsón, Río Negro. LISEA -Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales-, Facultad de Ciencias Naturales y Museo, UNLP. 2003.

BEER, J. y MUSCHLER, D. K. y SOMARRIBA, E. Shade management in coffee and cacao plantations. En: Agroforestry Systems, 1998, no. 38, p. 139-164.

BONNELL, M. y BRUUNZEELL, L.A. Forest, water and people in the humid tropics: past, present and future hydrological research for integrated land and water management (Hydrology series). 2005.

BRUIJNZEEL, L. A. Hydrology of moist tropical forests and effects of conversion: a state of knowledge review. Amsterdam: UNESCO - University of Amsterdam, International Hydrological Programme, 1990. 224 p.

BUITRAGO y SALAZAR. Los efectos de los *Eucalyptus globulus*, *Pinus radiata* y ocho especies nativas altoandinas sobre el suelo. Bogotá: Financiera Eléctrica Nacional, FEN. 1986.

BURDON, J. N. Are the traditional concepts at the structures of humics substances realistic. En: Soil Science, 2001, no. 166, p. 752-769.

CARDONA, D. A. y SADEGHIAN, S. Ciclo de nutrientes y actividad microbiana en cafetales a libre exposición solar y con sombrero de *Inga spp*. En: CENICAFÉ, 2005, vol. 56, no. 2, p. 127- 141.

CAVELIER, J. y VARGAS, G. Procesos Hidrológicos. En: Ecología y Conservación de bosques neotropicales. Cartago : Guariguata, M y Katan, H. [eds.]. 2002, p. 145-166.

CENTRO AGRONÓMICO TROPICAL DE INVESTIGACIÓN Y ENSEÑANZA (CATIE) y ORGANIZACIÓN DE ESTUDIOS TROPICALES (OTS). Sistemas agroforestales: principios y aplicaciones en los trópicos. San José de Costa Rica : Trejos, 1986, 818 p.

CLARK, D. 2002. Los factores edáficos y la distribución de las plantas. M. Guariguata, M. y Katan, H. [eds.]. Ecología y Conservación de Bosques Neotropicales. Cartago : 2002, 9, p. 193 – 222.

DEPARTAMENTO TÉCNICO ADMINISTRATIVO DEL MEDIO AMBIENTE, - CORPORACIÓN SUNA HISCA. Plantaciones de especies forestales. Componente biofísico. Tomo I. Parque Ecológico Distrital de Montaña Entrenubes. p. 247-266. Bogotá : DAMA-SUNA HISCA, disponible en: ([http://www.secretariadeambiente.gov.co/sda/libreria/pdf/ecosistemas/areas\\_protegidas/en\\_a12.pdf](http://www.secretariadeambiente.gov.co/sda/libreria/pdf/ecosistemas/areas_protegidas/en_a12.pdf))

DÍAZ FERNÁNDEZ, Esperanza, *et al*. Análisis comparativo sobre la interceptación pluvial entre hojarasca de pino, encino y pastizal utilizando un simulador de lluvia en la Cuenca Hidrográfica Cointzio, Michoacán.

DOBSON, A. P. Bradshaw A.D. and Baker A.J.M. Hopes for the future: restoration ecology and conservation biology. En: Science, 1997, no. 277, p. 515–522.

EATON, J.S.; LIKENS, G.E. y BORMAN, F. H. Throughfall and stemflow chemistry in a northern hardwood forest. En: The Journal of Ecology, 1973, vol. 61, no. 2, p. 495-508.

FARREL, J. y ALTIERI, M. 1997. Sistemas agroforestales. En: Agroecología, bases científicas para una agricultura sustentable. La Habana : Altieri, M. 1997, 249 p.

FASSBENDER, H. W. 1987. Modelos edafológicos de sistemas agroforestales. Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza CATIE. Departamento de Recursos Naturales Renovables. Turrialba : 1987, 475 p.

FÖLSTER, H y KHANNA, P. K. Dynamics of nutrient supply in plantation soils. En: Management of Soil, Nutrients and Water in Tropical Plantation Forests. Australian Centre for International Agricultural R. Canberra : Sadanandan, E y A.G. Brown, 1997.

GALICIA, Leopoldo, *et. al.* Flujos de C, N y P al suelo de dos especies de árboles remanentes en una pradera tropical estacional. En: Acta Botánica Mexicana, Diciembre de 2002, 61, p. 41-57.

GARCÍA, L. y ONG, C. Ecological interactions, management lessons and design tools in tropical agroforestry systems. En: Agroforestry Systems, 2004, vol. 61/62, p. 221 – 236.

GIRALDO, J. F. 2003. Aspectos hidrológicos y de nutrimentos en cafetales bajo diferentes densidades de sombrío de guamo /Inga edulis/ Mart. Tesis Ingeniería Agronómica. Manizales: Universidad de Caldas. Facultad de Ciencias Agropecuarias, 2003. 56 p.

GIRALDO, J. F. y JARAMILLO, A. Ciclo hidrológico y transporte de nutrientes en cafetales bajo diferentes densidades de sombrío de guamo. En: CENICAFÉ, 2004, vol. 55, no. 1, p. 52-68.

GIRALDO, L. 1992. Balance hídrico en dos microcuencas de Piedras Blancas, Antioquia y efecto de tres coberturas vegetales sobre la humedad del suelo. Tesis de Magíster en Silvicultura y Manejo de Bosques. Medellín : Universidad Nacional de Colombia, 1992. 131 p.

GOLDING, D. y STANTON, C. Water storage in the forest floor of subalpine forest of Alberta. En: Canadian Journal of Forest Research, 1972, 2, p. 1-6.

GONCALVES, J. N.; BARROS, E. y NOVAIS, R. Soil and Stand management for short – rotation plantations. En: Management of soil, nutrients and water in tropical plantation forest. Sadanan E y A Brown [eds.], 1997, 571 p.

GRIMM, U. y FASSBENDER, H. W. Ciclos Biogeoquímicos en un Ecosistema Forestal de los Andes Occidentales de Venezuela. III. Ciclo Hidrológico y Translocación de Elementos Químicos con el Agua. En: Turrialba , 1981, vol. 31, no. 2, p. 89-99.

IMBACH, A. C., *et al.* Sistemas Agroforestales de Café (*Coffea arabica*) con Laurel (*Cordia alliodora*) Cafe con Poro (*Erythrina poeppigiana*) en Turrialba, Costa Rica. VI. En: Balances Hídricos e Ingreso con lluvia lixiviación de elementos nutritivos, 1989, vol. 39, no. 3, p. 400-415.

INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICA Y CERTIFICACIÓN, ICONTEC, NTC 1486. Documentación, Presentación de tesis, trabajos de grado *et al.* trabajos de investigación. Sexta actualización. Bogotá: El instituto, 2008. Disponible en: ([aprendeonline.udea.edu.co/lms/moodle/mod/.../view.php?id..](http://aprendeonline.udea.edu.co/lms/moodle/mod/.../view.php?id..)).

---

ICONTEC, NTC 5613. Referencias bibliográficas, contenido, forma y estructura. Documentación, Bogotá: El instituto, 2008. Disponible en: ([files.humanidadesinglesvilla.webnode.es/200000033-35b04362dd/5613.pdf](http://files.humanidadesinglesvilla.webnode.es/200000033-35b04362dd/5613.pdf))

JARAMILLO, A. Clima Andino y café en Colombia. Chinchiná : CENICAFÉ, 2005. 196 p.

\_\_\_\_\_. Contenido de nutrientes en la lluvia, agua de lavado foliar y escorrentía en cafetales con diferentes sombríos. En: Meteorología Colombiana, 2004, vol. 7, no. 7, p. 135-140.

\_\_\_\_\_. Distribución de la lluvia dentro de los cafetales. 1999, no. 262, p. 1-4.

\_\_\_\_\_. La lluvia y el transporte de nutrientes dentro de ecosistemas de Bosque y Cafetales. En: CENICAFÉ, 2003, vol. 54, no. 2, p. 134-144.

JARAMILLO, A. y CHÁVES, C. B. Aspectos Hidrológicos en un Bosque y en Plantaciones de Café (*Coffea arabica* L.) al sol y bajo sombra. En: CENICAFÉ, 1999, vol. 50, no. 2, p. 97-105.

\_\_\_\_\_. Interceptación de la lluvia en un bosque y en plantaciones de café (*Coffea arabica* L.). En: Avances en Recursos Hidráulicos, CENICAFÉ, septiembre de 1998, no. 5, p. 55-63.

JIMÉNEZ, O. F. Balance hídrico con énfasis en percolación de dos sistemas agroforestales: café-poro y café-laurel, en Turrialba, Costa Rica. Turrialba: Universidad de Costa Rica, 1986.

JORDAN, C. Nutrient Cycling Tropical Forest Ecosystem. Principles and their application in management and conservation. Georgia, USA, 1985. 190 p.

JOSE, S, GILLESPIE, A y PALLARDY, S. Interspecific interactions in temperate agroforestry. En: Agroforestry Systems, 2004, vol. 61/62, p. 237-255.

KIMMIS, J. P. Forest ecology: a foundation for sustainable forest management and environmental ethics in forestry. 2003. 609 p.

LANDSBERG, J. J. The Biophysical Environment. Management Of Soil, Nutrients and Water in Tropical Plantation Forests. Sandanandan, E.K and Brown, Alan G. [eds.], 1997.

LEAKEY, R. Reconsiderando la definición de Agroforestería. En: Agroforestería en las Américas, 1997, vol. 4, no. 16. p. 22-24.

LI, Y. C., et al. Chemical composition of throughfall and stemflow from citrus canopies. En: Journal of plant nutrition , 1997, vol. 20, no. 10, p. 1351 – 1360.

LIMA, W de P. Impacto Ambiental do Eucalipto. 2a. Sao Paulo : Universidade do Sao Paulo, 1996.

LONDOÑO ALVÁREZ, Adriana, et al. Ciclaje de nutrientes del suelo en bosques altoandinos de Antioquia, Colombia. En: Revista Facultad Nacional de Agronomía, 2007, vol. 60, no. 1, p. 3717-3734.

MAFONGOYA, P. L., GILLER, K. E. y PALM, C. A. Decomposition and nitrogen release patterns tree prunings and litter. En: Agroforestry Systems, 1998, vol. 38, p. 77-97.

MONTAGNINI, F y FAIR, P. Carbon Sequestrion: An underexploited environmental benefit of agroforestry systems. En: Agroforestry Systems, 2004, vol. 61/62, p. 281-295.

MONTAGNINI, F. y JORDAN, C.F. Reciclaje de nutrientes. Capítulo 8. En: Ecología y Conservación de Bosques Neotropicales. Cartago, Costa Rica : Guariguata, M. y Katan; H. [eds.], 2002, p. 167-192.

MONTAGNINI, F.. y JORDAN, C.F y MATTA MACHADO. Nutrient cycling and nutrient use efficiency in agroforestry system. En: The silvicultural basis for agroforestry system. Boca Ratón, USA : Ashot, M. and Montagnini, F. (Eds.), 2000, p. 131-160.

MUOGHALU, J. I. Contributions of Throughfall, Stemflow and Litterfal To Nutrient Cycling in a Secondary Lowland Rain Forest in ile - ife Nigeria. En: Journal of Tropical Forest Science, 2003, vol. 15, no. 3, p. 399-410.

NILSSON, L.O., et al. Nutrient uptake and cycling in forest ecosystems-present status and future research directions. En: Plant and soil, 1995, vol. 168-169, p. 5-13.

O'CONNELL, A. y SANKARAN, K. V. 1997. Organic Matter Accretion, decomposition and mineralisation. Management of Soil, Nutrients and Water in Tropical Plantation Forests. Australian Centre for International Agricultural Research. Canberra : Sadanandan, E. y Brown, A. [eds.], 1997, p. 443-480.

ODUM, E.P. Ecología. Compañía Editora Continental, 1965. 210 p.

ONG, C., *et al.* Tree-crop interactions: manipulation of water use and root function. En: Agricultural Water Management, 2002, vol. 53, no. 1 – 3, p. 171 - 186.

ORGANIZACIÓN DE LAS NACIONES UNIDAS PARA LA AGRICULTURA Y LA ALIMENTACIÓN. Manual de Prácticas Integradas de Manejo y Conservación de Suelos. FAO, 2000, vol. 8. 220 p.

PALM, C. A. Contribution of agroforestry trees to nutrient requirements of intercropped plants. En: Agroforestry Systems , 1995, no. 30, p. 105-124.

PALM, C. A. y SÁNCHEZ, P. A. Decomposition and nutrient release of the leaves of three tropical legumes. En: Biotrópica, 1990, vol. 22, p. 330-338.

PARKER, G. G. Throughfall and Stemflow in The Forest Nutrient Cycle. En: Advances In Ecological Research, 1983, no. 13, p. 57-135.

PRICE, N. W. A comparison of water balance components in natural and plantation forest in the Salvador, Central America. En: Turrialba : 1982, vol. 32, no. 4, p. 398 - 416.

PROCTOR, J. Rainforest mineral nutrition: the “black box” and a glimpse inside it. En: BONNELL, M. y BRUJNZEEL, L.A. Forest, water and people in the humid tropics: past, presents and future hydrological research for integrated land and water management, 2005, p. 422-446.

PUTUHENA, W. y CORDERY, I. Estimation of interception capacity of the forest floor. En: Journal of hydrology, 1996, vol. 180, p. 283 – 299.

RANGER, J.; MÁRQUES, R. y JUSSY, J. H. Forest soil dynamic during stand development assessed by lisimeter and centrifuge solutions. En: Forest Ecology and Management, 2001, no. 144, p. 129 – 145.

RÍOS, Ney, *et al.* Escorrentía superficial e infiltración en sistemas ganaderos convencionales y silvopastoriles en el trópico subhúmedo de Nicaragua y Costa Rica. En: Agroforestería en las Américas, 2007, no. 45, p. 66-71.

RIVERA PEÑA, Mariela. Determinación de la dinámica del agua en el sistema agroforestal quesungual e identificación de factores suelo-planta para el mejoramiento de la productividad del agua en los cultivos. Trabajo de tesis de

Doctorado. Palmira : Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Ciencias Agrarias énfasis en Suelos, 2008. 306 p.

ROMERO LÓPEZ, Siyyid Alí. 2006. Aporte de biomasa y reciclaje de nutrientes en seis sistemas agroforestales de café (*Coffea arabica* var. *Caturra*), con tres niveles de manejo. Tesis Magister Scientiae en Agroforestería Tropical. Turrialba, Costa Rica.: Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza, CATIE. Programa de Educación para el Desarrollo y la Educación, 2006. 109 p. Disponible en: ([orton.catie.ac.cr/repdoc/A0989e/A0989e.pdf](http://orton.catie.ac.cr/repdoc/A0989e/A0989e.pdf))

SALAS DE LAS, G. y GARCÍA, O. C. Balance hídrico bajo tres coberturas vegetales contrastantes en la Cuenca del río San Cristóbal, Bogotá. En: Revista Académica Colombiana Científica, 2000, vol. 24, no. 91, p. 205-218.

SCHROTH, G., *et al.* Nutrient fluxes in rainfall, throughfall and stemflow in tree – based land use systems and spontaneous tree vegetation of Central Amazoni. En: Agriculture, ecosystems and environmental, 2001, vol. 87, p. 37-49.

SCHROTH, G. y SINCLAIR, F. L. Impacts of tree on the fertility of agricultural soils. En: Trees crops and soil fertility. Schroth, G. and. Sinclair, F. L. [eds.] 2003, p. 1-11.

SHEPHERD, D. y MONTAGNINI, F. Acumulación de carbono en plantaciones mixta y pura en el Trópico húmedo. En: Semana Científica CATIE, 1999, vol. 4, p. 345-349.

SOLLINS, P. Factors affecting nutrients cycling in tropical soil., En: Mineral Nutrients in tropical forest and Savanna Ecosystems. Boston: Proctor J. (Ed.), 1989, p. 477.

SUÁREZ DE, C. F. y RODRÍGUEZ, F. Movimiento del agua en el suelo; estudio en lisímetros monolíticos. En: Boletín Técnico CENICAFÉ, 1958, vol. 2, no. 19, p. 1-40.

SUÁREZ, S. La materia orgánica en la nutrición del café y el mejoramiento de los suelos de la zona cafetera. En: Avances técnicos CENICAFÉ, 2001, no. 283, p. 1-8.

SUNDARAPANDIAN, S. M. y SWAMY, P. S. Litter production and leaf-litter decomposition of selected tree species in tropical forests at Kodayar in the Western Ghats, India. En: Forest Ecology and Management , 1999, no.123, p. 231 - 244.

TOBÓN MARÍN, C., BOUTEN, I.W. y DEKKER, S. Forest floor water dynamics and root water uptake in four forest ecosystems in northwest Amazonia. En: Journal of Hydrology, 2000, no. 237, p. 169-183.

TOBÓN, C. Monitoring and modelling hydrological fluxes in support of nutrient cycling studies in Amazonian Rain Forest Ecosystem. Wageningen: The Tropenbos Foundation, 1999. 169 p.

TROJER, H. Distribución y características de la precipitación en un cafetal bajo sombrío. En: Avances Técnicos CENICAFÉ, 1955, vol. 6, no. 67, p. 256-264.

UNESCO e INSTITUTO DE HIDROLOGÍA ESPAÑA. Métodos de Cálculo del Balance Hídrico. Guía Internacional de Investigación y Métodos. Madrid : Sokolov, A. A. y Chapman, T. C. [eds.] Versión española: Heras, Rafael, 1981. 191 p.

URREGO, J. B. y FARFÁN, F. Aportes de hojarasca en cafetales con sombrío de especies forestales. En: CENICAFÉ, Agosto de 2002. Informe de investigación No 188, p. 1-15.

VENEKLAAS, E. 1990. Rainfall interception and above ground nutrient fluxes in Colombian montane tropical rain forest. Utrecht : University of Utrecht, 1990. 110 p.

VITOUSEK, P. M. y SANFORD, R. L. Nutrient Cycling in Moist Tropical Forest. En: Ecology Systems, 1986, vol. 17, p. 137-167.

WALLACE, J. S. y YOUNG, A. y ONG, C. K. The potencial of agroforestry for sustainable land and water management. En: BONNELL, M. y BRUIJNZEEL, L.A. Forest, water and people in the humid tropics: past, present and future hydrological research for integrated land and water management, 2005, p. 652-670.

WALSH, R. P. Microclimate and hydrology. En: The Tropical rain forest and ecological study. United Kingdom: Richards, P.W (Ed.), 1996, 552 p.