

**Validación de una sonda de lixiviación como  
método para determinar la fertilidad del suelo  
en el cultivo de café (*Coffea arabica*), en la  
Escuela Agrícola Panamericana (EAP),  
Honduras**

**Jorge Luis Gurdían Torrez**

**Zamorano, Honduras**

Diciembre, 2010

ZAMORANO  
CARRERA DE CIENCIA Y PRODUCCIÓN AGROPECUARIA

**Validación de una sonda de lixiviación como  
método para determinar la fertilidad del suelo  
en el cultivo de café (*Coffea arabica*), en la  
Escuela Agrícola Panamericana (EAP),  
Honduras**

Proyecto especial presentado como requisito parcial para optar  
al título de Ingeniero Agrónomo en el Grado  
Académico de Licenciatura

Presentado por

**Jorge Luis Gurdián Torrez**

**Zamorano, Honduras**

Diciembre, 2010

**Validación de una sonda de lixiviación como  
método para determinar la fertilidad del suelo  
en el cultivo de café (*Coffea arabica*), en la  
Escuela Agrícola Panamericana (EAP),  
Honduras**

Presentado por:

Jorge Luis Gurdían Torrez

Aprobado:

---

Gloria Arévalo de Gauggel, M.Sc.  
Asesora principal

---

Abel Gernat, Ph.D.  
Director la Carrera de Ciencia y  
Producción Agropecuaria

---

Carlos Gauggel, Ph.D.  
Asesor

---

Raúl Espinal, Ph.D.  
Decano Académico

---

Nils Berger, Dr.sc.agr.  
Asesor

---

Kenneth L. Hoadley, D.B.A.  
Rector

---

Abelino Pitty, Ph.D.  
Coordinador Área de Fitotecnia

## RESUMEN

Gurdián, J. 2010. Validación de una sonda de lixiviación como método para determinar la fertilidad del suelo en el cultivo de café (*Coffea arabica*), en la Escuela Agrícola Panamericana (EAP), Honduras. Proyecto especial de graduación del programa de Ingeniería Agronómica, Escuela Agrícola Panamericana, Zamorano. Honduras. 25 P.

La firma CISA Agro de Nicaragua, la cual es proveedora de insumos agrícolas, está interesada en desarrollar un método rápido para evaluar la fertilidad del suelo y tomar acciones sobre ella. Cuentan con fincas cafetaleras piloto ubicadas en Matagalpa y Jinotega, la zona cafetalera de Nicaragua, donde se ha iniciado la aplicación de un método y usando una sonda de lixiviación diseñada por la CISA Agro. A partir de esta iniciativa se propuso esta investigación que tuvo como objetivo validar la sonda de lixiviación como método para determinar la fertilidad del suelo en el cultivo de café. El estudio se realizó entre el 10 de julio y el 20 de septiembre de 2010, en un cultivo de café de la EAP, en un suelo arcillo arenoso. Se establecieron dos tratamientos: primera dosis de fertilizante (Urea= 47.18 g/planta, DAP= 11.17 g/planta, KCl= 31.06 g/planta y K-MAG= 7.91 g/planta) y segunda dosis de fertilizante (Urea=94.49 g/planta, DAP= 22.34 g/planta, KCl= 62.13 g/planta y K-MAG =15.81 g/planta). Se instalaron dos tipos de sondas: una sonda de succión y una sonda de lixiviación. Las sondas se enterraron debajo de la gotera del árbol, manteniendo la distancia donde terminan las raíces y el bulbo húmedo, para obtener la solución de suelo. La sonda de succión se instaló a 20 cm de profundidad de forma vertical, y la sonda de lixiviación se instaló debajo de la sonda de succión a 50 cm de profundidad de forma horizontal. Se tomaron muestras de suelos, foliares, de la sonda de succión, y de la sonda de lixiviación, que fueron analizadas en el laboratorio de suelos de la EAP. Se compararon los métodos de muestreo y se determinó la regresión entre el método de lixiviación con los otros tres métodos de muestreo. Se establecieron rangos óptimos en la sonda de lixiviación solamente: N entre 6.5 mg/L y 7.8 mg/L, P entre 0.05 mg/L y 0.08 mg/L, K entre 7.5 mg/L y 9.7 mg/L, Ca entre 7 mg/L y 8 mg/L, Mg entre 2 mg/L y 2.5 mg/L, Mn entre 0.5 mg/L y 1.3 mg/L, Fe entre 0.4 mg/L y 1.2 mg/L y Zn entre 1 mg/L y 1.8 mg/L.

**Palabras clave:** *Coffea robusta*, fertilización, lisímetros de succión, muestreo.

## CONTENIDO

Portadilla .....	i
Página de firmas .....	ii
Resumen .....	iii
Contenido .....	iv
Índice de cuadros, figuras y anexos.....	v
<b>1. INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>1</b>
<b>2. MATERIALES Y MÉTODOS.....</b>	<b>3</b>
<b>3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....</b>	<b>9</b>
<b>4. CONCLUSIONES .....</b>	<b>18</b>
<b>5. RECOMENDACIONES .....</b>	<b>19</b>
<b>6. LITERATURA CITADA.....</b>	<b>20</b>
<b>7. ANEXOS .....</b>	<b>22</b>

## ÍNDICE DE CUADROS, FIGURAS Y ANEXOS

Cuadro	Página
1. Fertilización recomendada para café ( <i>Coffea arabica</i> ) en la EAP según el análisis de suelo (Anexo 1) y las ecuaciones de Matiello et al 2002, para una producción equivalente a 47 qq/ha.....	6
2. Recomendación de fertilizante para aplicar en el café ( <i>Coffea arabica</i> ) en la EAP según el análisis de suelo.....	6
3. Tratamientos que se aplicaron en el estudio para 8 unidades experimentales.....	8
4. Concentración de nutrientes en cuatro tipos de métodos de muestreo para determinar fertilidad del suelo en el cultivo de café ( <i>Coffea arabica</i> ) en la EAP, Honduras.....	9
5. Índices de regresión ( $R^2$ ) usando los elementos obtenidos por lixiviación como variable independiente y dependiente al compararlos contra los métodos de suelo y foliar.....	10
6. Rangos óptimos para la concentración de nutrientes en lixiviados verticales.....	11
7. Correlación de nitrógeno en cuatro métodos de muestreo para determinar la aplicación de fertilizantes.....	16
8. Correlación de fosforo en cuatro métodos de muestreo para determinar la aplicación de fertilizantes.....	17
9. Correlación de potasio en cuatro métodos de muestreo para determinar la aplicación de fertilizantes.....	17
Figura	Página
1. Sonda de lixiviación elaborada por el autor. ....	4
2. Regresión de la concentración de N (%) foliar y la concentración de N (mg/L) lixiviado.....	12
3. Regresión de la concentración de P (%) foliar y la concentración de P (mg/L) lixiviado.....	12
4. Regresión de la concentración de K (%) foliar y la concentración de K (mg/L) lixiviado.....	13
5. Regresión de la concentración de Ca (%) foliar y la concentración de Ca (mg/L) lixiviado.....	14

6. Regresión de la concentración de Mg (%) foliar y la concentración de Mg (mg/L) lixiviado.....	14
7. Regresión de la concentración de Fe (mg/kg) foliar y la concentración de Fe (mg/L) lixiviado.....	15
8. Regresión de la concentración de Mn (mg/kg) foliar y la concentración de Mn(mg/L) lixiviado.....	15
9. Regresión de la concentración de Zn (mg/kg) foliar y la concentración de Zn (mg/L) lixiviado.....	16

## Anexos

## Página

1. Contenido de nutrientes según el análisis de suelo hecho en el lote de café en la EAP el 13/04/2010.....	22
2. Contenido de nutrientes según el análisis de suelo hecho en el lote de café en la EAP el 30/09/2010.....	22
3. Cuadro de ecuaciones cúbicas obtenidas del programa MINITAB para las regresiones de la concentración de nutrientes entre los métodos de suelo y foliar..	23
4. Cuadro de ecuaciones cúbicas obtenidas del programa MINITAB para las regresiones de la concentración de nutrientes entre los métodos de suelo y sonda de succión.....	23
5. Cuadro de ecuaciones cúbicas obtenidas del programa MINITAB para las regresiones de la concentración de nutrientes entre los métodos de sonda de succión y sonda de lixiviación.....	24
6. Cuadro de ecuaciones cúbicas obtenidas del programa MINITAB para las regresiones de la concentración de nutrientes entre los métodos foliares y sonda de lixiviación.....	24
7. Sonda de succión elaborada por Irrometer Co.....	25
8. Bomba de succión manual utilizada en el estudio elaborado por Irrometer Co.....	25
9. Sonda de lixiviación elaborada por el autor.....	25

## 1. INTRODUCCIÓN

El estudio de la composición química de la solución del suelo requiere del conocimiento de las diferentes formas del agua en el suelo que se diferencian por la tensión o fuerza con la que se retienen en el mismo: agua gravitacional, higroscópica y capilar. La primera es el agua libre del suelo ya que la fuerza de retención es menor que la fuerza de la gravedad por lo que se drena fácilmente. El agua higroscópica rodea las partículas coloidales del suelo y no es disponible para la planta. Los minerales arcillosos influyen sobre el agua higroscópica al igual que el tipo de iones adsorbidos, que ocurren en el complejo de intercambio catiónico, siendo éste mayor para iones bivalentes que para monovalentes. El agua capilar llena los poros que ocurren entre agregados y forma meniscos en la superficie de los mismos; es disponible para la planta. Esto ha llevado a la utilización de técnicas de presiones diferenciales para la recolección y el análisis químico del agua del suelo (Fassbender 1975).

En el comportamiento químico de los suelos y en la nutrición vegetal es de interés la composición del agua del suelo y su contenido con diferentes elementos nutritivos, pues las plantas en crecimiento toman los nutrientes de la solución del suelo. Esta se encuentra en equilibrio con la fase sólida y gaseosa, y su análisis indica, hasta cierto grado, la disponibilidad de nutrimentos para la planta (Fassbender 1975). La concentración total de los elementos nutritivos es pequeña y comúnmente están presentes en la solución de suelo como iones y cationes:  $H^+$  (20 mg/L),  $Na^+$  (5 mg/L),  $K^+$  (0.1 mg/L),  $NH_4^+$  (15 mg/L),  $Ca^{2+}$  (5.5 mg/L),  $Mg^{2+}$  (3.7 mg/L),  $Al^{3+}$  (15 mg/L),  $SO_4^{2-}$  (0.15%),  $NO_3^-$  (23 mg/L),  $HPO_4^{2-}$  (0.5 mg/L),  $CO_3^{2-}$  (0.2%); además se presentan en menores concentraciones  $Fe^{3+}$  (0.6 mg/L),  $Zn^{2+}$  (2.0 mg/L),  $Cu^{2+}$  (0.2 mg/L), y  $SiO_4^{2-}$  (0.5%) (Barber 1995).

El estudio de las soluciones de suelo permite establecer el índice de demanda de nutrientes básicos, de manera que su aporte en la solución fertilizante y el contenido en la solución de suelo a diferentes profundidades sugiere una tendencia de la demanda y disponibilidad de estos nutrientes y una idea bastante aproximada del índice de disponibilidad y de lixiviación de un determinado tipo de fertilizante (Alonso *et al.* 2006).

La evaluación continua de la dinámica de iones en el perfil del suelo se lleva a cabo mediante el análisis y estudio de las soluciones de suelos extraídas con sondas de succión a varias profundidades del perfil radicular. Si a la dinámica de iones se agrega su relación con la composición química de la acumulación de nutrientes en hojas y frutos, se puede conocer (Mattar y Pizarro 2007):

- Las necesidades de nutrientes y agua de la planta en cada momento y a lo largo del ciclo.

- La solución fertilizante más adecuada a aportar en cada estadio del ciclo para cada sistema suelo-planta-agua.
- Los coadyuvantes y las formas químicas de elementos más adecuados a utilizar en cada perfil edáfico para asegurar la mejor disponibilidad iónica de nutrientes. La forma de evitar y superar antagonismos y desequilibrios nutricionales
- Lo que la planta no aprovecha (solución de drenaje o lixiviado), minimizando así el impacto ambiental.

Las sondas de succión son típicamente utilizadas para obtener muestras para la determinación de la concentración de nitratos, de la conductividad eléctrica de los niveles de salinidad en la solución de suelo. El uso de las sondas de succión para medir el pH de la solución de suelo es limitado. En la práctica, una bomba de vacío de una longitud de 30 cm es utilizada y para crear el vacío en la sonda de succión y así recolectar la solución de suelo. Las sondas de lixiviación recolectan el agua que es drenada a través del perfil del suelo, agua gravitacional, que contiene el exceso de nutrientes en el suelo (Irrometer Co. US 2005).

A partir del análisis de soluciones de suelo se obtiene la siguiente información (Mattar y Pizarro 2007):

- En forma independiente la disponibilidad de cada elemento químico.
- En forma global la existencia de sinergias y antagonismos de los nutrientes, y la información sobre el gradiente hídrico en el suelo.
- La dinámica y el tránsito de iones, como estos son absorbidos, en qué medida y forma iónica, la reacción redox, la disponibilidad fisiológica del agua y la ocurrencia de precipitaciones, movilizaciones e intercambios iónicos.

La solución del suelo es aquella que se encuentra en contacto con las raíces de las plantas por períodos prolongados de tiempo. La utilización de las sondas para medir la concentración de nutrientes es un método relativamente poco desarrollado. Las sondas de succión reflejan mejor que las sondas de lixiviación la composición de la solución del suelo, especialmente en lo que respecta a calcio, potasio, magnesio y sodio. La solución extraída con sondas de succión es más concentrada en los iones sodio, calcio y magnesio y más pobre en potasio. El nitrógeno presenta un comportamiento errático, aunque con tendencia a estar más concentrado en la zona de las sondas de succión. No se conoce el comportamiento de otros elementos como el fósforo, cloruros y bicarbonatos (Calderón 2000). Los nutrientes que se aplican al suelo no siempre llegan a las plantas, así que no se aplica lo que en realidad se está esperando en el programa de fertilización (Castellanos Oseguera 2008).

El estudio se llevó a cabo con el fin de validar una sonda de lixiviación como método para determinar la fertilidad del suelo en el cultivo de café (*Coffea arabica*), en la EAP, Honduras, comparándola con una sonda de succión. Adicionalmente se pretendió establecer la relación entre los nutrientes encontrados en las sonda de lixiviación con la nutrición de la planta, y establecer los rangos óptimos de nutrientes de importancia en el cultivo de café.

## **2. MATERIALES Y MÉTODOS**

### **2.1 ÉPOCA Y UBICACIÓN DEL EXPERIMENTO**

El experimento se llevó a cabo del 10 de julio al 20 de septiembre de 2010 en la Escuela Agrícola Panamericana (EAP), localizada en el Valle del Yeguaré, Zamorano, 32 km al Sureste de Tegucigalpa, a 14°N y 87°O, a una altura de 800 msnm con una precipitación anual promedio de 1100 mm y una temperatura anual promedio de 24°C. En la región se presentan dos estaciones bien marcadas, una lluviosa de junio a noviembre y otra seca de diciembre a mayo (Ordoñez y Soto 2007). El estudio se realizó en un cultivo de café (*Coffea arabica*) de la EAP, que está ubicado en el lado Este de los salones de ciencias básicas, en un suelo arcillo arenoso.

### **2.2 MANEJO DEL CULTIVO**

El cultivo de café (*Coffea arabica*) en la EAP tiene más de cuarenta años de haber sido sembrado, siendo una mezcla de variedades que se desconocen. En esta plantación no se aplica riego. Hace dos años se comenzó un sistema de podas y recepas para tratar de inducir al cultivo que rebrote con vigor. La recepa o paloteo es una poda intensa que se hace para que las ramas que se dejan en la planta rebroten con hojas nuevas y mayor vigor para obtener una mayor o mejor producción.

### **2.3 SELECCIÓN DE PLANTAS**

La mitad de la plantación de café en la EAP se podó este año y no está en producción. La otra mitad se podó en el 2009 en hileras alternas de plantas, las cuales se utilizaron para este estudio. Se escogieron plantas homogéneas con las siguientes características: tamaño de la planta, uniformidad del follaje y granos, y plantas sin manifestaciones de deficiencias nutricionales ni enfermedades. Las plantas seleccionadas estaban alejadas de las orillas del lote para evitar cualquier interferencia de factores ajenos al cultivo y al estudio.

### **2.4 SOLUCIÓN DEL SUELO**

La recolección de la solución de suelo se hizo por medio de dos tipos de sondas: una sonda de succión fabricada de forma industrial en el 2005 por Irrometer Co. y otra sonda de lixiviación diseñada para tal fin por el autor.

## 1. Sonda de succión

La sonda de succión (Anexo 7) es un instrumento que trabaja con presión negativa para succionar la solución del suelo. La primera porción de la sonda está hecha de porcelana porosa que permite el paso del agua del suelo a la sonda; esta parte es la que está más profunda en el suelo. Una segunda porción consiste en un cilindro de vidrio hueco, completamente impermeable, que permite el almacenamiento de la solución del suelo extraída con presión negativa. Para ejercer esta presión negativa, el final de la porción de vidrio esta sellado con un tapón de hule, el cual está atravesado por una manguera de plástico. A esta manguera se le ejerce presión negativa de 0.1 kPa a 0.3 kPa, con una bomba manual para tensiómetros (Anexo 8), para succionar el aire dentro de la sonda de succión y establecer una continuidad del agua libre del suelo hacia la sonda. Para mantener este estado de presión dentro de la sonda, se pone un “clip” al final de la manguera que no permite la entrada de aire.

## 2. Sonda de lixiviación

La sonda de lixiviación (Anexo 9) es fabricada con un tubo, tapón, y reductor, todos de PVC, manguera de hule, tela de fibra de vidrio verde, botella de plástico de 2 L, y dos tipos de pegamentos para PVC y Epoxi-Mil. El tubo de PVC es de 50 cm de largo y 5.08 cm de diámetro, en el cual 30 cm de longitud en un costado está perforado a la mitad del diámetro y recubierto por una tela de fibra de vidrio verde (Figura 1). Un extremo el tubo de PVC es sellado por un tapón de PVC de 5.08 cm, y al otro extremo está un reductor de PVC que disminuye el diámetro de 5.08 cm a 1.91 cm. En el orificio del reductor se instaló una manguera de hule de 30.48 cm de longitud que conduce el agua drenada del tubo de PVC hacia un recipiente plástico para almacenarla. El recipiente fue una botella de plástico de 2 L, en la que se recolectó el agua y los lixiviados del suelo.



Figura 1. Sonda de lixiviación elaborada por el autor.

## 2.5 INSTALACIÓN DE LAS SONDAS

Las sondas se enterraron debajo de la gotera de los árboles donde se aplicaron los fertilizantes, manteniendo la distancia donde terminan las raíces y el bulbo húmedo, para obtener la solución de suelo. La sonda de succión se instaló a 20 cm de profundidad de forma vertical. La sonda de lixiviación se instaló debajo de la sonda de succión a 50 cm de profundidad de forma horizontal, dejando la parte perforada del tubo de PVC hacia arriba y así permitir que los lixiviados entren directamente al tubo y luego hacia la botella de plástico, la cual fue instalada debajo de la sonda de lixiviación

## 2.6 FERTILIZACIÓN

La mejor forma de fertilizar el cultivo de café es según su estado fisiológico y se divide en cuatro etapas en el año: al florear, cuando la planta fructifica, cuando el fruto alcanza su tamaño final y cuando el fruto empieza a madurar. Para las condiciones de Zamorano la primera aplicación se hace en mayo esperando las primeras lluvias del año cuando se aplica 11% de la fertilización, la segunda es en junio cuando se aplica 19%, la tercera a mediados de julio con 37% y en la última se aplica en septiembre el 33% de la dosis restante.

En café se debe fertilizar en función de la cantidad producida por hectárea y lo que extrae la planta para su mantenimiento. Como de referencia se puede usar un estudio hecho en Brasil para 1000 plantas el cual indicó que las aplicaciones de N, P, K, y S se deben hacer basadas en las siguientes ecuaciones en g/planta: Nitrógeno =  $70 + 2.7x$ , Fósforo =  $6.2 + 0.3x$ , Potasio =  $47 + 3.4x$  y Azufre =  $3.9 + 0.32x$  donde  $x$  es el estimado de producción en sacos de 60 kg de café pergamino (Matiello *et al.* 2002). Las ecuaciones de Matiello *et al.* (2002) y los resultados para la fertilización en café se usaron para comparación y referencia para la fertilización recomendada de la EAP (Cuadro 1).

Los métodos estándares para formular recomendaciones nutricionales del Laboratorio de Suelos de la EAP se basan en las publicaciones de Baber (1995) y Urrestarazu (2004), y el contenido de nutrientes determinado en el análisis de suelo (Anexo 1). Debido a las lluvias que se han presentado desde el comienzo del año de 2010 en Zamorano, las primeras dos fertilizaciones en cultivo de café se hicieron al mismo tiempo y las demás siguieron el patrón normal. El espaciamiento entre las plantas en este cultivo de café es de  $2\text{ m} \times 1.5\text{ m}$ , que equivale a una densidad de 3,333 plantas/ha. La fertilización se hizo con los fertilizantes disponibles en la unidad de frutales de la EAP (Cuadro 2).

Cuadro 1. Fertilización recomendada para el café (*Coffea arabica*) en la EAP según el análisis de suelo (Anexo 1) y las ecuaciones de Matiello *et al.* (2002), para una producción equivalente a 47 qq/ha.

Nutrientes	Según el análisis de suelo hecho en Zamorano (kg/ha)	Según la ecuación de Matiello <i>et al.</i> (2002) (kg/ha)
N	330.2	220
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	74.8	32
K <sub>2</sub> O	335.8	200
SO <sub>4</sub> <sup>3-</sup>	24.5	35.5

Cuadro 2. Recomendación de fertilizante para aplicar en el café (*Coffea arabica*) en la EAP según el análisis de suelo.

Fertilizantes comerciales	Fórmula N-P-K-Ca-Mg-S	Dosis kg/ha	Dosis (kg/ha) fraccionado		
			Mayo	Julio	Septiembre
Urea	46-0-0	717.82	215.35	265.59	236.88
DAP	18-46-0	162.61	48.78	60.16	53.66
KCl	0-0-60	559.67	167.9	207.08	184.69
K-MAG	0-0-22-0-18-22	111.36	33.41	41.20	36.75

## 2.7 RECOLECCIÓN DEL MATERIAL

Las recolecciones de las soluciones de suelo en las sondas de lixiviación se hicieron 70 días después de la fertilización. Las sondas de succión se recogieron durante 60 días, dos veces por semana cada tres días, después de la fertilización. Se tomó una muestra foliar compuesta y una muestra de suelo compuesta antes de la fertilización. Las muestras foliares compuestas por cada unidad experimental se tomaron a los 60 días después de la fertilización. Las muestras de suelo, por cada unidad experimental, se recolectaron a los 60 días después de la fertilización.

## 2.8 ANÁLISIS DE LAS MUESTRAS

El análisis de las muestras se realizó en el Laboratorio de Suelos de la EAP. Se hicieron análisis de suelo, análisis foliar, y de la solución recogida con los dos tipos de sondas. En los análisis se determinó la concentración de N, P, K, Ca, Mg, Na, Cu, Fe, Mn y Zn.

### **1. Análisis de suelo**

Las bases intercambiables (K, Ca, Mg, Na, Cu, Fe, Mn y Zn) se extrajeron con la solución extractora Mehlich III y su concentración se determinó por Absorción Atómica. El N del suelo se estimó como el 5% del contenido total de la materia orgánica. El P fue extraído con la solución Mehlich III y la concentración de este elemento se determinó por espectrofotometría (Arévalo y Gauggel 2009). La interpretación de las concentraciones de los elementos se hizo comparando con referencias publicadas y obtenidas por medio de investigación (Mills y Jones 1996).

### **2. Análisis Foliar**

Para el análisis foliar se usó la digestión (desintegración) del tejido vegetal con ácido fuerte: *IM* ácido sulfúrico. Primero se secó el tejido en hornos para remover la humedad, seguido por molido y debidamente tamizado. El N se determinó por medio del método de Micro Kjeldhal, P por espectrofotometría y el resto de los elementos por Absorción Atómica (Arévalo y Gauggel 2009). La interpretación de las concentraciones de los elementos se hizo comparando con referencias publicadas y obtenidas por medio de investigación (Landon 1991).

### **3. Análisis de la solución de suelo**

El N se determinó por medio del método de Kjeldhal. Las bases intercambiables y su concentración se determinaron por Absorción Atómica. El P se determinó por colorimetría por el método del ácido cromotrópico usando electrodos para iones específicos y después su concentración se determinó por espectrofotometría (Arévalo y Gauggel 2009). La interpretación de las concentraciones de los diferentes elementos se hizo comparando con referencias publicadas y obtenidas por medio de investigación (Urrestarazu 2004).

## **2.9 TRATAMIENTOS**

Para propiciar diferentes concentraciones de nutrientes en el suelo se establecieron dos tratamientos:

1. Se aplicó el 50% de la cantidad de fertilizantes sugeridos por el análisis de suelo (Cuadro 2).
2. Se aplicó la fórmula de fertilización completa sugerida por el análisis de suelo (Cuadro 2).

Los tratamientos de fertilización usados en este estudio se indican en el cuadro 3 y la fórmula de cada fertilizante se indica en el cuadro 2.

Cuadro 3. Tratamientos que se aplicaron en el estudio para ocho unidades experimentales.

Tratamientos	Fertilizantes aplicado
1	Urea= 47.18 g/planta, DAP= 11.17 g/planta, KCl= 31.06 g/planta y K-MAG= 7.91 g/planta.
2	Urea=94.49 g/planta, DAP= 22.34 g/planta, KCl= 62.13 g/planta y K-MAG= 15.81 g/planta.

## 2.10 DISEÑO EXPERIMENTAL

El diseño experimental fue un BCA (bloques completamente al azar) con dos tratamientos y cuatro repeticiones para un total de ocho unidades experimentales. Cada unidad experimental tenía cuatro árboles de café a los cuales se aplicaron los tratamientos. De estos se tomaron muestras de suelo y de tejido foliar para obtener una muestra compuesta por unidad experimental. Las sondas se instalaron en uno de los cuatro árboles cada una en las plantas del centro.

## 2.11 ANÁLISIS ESTADÍSTICO

Para el análisis estadístico se utilizó un ANOVA, y para la comparación de medias se utilizó el método TUKEY, con una probabilidad de  $< 0.05$ . Se utilizó el paquete estadístico “Statistical Analysis System” (SAS 2009).

## 2.12 ANÁLISIS DE REGRESIÓN Y CORRELACIONES

Después de los análisis químicos de las concentraciones de nutrientes en el suelo, en las hojas, en los lixiviados, y en la sonda de succión se hicieron análisis de regresiones y correlaciones con el programa MINITAB. Los análisis de regresión se hicieron para determinar los rangos óptimos de la concentración de nutrientes de la sonda de lixiviación. Esto se hizo al comparar los rangos óptimos ya conocidos de los análisis de suelo, foliar, y de las sondas de succión.

### 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

#### 3.1 ANÁLISIS DE LAS MUESTRAS

Los análisis de la concentración de nutrientes para cada uno de los cuatro métodos de muestreo no permiten determinar cuál de ellos es el mejor (Cuadro 4). Esto es debido a la dinámica de los elementos en el suelo y en la solución del suelo, tanto que la absorción de nutrientes depende de condiciones ambientales, químicas y físicas del suelo y la concentración de otros elementos. Entre los macronutrientes se nota una tendencia, que los métodos foliar, sonda de succión, y sonda de lixiviación son iguales, pero diferentes al método de suelo. En los micronutrientes el método de sonda de succión no difiere con el de sonda de lixiviación, pero ambos difieren de los métodos de suelos y foliares los cuales también difieren entre sí. Los dos niveles de fertilidad no generaron diferencias de concentración de nutrientes ni en el suelo, foliar, sonda de succión y sonda de lixiviación. Las comparaciones se hicieron para los diferentes métodos, pero para la misma propiedad o elemento determinado.

Cuadro 4. Concentración de nutrientes en cuatro tipos de métodos de muestreo para determinar fertilidad del suelo en el cultivo de café (*Coffea arabica*) en la EAP, Honduras.<sup>1</sup>

Métodos de muestreo	pH	N (%)	P	K	Ca	Mg	Na	Cu	Fe	Mn	Zn
Suelo	5.3 <sup>c</sup>	0.19 <sup>c</sup>	36.3 <sup>a</sup>	369 <sup>a</sup>	1888 <sup>a</sup>	143 <sup>a</sup>	126 <sup>a</sup>	4.5 <sup>b</sup>	344 <sup>a</sup>	176 <sup>a</sup>	20.3 <sup>a</sup>
Foliar	*	3.0 <sup>b</sup>	0.15 <sup>b</sup>	2.2 <sup>b</sup>	0.62 <sup>b</sup>	0.3 <sup>b</sup>	*	10.5 <sup>a</sup>	67.4 <sup>b</sup>	96.3 <sup>b</sup>	11.9 <sup>b</sup>
Lixiviado	6.2 <sup>b</sup>	6.3 <sup>a</sup>	0.06 <sup>b</sup>	7.1 <sup>b</sup>	11.0 <sup>b</sup>	1.5 <sup>b</sup>	1.9 <sup>b</sup>	0.0 <sup>c</sup>	1.8 <sup>c</sup>	1.3 <sup>c</sup>	0.02 <sup>c</sup>
Succión	7.7 <sup>a</sup>	2.6 <sup>b</sup>	1.7 <sup>b</sup>	3.3 <sup>b</sup>	15.8 <sup>b</sup>	2.9 <sup>b</sup>	4.1 <sup>b</sup>	0.0 <sup>c</sup>	0.6 <sup>c</sup>	0.72 <sup>c</sup>	0.0 <sup>c</sup>

<sup>1</sup>Medias en la misma columna con distinta letra difieren significativamente (P<0.05).

\*Dato no analizado.

### 3.2 REGRESIONES

El cuadro 5 muestra un mejor comportamiento de los nutrientes cuando los lixiviados son la variable independiente de las muestras foliares, y son la variable dependiente de las muestras de suelo aunque sean valores de  $R^2$  más bajos. Debido a que las reacciones químicas en el suelo son complejas, los nutrientes se comportan de manera irregular y distinta para las diferentes fases del suelo sólida y soluble. Los mejores valores de  $R^2$  se obtuvieron con el K y Ca en comparación con el análisis foliar y el Zn comparando con el análisis del suelo.

Cuadro 5. Índices de regresión ( $R^2$ ) usando los elementos obtenidos por lixiviación como variable independiente y dependiente al compararlos contra los métodos de suelo y foliar.

Nutrientes	Lixiviado vs Foliar		Lixiviado vs Suelo		Foliar vs Suelo
	Lixiviado X*	Lixiviado Y*	Lixiviado X*	Lixiviado Y*	
N	47	15	53	56	89
P	39	85	40	19	13
K	77	93	39	87	49
Ca	66	45	20	29	77
Mg	35	49	9	19	23
Cu	0	0	0	0	69
Fe	36	35	22	44	29
Mn	27	53	3	3	75
Zn	32	81	74	83	17

\*Donde X es la variable independiente y Y la variable dependiente.

### 3.3 DETERMINACIÓN DE LOS RANGOS ÓPTIMOS PARA LA INTERPRETACIÓN DE ANÁLISIS DE NUTRIENTES EN SONDAS DE LIXIVIACIÓN

De acuerdo al estudio los niveles adecuados de nutrientes que se deben utilizar en las sondas de lixiviación para la determinación de la fertilidad en el cultivo del café son: el nitrógeno  $R^2$  de 46.4%, con rangos entre 6.5 mg/L y 7.8 mg/L. El fósforo presenta rangos bajos entre 0.05 mg/L y 0.08 mg/L, esto no es significativo con un  $R^2$  de 39.2%. El rango mínimo y máximo de potasio es muy adecuado, entre 7.5 mg/L y 9.7 mg/L, con un  $R^2$  adecuado de 77%. El calcio ocurre en los rangos entre 7 mg/L y 8 mg/L, y muestra un  $R^2$  adecuado de 66.1%. Magnesio tiene un  $R^2$  de 34.9% el cual es bajo, y ocurre entre 2 mg/L y 2.5 mg/L. Al igual que el fósforo, el manganeso y el hierro presentan rangos y un  $R^2$  muy bajos. El manganeso ocurre entre 0.5 mg/L y 1.3 mg/L con un  $R^2$  de 27.9 y el hierro ocurre entre 0.4 mg/L y 1.2 mg/L con un  $R^2$  de 35.8%. El zinc es el elemento que muestra el  $R^2$  más alto de 99.4% entre los rangos de 1 mg/L y 1.8 mg/L (Cuadro 6).

Cuadro 6. Rangos óptimos para la concentración de nutrientes en lixiviados verticales.

Nutrientes	Min (mg/L)	Max (mg/L)	R <sup>2</sup> (%)
N	6.5	7.8	46.4
P	0.05	0.08	39.2
K	7.5	9.7	77
Ca	7	8	66.1
Mg	2	2.5	34.9
Mn	0.5	1.3	27.9
Fe	0.4	1.2	35.8
Zn	1	1.8	99.4

### 3.4 MODELOS DE REGRESIONES

Cada modelo linear de regresión muestra la forma en que se comportó cada nutriente en las fases del suelo, y como la concentración afecta los métodos de determinación de la fertilidad del suelo. La fase soluble es cuando los nutrientes están disponibles y según las gráficas es cuando hay una menor concentración en las muestras de sondas de lixiviación. La concentración de nutrientes en la sonda de lixiviación ocurre cuando hay excesos de agua y nutrientes en el suelo. Síntomas típicos de deficiencias nutricionales en la hoja son un indicativo visual para darnos cuenta de las deficiencias que poseen las plantas. En los modelos de regresión se observa el comportamiento o las tendencias de cada nutriente en el tejido foliar en las diferentes fases que ocurren en el suelo (Figuras 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8 y 9).

La concentración foliar de N decrece hasta alcanzar 5 mg/L luego incrementa alrededor de 7.3 mg/L, nuevamente decrece abruptamente a concentración mayores mostrando un comportamiento errático (Figura 2).

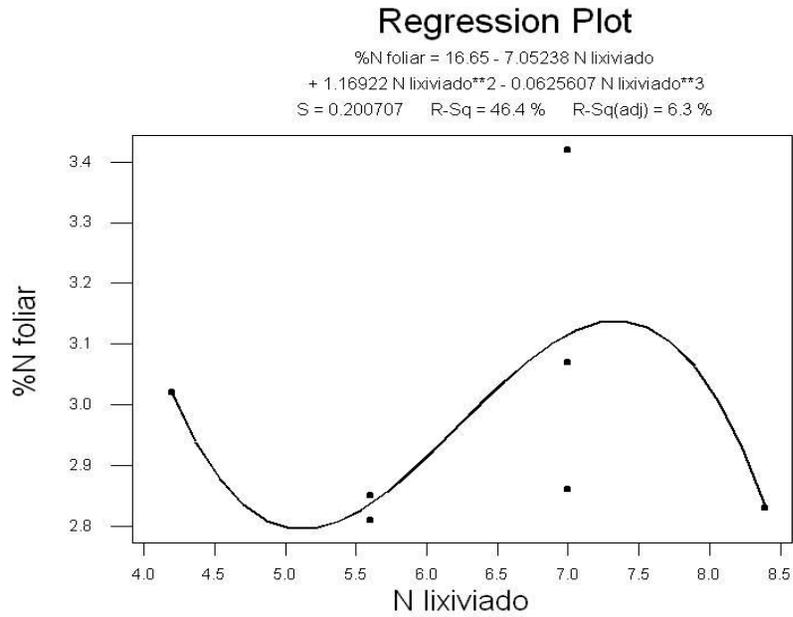


Figura 2. Regresión de la concentración de N (%) foliar y la concentración de N (mg/L) lixiviado.

La concentración de P foliar tiende a decrecer levemente a concentraciones de lixiviaciones bajas incrementando a concentraciones medias y estabilizándose a concentraciones altas debido a la complicitad de sus reacciones en el suelo (Figura 3).

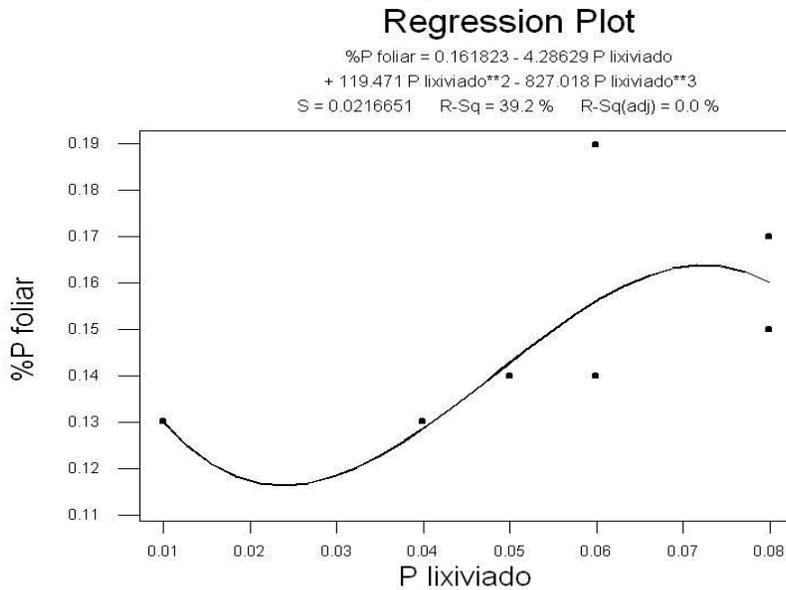


Figura 3. Regresión de la concentración de P (%) foliar y la concentración de P (mg/L) lixiviado.

El K foliar decrece a concentraciones bajas de lixiviados para incrementar abruptamente a una concentración de 9.3 mg/L, y decrece abruptamente a concentraciones altas de lixiviados (Figura 4).

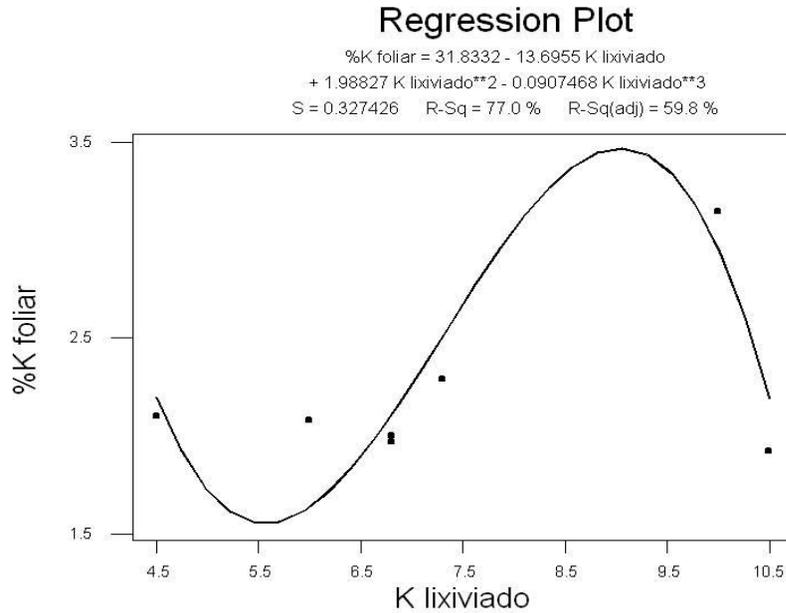


Figura 4. Regresión de la concentración de K (%) foliar y la concentración de K (mg/L) lixiviado.

El Ca foliar decrece a concentraciones medias a medida que incrementa el Ca lixiviado, lo cual es normal dado que este elemento lo asimila la planta por flujo de masa (evapotranspiración) (Figura 5).

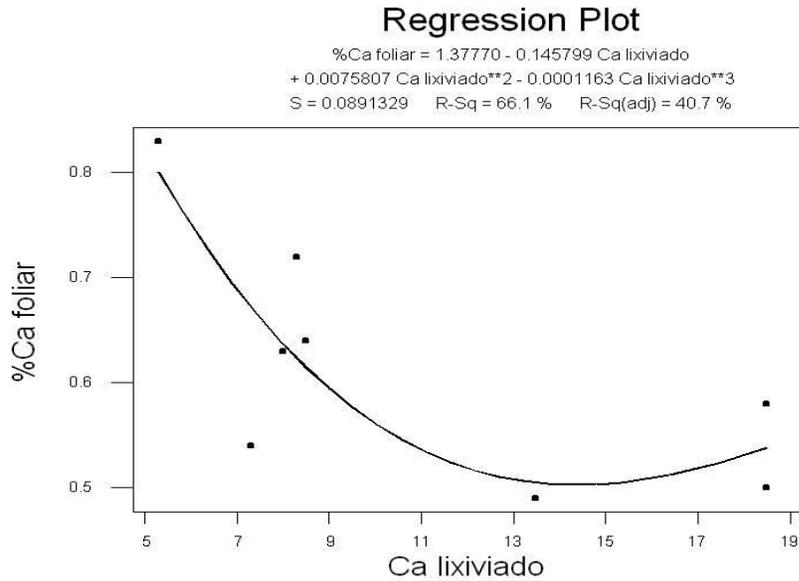


Figura 5. Regresión de la concentración de Ca (%) foliar y la concentración de Ca (mg/L) lixiviado.

El Mg foliar decrece a concentraciones de lixiviados bajas alcanzando un mínimo a 2.0 mg/L incrementando abruptamente a concentraciones altas esto debido al defecto de la capacidad de intercambio catiónico en el suelo (Figura 6).

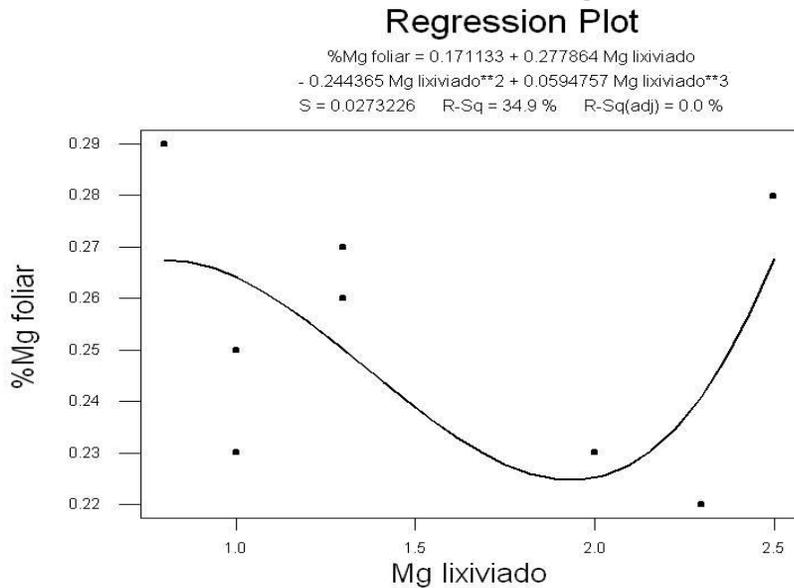


Figura 6. Regresión de la concentración de Mg (%) foliar y la concentración de Mg (mg/L) lixiviado.

La concentración de Fe foliar decrece a concentraciones de lixiviados relativamente bajas y prácticamente se estabiliza a concentraciones mayores probablemente debido a condiciones de reacciones redox para su estabilización (Figura 7).

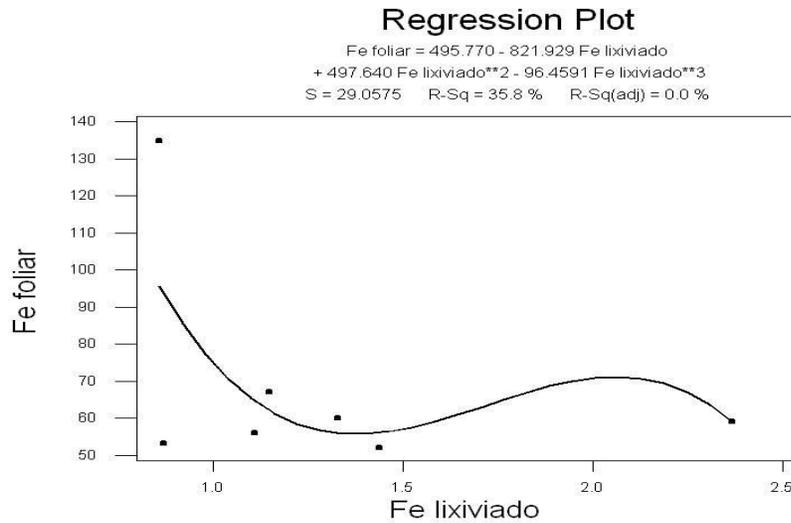


Figura 7. Regresión de la concentración de Fe (mg/kg) foliar y la concentración de Fe (mg/L) lixiviado.

La concentración de Mn foliar presenta el mismo comportamiento que el Fe (Figura 8). Dado que estos dos elementos obedecen a las mismas reacciones químicas en el suelo y en su solución.

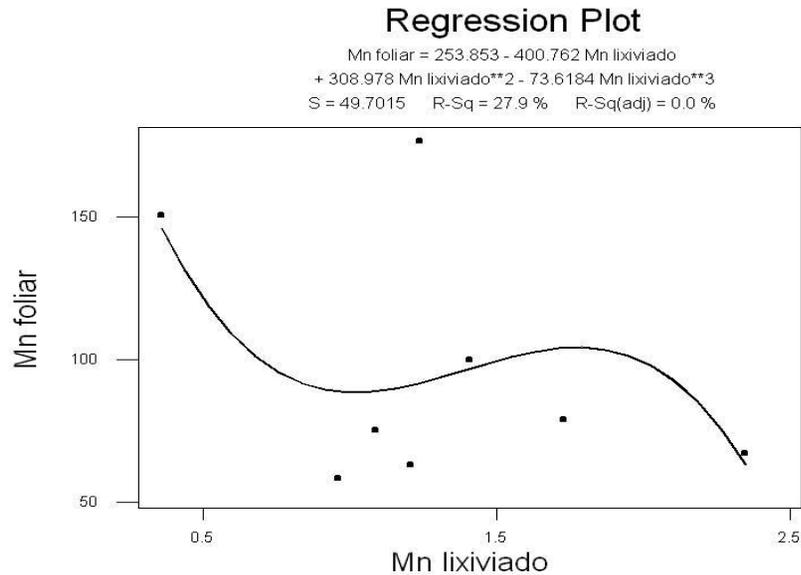


Figura 8. Regresión de la concentración de Mn (mg/kg) foliar y la concentración de Mn (mg/L) lixiviado.

El Zn foliar incrementa con la concentración en el lixiviado (Figura 9).

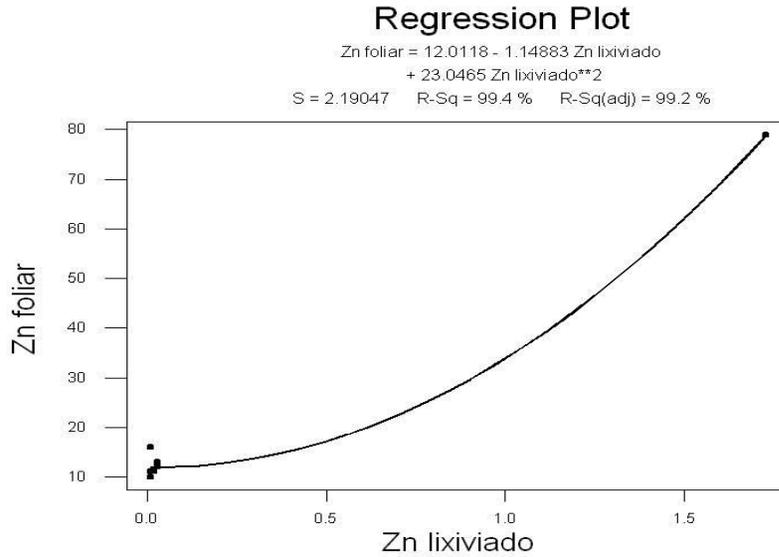


Figura 9. Regresión de la concentración de Zn (mg/kg) foliar y la concentración de Zn (mg/L) lixiviado.

### 3.5 CORRELACIONES

Las correlaciones obtenidas entre los cuatro métodos no presentan una relación directa entre sí. En los cuadros 7, 8 y 9 se muestran las correlaciones que existen entre los cuatro métodos para las concentraciones de N, P y K. La correlación para nitrógeno tiene un  $R^2$  más alto entre los métodos de suelo y foliar, por otro lado, el método de lixiviados no presenta una relación fuerte con ningún otro tipo de muestreo (Cuadro 7).

Cuadro 7. Correlación de nitrógeno en cuatro métodos de muestreo para determinar la aplicación de fertilizantes.

Métodos de muestreo	Suelo	Foliar	Lixiviados	Sonda de Succión
Suelo		0.401	0.229	0.100
		0.324	0.586	0.813
Foliar	0.401		-0.179	-0.169
	0.324		0.672	0.689
Lixiviados	0.229	0.100		
	0.586	0.813		
Sonda de Succión	-0.179	-0.169	0.069	0.069
	0.672	0.689	0.872	0.872

Las correlaciones en la concentración de fósforo tampoco demuestran una relación fuerte, o que sean mayores a 0.7 siendo la más alta de 0.555%, la cual es la relación entre el método de muestreo foliar y el método de muestreo por lixiviados (Cuadro 8).

Cuadro 8. Correlación de fósforo en cuatro métodos de muestreo para determinar la aplicación de fertilizantes.

Métodos de muestreo	Suelo	Foliar	Lixiviados	Sonda de Succión
Suelo		-0.205	0.123	0.555
		0.626	0.771	0.153
Foliar	-0.205		-0.016	0.489
	0.626		0.970	0.219
Lixiviados	0.123	0.555		
	0.771	0.153		
Sonda de Succión	-0.016	0.489	0.242	0.242
	0.970	0.219	0.564	0.564

Para la concentración de potasio no se encontró ningún  $R^2$  mayor a 0.7 entre los cuatro métodos de muestreo. El  $R^2$  más alto es el que presentan el método de muestreo de la sonda de succión y el método de muestreo de lixiviados (Cuadro 9).

Cuadro 9. Correlación de potasio en cuatro métodos de muestreo para determinar la aplicación de fertilizantes.

Métodos de muestreo	Suelo	Foliar	Lixiviados	Sonda de Succión
Suelo		0.270	0.560	0.565
		0.518	0.149	0.145
Foliar	0.270		0.270	0.437
	0.518		0.518	0.279
Lixiviados	0.560	0.565		
	0.149	0.145		
Sonda de Succión	0.270	0.437	0.687	0.687
	0.518	0.279	0.060	0.060

## 4. CONCLUSIONES

- Los nutrientes en forma disponible no se encuentran estables en las fases sólidas y solubles del suelo, y sus concentraciones en los cuatro métodos de muestreo van a cambiar según el nutriente que se determine.
- Una separación de medias según la concentración de nutrientes para los cuatro métodos de muestreo, no determinó si el muestreo de lixiviados es confiable para utilizarse como referencia para elaborar una dosis de aplicación de fertilizantes para un elemento dado.
- Los tratamientos no fueron eficaces para proporcionarle una concentración diferente de nutrientes al suelo para obtener una separación de medias entre tratamientos, por lo que solo se fertilizó una vez en los dos tratamientos.
- Las concentraciones de nutrientes en la sonda de lixiviación tuvieron relación con el suelo para los elementos K y Zn con  $R^2$  con más del 80% y para el N con un  $R^2$  de 56%. Las concentraciones de nutrientes en las muestras foliares tuvieron relación con el suelo para P, K y Zn con un  $R^2$  mayor a 80% y para Mg y Ca mayores a 45%.
- El Ca se absorbe limitadamente, y se lixivian en pocas cantidades. El Zn es absorbido por la planta y la concentración en el suelo estudiado es alta.
- Los elementos que se determinan con sonda de succión son más solubles y se lixivian.
- Todos los datos indican que la sonda de lixiviación es el método menos confiable para determinar la fertilidad del suelo y la nutrición de la planta bajo las condiciones en que se realizó este estudio.
- Las correlaciones tuvieron los mismos resultados que las regresiones al presentar un  $R^2$  por debajo de 0.7, demostrando que estos modelos no explican el comportamiento de los nutrientes en los cuatro métodos de muestreo usados.
- Basado en este estudio se pudieron establecer rangos de concentración de nutrientes en la sonda de lixiviación como se indica en la sección respectiva; al momento de utilizar estos rangos se recomienda tomar en consideración los índices de correlación obtenidos para ellos ya que para algunos elementos son bajos, lo cual indica un margen de variación alto.

## **5. RECOMENDACIONES**

- Repetir el estudio con más de dos dosis de fertilizantes, y para todo el ciclo de producción, donde estén involucrados la época de invierno y verano para ver diferencias más determinantes por lixiviados.
- Volver repetir el experimento con los rangos óptimos obtenidos para corroborar la validez de la sonda de lixiviación.
- Medir la producción, las deficiencias, tamaño de granos y la calidad del café, después de haber hecho la aplicación de la dosis según la sonda de lixiviación.

## 6. LITERATURA CITADA

Alonso, D., Martínez, E., Trigo, A., Domínguez, A., Sánchez, R., García, R., Ghorbel, R. y Tomás, J. 2006. Control de la nutrición mineral mediante el estudio de la succión de suelo y de la dinámica foliar. Dpto. Agronómico de AGQ. 3p (en línea). Consultado el 7 de julio de 2010. Disponible en.

<http://www.agriquem.com/articulos/controlnutricional3.html>

Arévalo, G. y Gauggel, C. 2009. Manual de prácticas de la clase manejo de suelos y nutrición vegetal. EAP, Honduras.

Baber, S.A. 1995. Soil nutrient bioavailability. New York, United States of America. John Wiley and Sons. p. 133, 180, 231, 262, 278, 301, 330, 353, 372.

Calderón, S. F. 2000. Analisis de la composicion de la solución del suelo mediante el uso de succionadores. Laboratorias Ltda. Bogotá D.C., Colombia S.A. (en línea). Consultado el 6 de julio 2010. Disponible en.

[http://www.drcalderonlabs.com/Investigaciones/Seguimiento\\_Sondas\\_de\\_Succion.htm](http://www.drcalderonlabs.com/Investigaciones/Seguimiento_Sondas_de_Succion.htm)

Castellanos Oseguera, L. 2008. Consumo de nutrientes y de agua en chile dulce (*Capsicum annuum*) variedades: Lírica, Simpathy y Zidenka, bajo condiciones de altura, en Mulacagua, Comayagua, Honduras. Proyecto especial de Ing. Agr. El Zamorano, Honduras. p 19.

Fassbender, H.W. 1975. Química de suelos con énfasis en suelos de América Latina. Primera Edición. Turrialba, Costa Rica. Editorial IICA. p 111-113.

Irrometer Co. US. 2005. Moisture sensor agricultural irrigation design manual. Riverside, California, United Stated. 14p (en línea). Consultado el 1 de octubre de 2010. Disponible en <http://www.irrometer.com/pdf/support%20material/ADG2006.pdf>

Landon, J. 1991. Booker tropical soil manual. Edinburgh Gate, Harlow, England. Booker Tate Limited. p 112, 123, 133, 143.

Matiello, J.B., Santinato, R., Garcia, A.W.R., Almeida, S.R., Fernandes, D.R. 2002. Cultura de café no Brasil: Novo manual de recomendações. Rio de Janeiro: MAPA/PROCAFÉ. p 387.

Mattar, M. y Pizarro, C. 2007. Determinación de la curva de absorción de nutrientes, mediante sondas extractómetras y análisis foliares en Palto (*Persea americana* Mill) CV HASS (en línea). Consultado el 6 de julio de 2010. Disponible en <http://www.avocadosource.com/WAC6/es/Extenso/3a-103.pdf>

Mills, H. y Jones, J. 1996. Plant analysis hand book II. Athens, Georgia, United States of America. Micromacro Publishing Inc. p 186.

Ordoñez, M. y Soto, D. 2007. Efecto del uso del fruto de Guanacaste (*Enterolobium cyclocarpum*) como sustituto parcial de concentrado en la alimentación de ganado lechero. Tesis Ingeniero Agrónomo. El Zamorano, Honduras, Escuela Agrícola Panamericana. p 2.

Urrestarazu Gavilán, M. 2004. Tratado de cultivos en el suelo. 3ed. Madrid, España. Ediciones Mundi-Pres. p 369.

## 7. ANEXOS

Anexo 1. Contenido de nutrientes según el análisis de suelo hecho en el lote de café en la EAP el 13/04/2010.

Nutrientes	N	P	K	Ca	Mg	Na	Cu	Fe	Mn	Zn	pH	CIC
ppm			8	430	2140	180	130	5.8	265	126	31	5.29
cmol/kg				1.1	10.7	1.5	0.6					13.9
%	0.23		7.4	72	10.1	3.8						
	0.2%-	13-30	2%-	50%-	15%-		1.7-3.4	56-112	28-112	1.7-3.4		
Rangos	0.5%	ppm	5%	75%	20%	<15%	ppm	ppm	ppm	ppm		

Anexo 2. Contenido de nutrientes según el análisis de suelo hecho en el lote de café en la EAP el 30/09/2010.

Nutrientes	N	P	K	Ca	Mg	Na	Cu	Fe	Mn	Zn	pH	CIC
ppm			36	370	1888	144	125	4	344	176	20	5.32
cmol/kg				0.95	9.44	1.2	0.54					12.1
%	0.2		7.82	77.81	9.88	4.49						
	0.2%-	13-30	2%-	50%-	15%-		1.7-3.4	56-112	28-112	1.7-3.4		
Rangos	0.5%	ppm	5%	75%	20%	<15%	ppm	ppm	ppm	ppm		

Anexo 3. Cuadro de ecuaciones cúbicas obtenidas del programa MINITAB para las regresiones de la concentración de nutrientes entre los métodos de suelo y foliar.

Suelo versus Foliar		
Nutriente	R2	Fórmula
N	89	$N = -34.3013 + 675.692N_{\text{suelo}} - 4007.22N_{\text{suelo}}^2 + 7750N_{\text{suelo}}^3$
P	13	$P = 0.0994734 + 0.0047223P_{\text{suelo}} - 0.0001151P_{\text{suelo}}^2 + 0.0000007P_{\text{suelo}}^3$
K	49	$K = 34.1907 - 0.299885K_{\text{suelo}} + 0.0008935K_{\text{suelo}}^2 - 0.0000009K_{\text{suelo}}^3$
Ca	77	$Ca = 154.537 - 0.245363Ca_{\text{suelo}} + 0.0001295Ca_{\text{suelo}}^2 - 0.0000000Ca_{\text{suelo}}^3$
Mg	23	$Mg = -2.48045 + 0.0613509Mg_{\text{suelo}} - 0.0004491Mg_{\text{suelo}}^2 + 0.0000011Mg_{\text{suelo}}^3$
Na		
Cu	69	$Cu = 100.574 - 56.0128Cu_{\text{suelo}} + 11.5224Cu_{\text{suelo}}^2 - 0.788747Cu_{\text{suelo}}^3$
Fe	29	$Fe = 15874.9 - 139.013Fe_{\text{suelo}} + 0.403886Fe_{\text{suelo}}^2 - 0.0003878Fe_{\text{suelo}}^3$
Mn	75	$Mn = 2082.16 - 40.4584Mn_{\text{suelo}} + 0.257116Mn_{\text{suelo}}^2 - 0.0005074Mn_{\text{suelo}}^3$
Zn	17	$Zn = -2.98076 + 2.10478Zn_{\text{suelo}} - 0.0893241Mn_{\text{suelo}}^2 + 0.0011675Mn_{\text{suelo}}^3$

Anexo 4. Cuadro de ecuaciones cúbicas obtenidas del programa MINITAB para las regresiones de la concentración de nutrientes entre los métodos de suelo y sonda de succión.

Suelos versus Sonda de Succión		
Nutriente	R2	Fórmula
N	40	$N = -254.144 + 4220.87N_{\text{suelo}} - 22737.0N_{\text{suelo}}^2 + 40185.2N_{\text{suelo}}^3$
P	64	$P = -2.33288 + 0.222668P_{\text{suelo}} - 0.0020817P_{\text{suelo}}^2 + 0.0000023P_{\text{suelo}}^3$
K	68	$K = 106.966 - 0.893980K_{\text{suelo}} + 0.0024380K_{\text{suelo}}^2 - 0.0000021K_{\text{suelo}}^3$
Ca	27	$Ca = 2362.60 - 3.98978Ca_{\text{suelo}} + 0.0022307Ca_{\text{suelo}}^2 - 0.0000004Ca_{\text{suelo}}^3$
Mg	51	$Mg = 221.803 - 4.96947Mg_{\text{suelo}} + 0.0366005Mg_{\text{suelo}}^2 + 0.0000876Mg_{\text{suelo}}^3$
Na	70	$Na = 11518.3 - 272.476Na_{\text{suelo}} + 2.14619Na_{\text{suelo}}^2 - 0.0056266Na_{\text{suelo}}^3$
Cu		
Fe	39	$Fe = -14.2821 + 0.128766Fe_{\text{suelo}} - 0.0003814Fe_{\text{suelo}}^2 + 0.0000004Fe_{\text{suelo}}^3$
Mn	23	$Mn = -16.7263 + 0.275304Mn_{\text{suelo}} - 0.0013516Mn_{\text{suelo}}^2 + 0.0000021Mn_{\text{suelo}}^3$
Zn		

Anexo 5. Cuadro de ecuaciones cúbicas obtenidas del programa MINITAB para las regresiones de la concentración de nutrientes entre los métodos de sonda de succión y sonda de lixiviación.

Sonda Succión versus Sonda de Lixiviación		
Nutriente	R2	Fórmula
N	8.3	$N = 2.8 + 4.41667Nsuccion - 1.60714Nsuccion^2 + 0.170068Nsuccion^3$
P	70.3	$P = 0.0077284 + 0.10125Psuccion - 0.0474666Psuccion^2 + 0.00622777Psuccion^3$
K	63.2	$K = 1.73080 + 6.98845Ksuccion - 2.57374Ksuccion^2 + 0.284106Ksuccion^3$
Ca	15	$Ca = 32.7420 - 4.69633Casuccion + 0.284389Casuccion^2 - 0.0050859Nasuccion^3$
Mg	36	$Mg = 2.86978 - 2.56533Mgsuccion + 1.117089MgCasuccion^2 - 0.138338Mgsuccion^3$
Na	89.6	$Na = 19.8948 - 14.1405Nasuccion + 3.45435Nasuccion^2 - 0.265808Nasuccion^3$
Cu	0	
Fe	69.6	$Fe = 3.51213 - 205.837Fesuccion + 4755.84Fesuccion^2 - 24343.8Fesuccion^3$
Mn	77.1	$Mn = 0.794911 + 2.54287Mnsuccion - 1.99944Mnsuccion^2 + 0.438706Mnsuccion^3$
Zn	0	

Anexo 6. Cuadro de ecuaciones cúbicas obtenidas del programa MINITAB para las regresiones de la concentración de nutrientes entre los métodos foliares y sonda de lixiviación.

Sonda de Lixiviación versus Foliar		
Nutrientes	R2	Fórmula
N	46.4	$F = 16.65 - 7.05238Nlixiviado + 1.16922Nlixiviado^2 - 0.0625607Nlixiviado^3$
P	39.2	$F = 0.161823 - 4.28629Plixiviado + 119.471Plixiviado^2 - 827.018Plixiviado^3$
K	77	$F = 31.8332 - 13.6955Klixiviado + 1.98827Klixiviado^2 - 0.0907468Klixiviado^3$
Ca	66.1	$F = 1.37770 - 0.145799lix + 0.0075807lix^2 - 0.0001163lix^3$
Mg	34.9	$F = 0.17113 + 0.277864Mglixiviado - 0.244365Mglixiviado^2 + 0.0594757Mglixiviado^3$
Na	0.0	
Cu	0.0	
Fe	36.4	$F = 566.594 - 983.688Felixiviado + 611.152Felixiviado^2 - 120.876Fe^3$
Mn	27.1	$F = 238.177 - 340.620Mnlixiviado + 258.329Mnlixiviado^2 - 61.7340Mnlixiviado^3$
Zn	31.9	$F = 16.5 - 558.333Znlixiviado + 14166.7Znlixiviado^2$



Anexo 7. Sonda de succión elaborada por Irrometer Co.



Anexo 8. Bomba de succión manual utilizada en el estudio elaborado por Irrometer Co.



Anexo 9. Sonda de lixiviación elaborada por el autor.