

**DISPONIBILIDAD, DISTRIBUCIÓN Y MOVILIDAD DE COBRE EN
UN SUELO DESTINADO AL CULTIVO DE PAPA AL ORIENTE DEL
DEPARTAMENTO DEL CAUCA.**



LEYDI JOHANNA CONÚ FIGUEROA

**UNIVERSIDAD DEL CAUCA
FACULTAD DE CIENCIAS NATURALES, EXACTAS Y DE LA EDUCACIÓN
DEPARTAMENTO DE QUÍMICA
POPAYÁN
2018**

**DISPONIBILIDAD, DISTRIBUCIÓN Y MOVILIDAD DE COBRE EN
UN SUELO DESTINADO AL CULTIVO DE PAPA AL ORIENTE DEL
DEPARTAMENTO DEL CAUCA.**

LEYDI JOHANNA CONÚ FIGUEROA

Trabajo de grado presentado como requisito para optar el título de Químico

Director: PhD. EDIER HUMBERTO PÉREZ

**UNIVERSIDAD DEL CAUCA
FACULTAD DE CIENCIAS NATURALES, EXACTAS Y DE LA EDUCACIÓN
DEPARTAMENTO DE QUÍMICA
POPAYÁN
2018**

Nota de Aceptación

Director _____
Edier Humberto Pérez PhD.

Jurado _____
Diana María Chito PhD.

Jurado _____
Fabio Antonio Cabezas

Fecha de sustentación: 06 de Febrero de 2018

DEDICATORIA

Este es el fruto del esfuerzo de varias personas a quienes con mucho orgullo dedico este trabajo:



A mi héroe, mi padre JESÚS ALBERTO CONÚ, sé que era su sueño verme convertida en toda una profesional y desde el cielo seguramente estuvo y estará apoyándome, dándome su fuerza cuando las mías se acaban.

A mi madre LUZ DARY FIGUEROA, la principal promotora de este logro mi apoyo incondicional, mi mayor pilar y ejemplo a seguir, mi heroína, esta es la recompensa a todo tu esfuerzo y sacrificio, sé que ha sido bastante difícil pero lo logramos.



A mis hermanos JUAN CARLOS, EDWIN y EIDER, que han sido un ejemplo para mí, impulsándome a salir adelante como ellos lo han hecho.

Finalmente, este trabajo es una recompensa de este gran equipo y significa el fin de este camino por el cual me acompañaron incondicionalmente por eso nadie más que ustedes merecen este reconocimiento.

AGRADECIMIENTOS

Después de mucho esfuerzo, paciencia y constancia, ha llegado el final de este capítulo y no queda más que agradecer a todas esas personas que con sus aportes, compañía y amistad, colocaron un granito de arena para que pudiera culminar con éxito este camino.

Principalmente agradecer a Dios por guiar, iluminar y acompañar mi camino, por darme la fortaleza espiritual para no rendirme aun cuando las cosas parecían imposibles.

A mi alma mater, la UNIVERSIDAD DEL CAUCA, por darme la oportunidad de cumplir mi sueño de ser una profesional.

A la VICERRECTORÍA DE INVESTIGACIONES (VRI), de la Universidad del Cauca por el apoyo económico brindado para llevar a cabo este proyecto.

A la UNIDAD DE ANÁLISIS INDUSTRIALES, su director el profesor German Cuervo y las monitoras Katherin Perafán y Paola Gutiérrez, por su tiempo y por colocar a mi disposición el uso de los equipos necesarios para el desarrollo de este proyecto

Al DEPARTAMENTO DE QUÍMICA, profesores, tecnólogos y administrativos por todas sus enseñanzas, paciencia y consejos, a todos y cada uno de ellos les aprendí algo, en especial a los profesores Ricardo, German e Isabel quienes con su carácter marcaron mi paso por esta carrera enseñándome que el compromiso y la dedicación son las raíces de cada logro.

Al grupo de investigación en AGROQUÍMICA, por acompañar el desarrollo de este proyecto y brindarme todas las condiciones necesarias para finalizarlo exitosamente.

A mi director EDIER HUMBERTO PÉREZ, por su enorme paciencia, alegría, consejos y enseñanzas, por su entrega y por poner a mi disposición todo su conocimiento para lograr sacar adelante este proyecto.

A mi principal pilar MI FAMILIA, mi madre, mis hermanos y mi sobrino, por acompañarme a soñar, por ayudarme a levantar y tomar mi mano para apoyar cada una de mis decisiones.

A mi compañero de aventuras Danilo Dávila, por su amor, apoyo y compañía.

A mi amiga y hermana, Angélica Castillo, por sus consejos y regaños, pero sobre todo por ser mi polo a tierra.

A mis amigos y hermanos, Alexander, Meliza, Eymi, Juanjo, Xime, Duva, Catu por hacer más divertidos los momentos más difíciles de la carrera, por su paciencia, apoyo y compañía a lo largo de este camino.

A mis compañeros de la Organización Colombiana de Estudiantes (OCE) por hacer de mi paso por la universidad una experiencia de vida más allá del estudio que contribuyó a mi formación personal y profesional,

Ya todos mis compañeros de camino Carolay, Diana Agredo, Diana Gómez, Daira, Laura, Julian Trujillo, Diego, Andrés, Wilson, Hamilton, Alejo, Marce, Linita

Gracias infinitas...

TABLA DE CONTENIDO

| | | |
|-------|---|----|
| 1 | RESUMEN | 1 |
| 2 | INTRODUCCIÓN | 3 |
| 3 | PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA | 5 |
| 4 | OBJETIVOS | 7 |
| 4.1 | OBJETIVO GENERAL..... | 7 |
| 4.2 | OBJETIVOS ESPECÍFICOS | 7 |
| 5 | MARCO TEÓRICO Y ESTADO DEL ARTE | 8 |
| 5.1 | EL SUELO..... | 8 |
| 5.1.1 | Suelos Andicos..... | 8 |
| 5.2 | EL CULTIVO DE PAPA | 8 |
| 5.2.1 | Principales plagas y enfermedades en el cultivo de papa..... | 9 |
| 5.3 | EL COBRE (CU)..... | 12 |
| 5.3.1 | Importancia del cobre..... | 12 |
| 5.4 | DISPONIBILIDAD, DISTRIBUCIÓN Y MOVILIDAD DE COBRE. | 13 |
| 6 | METODOLOGÍA..... | 17 |
| 6.1 | LOCALIZACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN..... | 17 |
| 6.2 | TOMA DE MUESTRA..... | 17 |
| 6.2.1 | Para análisis de las características físicas y químicas | 17 |
| 6.2.2 | Para análisis de distribución y movilidad de cobre | 17 |
| 6.3 | MANEJO DE MUESTRAS EN EL LABORATORIO | 17 |
| 6.4 | PROPIEDADES FÍSICAS Y QUÍMICA DEL SUELOS | 18 |
| 6.4.1 | Análisis Físicos..... | 18 |
| ➤ | Humedad Higroscópica | 18 |
| ➤ | Densidad Aparente | 19 |
| ➤ | Textura | 19 |
| 6.4.2 | Análisis químicos..... | 20 |
| ➤ | pH..... | 20 |
| ➤ | Acidez y Aluminio Intercambiable..... | 20 |
| ➤ | Carbono Orgánico y Materia Orgánica | 20 |
| ➤ | Determinación de Nitrógeno. | 21 |
| ➤ | Determinación de fósforo disponible. | 22 |
| ➤ | Determinación de azufre disponible. | 22 |

| | | |
|-------|--|----|
| ➤ | Determinación de Microelementos. | 23 |
| ➤ | Determinación de la Capacidad de Intercambio Catiónico (CIC)..... | 23 |
| ➤ | Determinación de las bases de cambio. | 23 |
| ➤ | Cu pseudo-total. | 23 |
| ➤ | Fraccionamiento de la materia orgánica del suelo (MOS)..... | 23 |
| 6.5 | EVALUACIÓN DE LA DISPONIBILIDAD DE COBRE..... | 25 |
| 6.6 | EVALUACIÓN DE LA DISTRIBUCIÓN DE COBRE..... | 25 |
| 6.7 | EVALUACIÓN DE LA MOVILIDAD DE COBRE..... | 25 |
| 6.8 | DISEÑO EXPERIMENTAL..... | 26 |
| 6.8.1 | Evaluación de la movilidad de cobre. | 26 |
| 6.8.2 | Evaluación de la distribución de cobre..... | 27 |
| 7 | ANÁLISIS DE RESULTADOS..... | 28 |
| 7.1 | PROPIEDADES FÍSICAS Y QUÍMICAS..... | 28 |
| 7.2 | EVALUACIÓN DE LA DISPONIBILIDAD DE COBRE..... | 30 |
| 7.3 | EVALUACIÓN DE LA DISTRIBUCIÓN DE COBRE EN UN PERFIL DE SUELO. | 33 |
| 7.4 | EVALUACIÓN DE LA MOVILIDAD DE COBRE..... | 37 |
| 8 | CONCLUSIONES..... | 40 |
| 9 | RECOMENDACIONES..... | 42 |
| 10 | BIBLIOGRAFÍA..... | 43 |

LISTA DE TABLAS

| | |
|---|----|
| Tabla 1. Propiedades físicas y químicas del suelo | 29 |
| Tabla 2. Correlación de Pearson para algunas propiedades que influyen en la disponibilidad de Cu..... | 32 |
| Tabla 3. Contenido de cobre en las columnas no disturbadas en las diferentes profundidades después de las tres simulaciones..... | 33 |
| Tabla 4. Distribución de cobre en columnas no disturbadas en función de la profundidad (Prueba de Duncan $\alpha= 0,05$)..... | 36 |
| Tabla 5. Resultados extracción secuencial de Tessier..... | 37 |

LISTA DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 1. Ilustración de la función crítica de Cu en la transformación del fenol. ... | 13 |
| Figura 2. Adsorción de Cu sobre un mineral de óxido de hierro.. | 14 |
| Figura 3. Posible estructura de los complejos formados entre la MO y el Cu. | 15 |
| Figura 4. Representación esquemática de la unión de Cu en las láminas de sílice. | 15 |
| Figura 5. Diagrama de separación Granulométrica de la MO. | 24 |
| Figura 6. Diagrama del diseño experimental distribución de cobre. | 27 |
| Figura 7. Contenido de cobre disponible en las parcelas. La línea discontinua en la gráfica indica el límite inferior del rango establecido para cobre disponible en suelos agrícola | 31 |
| Figura 8. Gráfica comparativa del contenido de Cu pseudototal y el Cu disponible en las parcelas. | 31 |
| Figura 9. Representación del montaje de las columnas. | 33 |
| Figura 10. Distribución de cobre en columnas para la parcela 1. | 34 |
| Figura 11. Distribución de cobre en columnas para la parcela 2. | 35 |
| Figura 12. Distribución de cobre en columnas para la parcela 3. | 35 |
| Figura 13. Distribución de cobre en columnas para la parcela 4. | 36 |
| Figura 14. Representación gráfica de las fracciones de cobre en las parcelas de suelo. | 38 |

ABREVIATURAS Y ACRÓNIMOS

| | |
|-----------------|--|
| MO | Materia Orgánica. |
| CO | Carbono Orgánico. |
| NT | Nitrógeno Total. |
| MOH | Materia Orgánica Humificada. |
| MOF | Materia Orgánica Fresca. |
| Cu | Cobre. |
| DANE | Departamento Administrativo Nacional de Estadística. |
| DIMPE | Dirección de Metodología y Producción Estadística. |
| FEDEPAPA | Federación de Productores de Papa. |
| ha | Hectárea. |
| CIC | Capacidad de Intercambio Catiónico. |
| F1 | Fracción 1 de la extracción secuencial de Tessier. |
| F2 | Fracción 2 de la extracción secuencial de Tessier. |
| F3 | Fracción 3 de la extracción secuencial de Tessier. |
| F4 | Fracción 4 de la extracción secuencial de Tessier. |
| F5 | Fracción 5 de la extracción secuencial de Tessier. |
| FM | Factor de movilidad. |
| FT | Fracción de cobre total extraído. |
| FAO | Organización de las naciones unidas para la alimentación y la Agricultura |
| CIP | Centro Internacional de la papa |
| ND | No disturbado |

1 RESUMEN

El cobre es considerado un micronutriente esencial para las plantas ingresa a estas a través de las raíces que lo toman directamente del suelo, de aquí la importancia del contenido de Cu en el mismo. Sin embargo, el uso inadecuado de productos agroquímicos que tienen como principio activo este metal, puede causar problemas de contaminación tanto en los suelos como en agua y por supuesto las plantas. Por esto el objeto de estudio de este suelo fue el análisis del comportamiento del cobre teniendo en cuenta tres parámetros que son: disponibilidad, distribución y movilidad.

El corregimiento de Gabriel López, Totoró que está ubicado al oriente del departamento del Cauca, y cuyos suelos están clasificados como suelos Andicos, tienen como principal eje económico el cultivo de papa. En esta zona se seleccionaron cuatro parcelas utilizadas para el cultivo de papa (*Solanum Tuberosum*) (dos sembradas y dos cosechadas), la recolección de las muestras se realizó bajo el diseño experimental de retícula fija o cuadrícula, lo cual permitió obtener una representación del área muestreada. Seguidamente se llevó a cabo el tratamiento de las muestras para su conservación y posterior análisis de las propiedades físicas y químicas (porcentaje de humedad, textura, pH, nitrógeno, fósforo, azufre, capacidad de intercambio catiónico (CIC), carbono orgánico (CO), materia orgánica (MO), bases intercambiables y microelementos), con el fin de conocer factores que influyen en la evaluación de la disponibilidad, distribución y movilidad.

El análisis de la disponibilidad de cobre en el suelo de las cuatro parcelas estudiadas permitió determinar que el contenido de cobre disponible es bajo, siendo el contenido de MO el factor determinante en la baja disponibilidad del metal.

Para el análisis de movilidad y distribución el muestreo se llevó a cabo aleatoriamente en columnas de lixiviación de suelo sin disturbar y se recolectaron submuestras de las partes laterales de las columnas. Al realizar el análisis de las columnas saturadas se encontró mayor contenido de cobre en los primeros centímetros del horizonte del suelo (0 a 5 cm).

La extracción secuencial de Tessier muestra que el mayor contenido de cobre se encuentra en la fracción 4 (F4) y 5 (F5) que corresponden al cobre unido a la materia orgánica y sulfuros y cobre residual respectivamente, esto explica porque la movilidad del mismo a través de un perfil de suelo es reducida dado que en los primeros centímetros del perfil es donde se encuentra el mayor contenido de materia orgánica (MO) con la cual el cobre forma complejos altamente estables que impiden su movilidad a través de la columna.

Finalmente, es posible concluir que el suelo tiene un alto poder de retención de cobre por su facilidad para formar complejos estables con la materia orgánica presente en el suelo, esto se ve reflejado en la baja movilidad del metal.

Palabras claves: Extracción secuencial, columna saturada, materia orgánica, lixiviación.

2 INTRODUCCIÓN

Los metales se encuentran presentes en la corteza terrestre de forma natural, en el caso del suelo la distribución y contenido de estos dependerá del material del cual se originó. Otra forma por la cual los metales llegan al suelo es producto de actividades antrópogenicas actuales o del pasado. Dentro de los metales que encontramos en el suelo existe un grupo catalogado como metales pesados, que se caracterizan por presentar una densidad igual o superior a 6 g/cm^3 en su forma elemental o, cuyo número atómico es superior a 20 excluyendo los metales alcalinos y alcalinotérreos, entre los más importantes se encuentran el Arsénico (As), Cadmio (Cd), Cobalto (Co), Cromo (Cr), Cobre (Cu), Mercurio (Hg), Níquel (Ni), Plomo (Pb), Estaño (Sn) y Zinc (Zn), metales que pueden presentar efecto tóxicos para las plantas, animales y humanos [1].

La importancia ambiental de los metales pesados en suelos agrícolas radica en que son acumulativos, no son biodegradables, no se presentan alarmas frente a la acumulación en el perfil del suelo hasta que se encuentran niveles tóxicos y su interacción con diferentes propiedades del suelo determinan su acumulación, movilidad y biodisponibilidad. Debido al acelerado crecimiento poblacional, las prácticas agronómicas se han centrado en cumplir con la demanda alimenticia, aumentando la productividad y el control de plagas y enfermedades, para ello se emplean productos con consecuencias positivas para los cultivos, pero que han incorporado al suelo diferentes sustancias que contienen metales como el cobre debido al uso indiscriminado de estos productos, esto puede llegar a ser tóxico para los cultivos, degradar los suelos, disminuir la biodisponibilidad y contaminar los cuerpos de agua [2].

El cobre puede ser absorbido por las raíces de los cultivos y aunque es un micronutriente esencial que juega un papel importante en un gran número de procesos biológicos, se convierte en fitotóxico para las células cuando se encuentra en niveles muy elevados provocando la inhibición del crecimiento de las plantas e incluso la muerte [3], también es de esta forma como llega a través de la cadena alimenticia hasta los animales y humanos. Por otro lado, el cobre puede sufrir procesos de escorrentía hasta fuentes de aguas superficiales o ser transportado hasta aguas subterránea por procesos de lixiviación.[2]

El estudio de la disponibilidad, distribución y movilidad de cobre en el suelo contribuye en la evaluación del impacto ambiental de los productos agroquímicos a base de cobre, permitiendo identificar el comportamiento del cobre en el suelo y así poder definir criterios umbrales de contaminación, teniendo en cuenta características del suelo como el pH, el contenido y tipo de arcilla, materia orgánica,

capacidad de intercambio catiónico y otras propiedades del suelo que determinan los tres parámetros antes mencionados. [2]

3 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Según el Ministerio de Agricultura Nacional y la Federación de Productores de Papa (FEDEPAPA), en el país existen unas 100 mil familias que se dedican al cultivo de la papa en 10 departamentos y 283 municipios, generando 264 mil empleos totales en el año. A pesar de que la papa es el tercer alimento de mayor importancia alimenticia a nivel mundial, se ha observado que el área de suelo cultivada con este producto ha decrecido debido a la disminución del consumo y la elevada productividad que se ha alcanzado con el uso de productos agroquímicos que además, también ayudan en el control de patógenos [4]. Estos últimos son ampliamente utilizados ya que la papa es un cultivo altamente sensible al ataque de diferentes plagas y enfermedades, como consecuencia el agricultor ha empezado a hacer uso indiscriminado de estos productos que podrían ocasionar problemas ambientales y de salubridad [5].

En Colombia, cada vez es más evidente la contaminación con metales pesados de los recursos hídricos, aire y suelo, esto ha desencadenado la realización de estudios de metales como el Mercurio (Hg), Arsénico (As), Cadmio (Cd) y Plomo (Pb), debido a que son altamente contaminantes y nocivos para la salud. Sin embargo, hasta el momento son escasos los estudios alrededor de metales pesados como el Cobre (Cu), que son considerados micronutrientes en el suelo pues son requeridos por las plantas en mínimas cantidades, pero que en altos niveles de concentración pueden ser nocivos tanto para las plantas como para el ser humano. Por tanto adquiere importancia el estudio del comportamiento del cobre en el suelo sobre todo, en aquellos que son destinados al cultivo de papa pues como ya se ha mencionado el uso de productos agroquímicos en este tipo de cultivos ha incrementado y son sensibles al ataque de plagas y enfermedades cuyos principales productos agroquímicos utilizados para combatirlas tienen como principio activo compuestos de cobre.[6]

Según las cifras reportadas por el DANE y la DIMPE, el cultivo de papa en el Cauca ocupa el primer lugar en producción y el segundo lugar en área sembrada y cosechada entre los principales cultivos transitorios [7], encontrándose a Totoró entre los principales municipios productores [8] y dentro de este municipio el corregimiento de Gabriel López es quien aporta la mayor producción de papa basando el 40 % de su economía en actividades dedicadas al cultivo de este producto y presentando problemas de contaminación por el uso de los diferentes agroquímicos [9].

La contaminación por metales continuamente ha sido evaluada por el contenido total del metal. Sin embargo, el contenido total de metal del suelo abarca grandes fracciones que no están disponibles para las plantas, microorganismos o fauna del

suelo, por lo tanto es necesario estudiar las diferentes fracciones del metal para poder establecer un riesgo potencial de contaminación [10]. Entre los factores que pueden determinar un posible riesgo de contaminación por Cu se encuentran la disponibilidad, la movilidad y la distribución, parámetros que determinan una posible contaminación de plantas, agua y suelo.

En este trabajo se evaluó la disponibilidad, distribución y movilidad de cobre en un suelo destinado al cultivo de papa en la región de Gabriel López, Municipio de Totoró, Cauca, factores que son importantes en el estudio del comportamiento del cobre en el suelo y que permitirán establecer un posible riesgo por contaminación con cobre, teniendo en cuenta la importancia del cultivo de papa en la región y el uso de agroquímicos en este tipo de cultivos. Con esto se busca abrir las puertas y dar el primer paso en el estudio de la contaminación con metales pesados hasta ahora no considerados altamente tóxicos pero que con su uso prolongado e intensivo en la agricultura puede llegar a ser dañino, con el fin de dar las bases para el avance en las políticas ambientales del estado que permitan establecer niveles de toxicidad en contenido de metales en el bien natural suelo, dado que Colombia no cuenta con ellos.

4 OBJETIVOS

4.1 Objetivo general

Evaluar la disponibilidad, distribución y movilidad de cobre en un suelo utilizado para el cultivo de papa en la región de Gabriel López, al oriente del departamento del Cauca.

4.2 Objetivos específicos

- Determinar las características físicas y químicas de un suelo destinado al cultivo de papa criolla (*Solanum phureja*) y parda suprema (*Solanum tuberosum andigena*), en el corregimiento de Gabriel López, municipio de Totoró, departamento del Cauca.
- Estudiar la movilidad de cobre mediante extracción secuencial de Tessier y la distribución a través de columnas de lixiviación con suelo sin disturbar.
- Estimar la disponibilidad de cobre en el suelo, teniendo en cuenta los resultados obtenidos en los análisis de distribución y movilidad.

5 MARCO TEÓRICO Y ESTADO DEL ARTE

5.1 EL SUELO.

El suelo es un ente natural y dinámico en el que se presentan al mismo tiempo, los tres estados de la materia sólido, líquido y gaseoso. En él se llevan a cabo una gran cantidad de procesos físicos, químicos y biológicos que le otorgan las características morfológicas y las propiedades que presenta. El suelo es parte importante en el desarrollo de la vida, siendo el albergue de diferentes organismos entre ellos la vegetación, pues es del suelo de donde las plantas adquieren el agua, el oxígeno y los nutrientes necesarios para su desarrollo y crecimiento, a su vez la vegetación tiene un rol muy relevante debido a que es la base de las actividades agrícolas y por ende la principal fuente de alimento del hombre [11].

5.1.1 Suelos Ándicos.

Los suelos ándicos o andisoles son derivados del material volcánico, son suelos que presentan buena estructura y por tanto buen drenaje [12]. En Colombia, y particularmente en el Departamento del Cauca se encuentran suelos en su gran mayoría originados a partir de cenizas volcánicas y clasificados como suelos andisoles. Esta clasificación indica que presentan características particulares entre ellas: pH ácido en la parte superior y ligeramente ácido en los horizontes más profundos, alto porcentaje de carbono orgánico especialmente en los primeros horizontes, alto porcentaje de nitrógeno total, una elevada capacidad de intercambio catiónico, entre otras [13].

El corregimiento de Gabriel López se encuentra ubicado al oriente del Departamento del Cauca y sus suelos presentan características que van de acuerdo con las anteriormente descritas para los suelos andisoles, especialmente que sus suelos está constituido por material parental formado a partir de rocas ígneas (tobas, brechas, andesitas) y rocas metamórficas. Son suelos muy profundos, de color oscuro, texturas al tacto franco arcillosas, pH fuertemente ácido, alto contenido de carbono y alta saturación de aluminio en el primer horizonte y presenta como actividad principal la agricultura, en especial el cultivo de papa [9].

5.2 EL CULTIVO DE PAPA

La papa es originaria del altiplano de Perú y Bolivia, pero los conquistadores españoles la encontraron en los Andes colombianos, especialmente en el área geográfica que actualmente corresponde al departamento de Nariño. [14]

El cultivo de papa a nivel mundial es una de las actividades agrícolas que consume más plaguicidas por unidad de área. Este alto uso de plaguicidas se debe a que el cultivo de papa está expuesto al ataque de numerosas plagas, patógenos y malezas, la mayoría de las cuales se incrementan en condiciones de alta humedad. Su producción en monocultivo siempre ha estado ligada a una alta dependencia de plaguicidas y fertilizantes. Según la CIP y FAO, el uso de plaguicidas químicos en la papa está aumentando en los países en desarrollo, conforme los agricultores intensifican la producción y empiezan a producir en zonas y en temporadas no tradicionales para este cultivo. Varias de las sustancias químicas usadas con frecuencia son muy tóxicas y se aplican con insuficiente o ningún tipo de control [15].

5.2.1 Principales plagas y enfermedades en el cultivo de papa.

La planta de la papa es atacada por un gran número de plagas y enfermedades entre las que se pueden destacar las siguientes [16].

PRINCIPALES PLAGAS:

CATARINA O ESCARABAJO DEL COLORADO DE LA PAPA (*Leptinotarsa decemlineata*): Este insecto es el más común y destructivo en el cultivo de la papa en el mundo. Tanto la larva como el adulto se alimentan de las hojas ocasionando en ocasiones serios daños que se traducen a una defoliación completa dejando sólo los tallos principales. Los ataques severos reducen la producción considerablemente [16].

CHICHARRITAS (*Empoasca kraemeri*): Los daños son causados tanto por las ninfas como por los adultos al alimentarse principalmente en el envés de las hojas extrayendo los jugos y se manifiesta por una ligera coloración amarillenta en la punta de las hojas, después, ésta paulatinamente se vuelve oscura, se arruga hacia arriba y finalmente muere. En climas cálidos y secos estos síntomas se detectan rápidamente [16].

MOSQUITA BLANCA (*Trialeurodes vaporariorum*): Los adultos succionan la sabia para alimentarse debilitando a la planta y retrasando su desarrollo. En las hojas de las plantas las mosquitas secretan una sustancia mielosa sobre la que se desarrollan hongos, las plantas se vuelven raquílicas, los insectos se agrupan en la parte inferior de las hojas, vuelan en cuanto se les molesta e inmediatamente vuelven a posarse [16].

PALOMILLA O POLILLA DE LA PAPA (*Phthorimea operculella*): Las larvas al nacer barrenan las ramas o minan las hojas, pero los daños más importantes son

ocasionados cuando barrenan los tubérculos dejando galerías ocasionando las entradas de patógenos e inutilizándolos para el consumo [16].

DIABROTICA (*Diabrotica ssp*): Es un coleóptero que intervienen en el estado de escarabajo depositando sus huevecillos en el suelo. Las larvas se alimentan de las raíces y estolones de la planta de papa, dañando también los tubérculos. Los adultos comen las hojas y frutos haciendo perforaciones de forma irregular [16].

PRINCIPALES ENFERMEDADES:

TIZÓN TEMPRANO (*Alternaria solani*): Las Alternarias se encuentran entre las enfermedades más comunes en muchos tipos de plantas en todo el mundo, afectan principalmente a tallos, hojas, flores y frutos. Las enfermedades causadas por Alternaria se presentan en forma de manchas y tizones foliares, pero pueden ocasionar también el ahogamiento de plántulas, pudriciones del cuello, así como pudriciones de frutos y tubérculos [16].

SARNA PLATEADA (*Helminthosporium solani*): En los tubérculos recién recolectados casi no se nota la enfermedad sino después de lavados y se observan áreas con alteraciones muy leves de color. Las condiciones favorables para el desarrollo del hongo es el exceso de humedad en el suelo, temperaturas moderadamente elevadas y alta humedad ambiental [16].

VIRUELA DE LA PAPA (*Corticium solani*): Esta infección sólo ocasiona daños apreciables en determinados casos, particularmente cuando las condiciones externas no favorecen una brotación o nacimiento rápido. El parásito ataca las yemas todavía enterradas de los estolones y las raicillas, provocando la aparición de profundas manchas pardas que producen rápidamente la descomposición de estos órganos. Los tubérculos llevan pequeños esclerocios oscuros, en forma de costras y están a menudo deformados [16].

SARNA VERRUGOSA DE LA PAPA (*Synchytrium endobioticum*): La sarna verrugosa es la más peligrosa enfermedad de los tubérculos, ya que una vez que se ha introducido puede destruir toda la cosecha. Este parásito se encuentra en todos los países de Europa, a excepción de algunas regiones meridionales; se identificó en Suiza por primera vez en 1925. Los tubérculos, estolones y tallos subterráneos presentan excrescencias verrugosas, agrietadas, de tamaño variable y a menudo en forma de esponja. Esos tumores, a principios blancuzcos, llegan a hacer oscuros y acaban por descomponerse antes de la recolección especialmente en suelos húmedos [16].

PIERNA NEGRA (*Erwinia carotovora*): Cuando la planta es joven y apenas empieza la tuberización se observa un marchitamiento que se inicia en los tallos empezando en los brotes apicales y posteriormente, abarca todo el follaje. El tallo subterráneo cambia de color y se pudre. Cuando las plantas están desarrolladas se evidencia con un cambio de coloración del follaje, el cual adquiere un tono amarillento, el tallo se pone negro y los tejidos terminan por desquebrajarse. En los tubérculos producen una pudrición húmeda cuyo color puede ser ligeramente blanco cremoso hasta el castaño oscuro [16].

MARCHITES BACTERIANA O VAQUITA (*Pseudomona solanacearum*)

Los síntomas iniciales empiezan en la parte apical del follaje abarcando parcialmente una hoja y un tallo. Los primeros síntomas son un cambio de color de las hojas a un verde pálido y luego amarillento. Inmediatamente después se produce el marchitamiento, y luego la muerte de la planta. Cuando el ataque es severo, el tallo sobre el nivel y bajo el suelo, se pone de color castaño oscuro también ocurre en los estolones y raíces [16].

TIZÓN TARDÍO (*Phytophthora infestans*): El tizón tardío de la papa se manifiesta en casi todas las regiones donde se cultiva. La enfermedad puede destruir el follaje y los tallos de la planta en cualquier momento durante la estación de crecimiento de las plantas. Puede atacar también a los tubérculos de la papa y los frutos del tomate en el campo, los cuales se pudren en los terrenos del cultivo o cuando se le almacena, transporta o vende en el mercado. El tizón tardío puede destruir totalmente todas las plantas de la zona del cultivo al cabo de una o dos semanas cuando las condiciones climáticas son favorables y cuando no se aplica ningún método de control [16].

En Colombia, los cultivos de papa han sido atacado por una enfermedad que ha sido de especial importancia conocida con los nombres de gota, gotera, lancha o tizón tardío, causada por *Phytophthora infestans*. Los primeros registros de la enfermedad en Colombia aparecen alrededor de 1571 y desde entonces se ha presentado como la enfermedad más frecuente y destructiva en todas las zonas paperas del país, ocupando aproximadamente entre 8 y 12 % de los costos de producción total del cultivo, esto dio origen a la aparición de productos químicos a base de compuestos de cobre insolubles como los cloruros básicos, oxiclорuros, carbonatos y sulfato que son ampliamente utilizados por los papicultores para el control de esta y otras plagas [17].

El tizón tardío de la papa es controlado con aspersiones químicas con funguicidas, que si se aplican adecuadamente, casi siempre mantienen bajo control esta enfermedad. Entre los compuestos químicos que se utilizan para el control del tizón tardío son: Mancozeb, Metalaxyl, una combinación de Metalaxyl y Mancozeb,

Captafol, Clorotalonil, Polyran, y el Hidróxido de Fentina, así como varios compuestos de cobre como el Kocide, Oxiclورو de cobre, Cobrethane y el Caldo de Bordelés [16].

Los productos antes mencionados se encuentran dentro de las categorías toxicológicas 3 (mediamente tóxicos) y 4 (ligeramente tóxicos), sin embargo, aunque su toxicidad no es elevada una exposición prolongada y sin la debida protección tienen consecuencia sobre la salud humana, que van desde irritación del tracto respiratorio, irritación ocular hasta el mal funcionamiento de órganos como la tiroides, hígado [18].

5.3 EL COBRE (Cu)

El cobre es un metal rojizo que se encuentra presente en forma natural en el suelo, rocas, agua, sedimentos e incluso en concentraciones muy bajas en el aire, se encuentra en la corteza terrestre en concentraciones entre 45-50 mg kg⁻¹, contenido que puede variar debido a la actividad minera, la industria petrolera, al uso de aguas residuales sin tratamiento para el riego de suelos agrícolas y al uso de fungicidas en la agricultura que puede elevar ese contenido de cobre en el suelo [19]; también, se encuentra haciendo parte de varios minerales como son los sulfuros, sulfatos, sulfosales y carbonatos; principalmente: calcopirita CuFeS₂, cuprita Cu₂O, malaquita Cu₂(OH)₂(CO₃)₂ y azurita Cu₂(OH)₂(CO₃)₂ [20].

El cobre es un elemento de gran importancia para los humanos, animales y plantas, estas últimas toman este microelemento del suelo, por lo cual es relevante conocer la forma en la que se encuentra el cobre en él, pues solo es asimilable por las plantas en forma de [Cu (H₂O)₆]²⁺ para los suelos ácidos y como Cu (OH)₂ en los neutros y alcalinos. El cobre se puede encontrar en forma de iones solubles, complejos inorgánicos y orgánico solubles, formando complejos orgánicos estables, adsorbido por los óxidos de Mn, Fe y Al, por la materia orgánica y por las arcillas, y formando parte de las estructuras de los minerales, siendo, la materia orgánica y los óxidos de Fe y Mn los parámetros más importantes para la fijación del Cu, haciendo que los suelos con altos contenidos de materia orgánica tengan la capacidad de tolerar altas concentraciones de Cu. En consecuencia es más común encontrar el Cu unido al complejo de cambio que formando minerales, ya que es fuertemente fijado en los suelos y por tanto es un metal muy poco móvil y muy poco sensible a los cambios de pH [21].

5.3.1 Importancia del cobre

El Cu es un micronutriente esencial que juega un papel muy importante en la homeóstasis del metal y en el metabolismo de las plantas [3]. Está presente en varias enzimas que desempeñan un papel fundamental en procesos como la

fotosíntesis, respiración, desintoxicación de radicales peróxido y lignificación, estas enzimas son afectadas al presentarse deficiencias de Cu pues su actividad disminuye drásticamente [22].

Algunas proteínas en las que está presente el cobre son:

Plastocianina: Al presentarse bajos contenidos de plastocianina como consecuencia de la deficiencia de cobre, se reduce el transporte fotosintético de electrones disminuyendo la tasa de fijación de CO₂ y en consecuencia disminuyen también el contenido de almidón y carbohidratos solubles [23].

Superóxido Dismutasa: Las enzimas superóxido dismutasa (SOD) son enzimas antioxidantes que intervienen en la eliminación de especies reactivas de oxígeno, siendo la única enzima en las plantas que dismuta el O₂⁻ generado durante la fotosíntesis en H₂O₂ y O₂, actividad que se ve reducida al presentarse deficiencias de cobre [24]. Estas enzimas han atraído recientemente la atención por su importante papel en la desintoxicación de radicales superóxido.

Oxidasa: Gracias a su capacidad redox el cobre es aprovechado por las enzimas polifenol oxidasa, ascorbato oxidasa y diamino oxidasa para formar polímeros complejos como la lignina [25]. Estas enzimas son de gran importancia en la biosíntesis del fenol, vía quinona, a sustancias melatónicas y lignina (Figura 1), la actividad de estas enzimas disminuye al presentarse deficiencias de cobre en consecuencia se genera acumulación de fenoles y por ende se reduce la lignificación que es importante para aumentar la resistencia a enfermedades en las plantas.

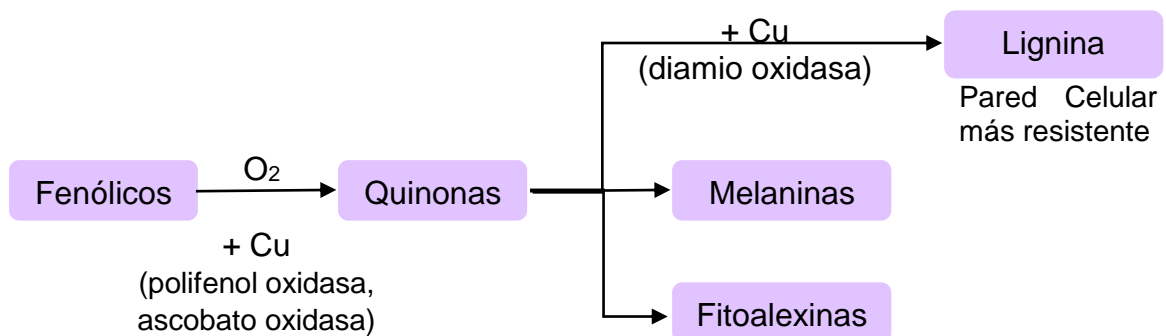


Figura 1. Ilustración de la función crítica de Cu en la transformación del fenol.

5.4 DISPONIBILIDAD, DISTRIBUCIÓN Y MOVILIDAD DE COBRE.

La disponibilidad de Cu es la posibilidad de que este quede libre y pueda pasar a la solución del suelo de tal forma que pueda estar biodisponible, es decir, pueda ser capturado por algún organismo. La biodisponibilidad de Cu depende de la forma

química y física en la que se encuentra el metal y de la capacidad del organismo para absorberlo e ingerirlo [26].

La movilidad se refiere a la capacidad que tiene el Cu para desplazarse entre las diferentes fases del suelo de tal manera que pueda o no estar disponible, capacidad que principalmente depende de la forma en la que se encuentre el Cu, pero además de su especiación química también depende de una serie de parámetros del suelo como el pH, la MO, Carbonatos y minerales de la arcilla entre otros [27].

Cu adsorbido e intercambiable (F1): Esta fracción está constituida por los metales fijados al suelo mediante reacciones de adsorción a arcillas, óxidos hidratados de hierro y manganeso [28].

Cu unido a carbonatos (F2): Constituida por la fracción del metal asociada a compuestos de tipo carbonato [28].

Cu unido a óxido amorfos (F3): Estos óxidos, presentes en el material edáfico en forma de nódulos, o simplemente como cemento de unión entre partículas, constituyen magníficos depósitos de metales pesados, que pueden extraerse por la acción combinada de un agente capaz de reducir los metales a formas manganesosa y ferrosa, más otro agente capaz de mantener en solución los metales liberados [28]. En la Figura 2 se muestra la unión entre el cobre y un mineral de óxido de hierro.

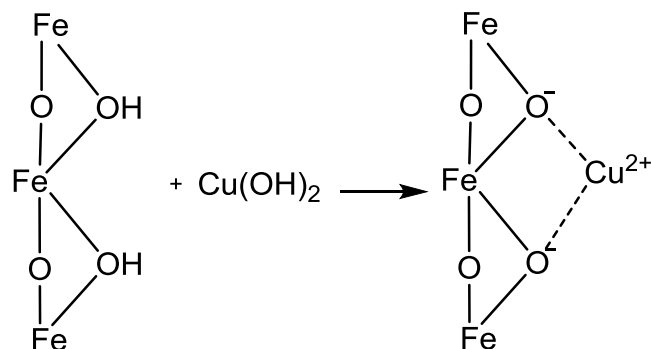


Figura 2. Adsorción de Cu sobre un mineral de óxido de hierro [29].

Cu unido a MO y sulfuros (F4): Es conocido el hecho de que la materia orgánica puede unirse a los metales pesados a través de muy diversos procesos (bioacumulación, complejación, etc.) [28]. En la Figura 3 se puede observar la estructura propuesta para los compuestos formados entre la MO y un metal divalente como el Cu.

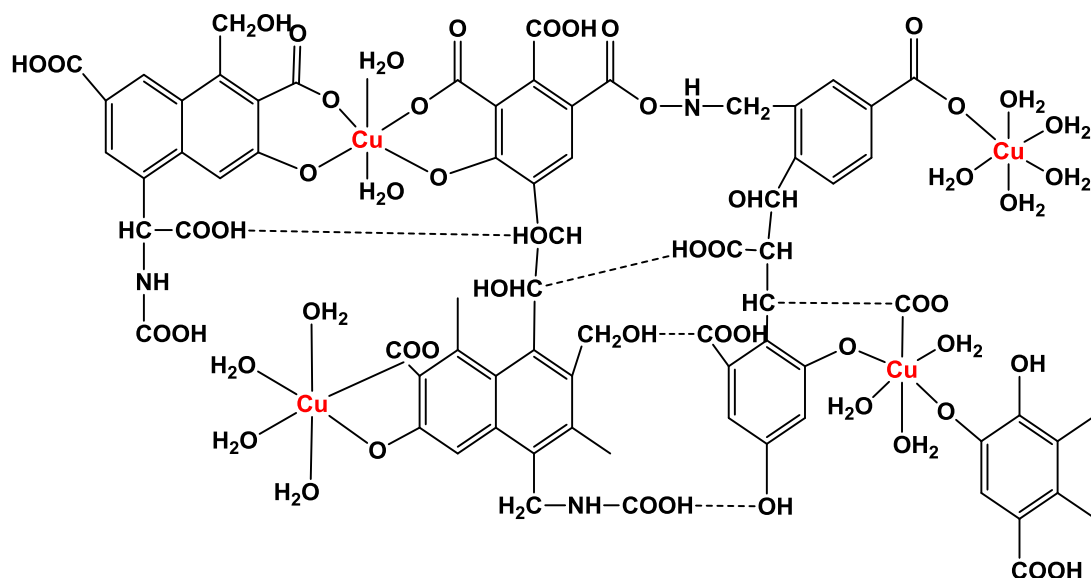


Figura 3. Posible estructura de los complejos formados entre la MO y el Cu [30].

Cu residual (F5): El residuo sólido obtenido, después de separar la fracción orgánica antes solubilizada, está constituido principalmente por minerales primarios y secundarios que pueden contener metales pesados en su estructura cristalina que no son fácilmente liberados. [28]. En la Figura 4 se muestra la unión del Cu en las láminas de sílice.

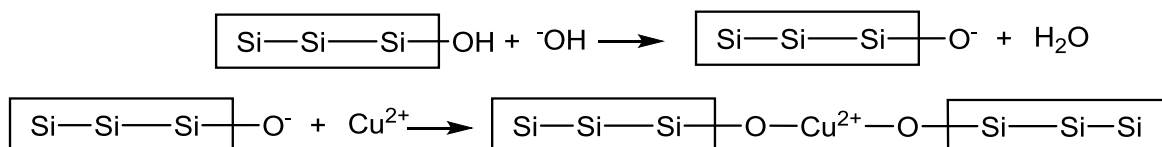


Figura 4. Representación esquemática de la unión de Cu en las láminas de sílice. [29]

A partir de estas fracciones se puede determinar el factor de movilidad mediante la ecuación 1:

$$FM = (F1 + F2 / (F1 + F2 + F3 + F4 + F5)) \times 100 \quad \text{(Ecuación 1)}$$

Además, se calculan los porcentajes de recuperación a partir de la ecuación 2:

$$\% R = (\text{Cu inicial} / \text{Cu Final}) \times 100 \quad \text{(Ecuación 2)}$$

Siendo, % R el porcentaje de recuperación, **Cu inicial:** el cobre pseudo total (se refiere a casi el total del cobre presente en el suelo, debido a que con los ácidos utilizados no extrae la parte del metal retenido en las fracciones cristalinas de algunos de los minerales más resistentes) determinado antes de realizar el proceso de secuenciación y **Cu final:** el cobre total extraído en el proceso obtenido a partir de la sumatoria de las cinco fracciones determinadas.

La distribución del Cu en el perfil del suelo depende de factores pedológicos como:

1. Acumulación del metal en la parte superficial lo cual es evidente en suelos donde el perfil presenta un horizonte superficial rico en materia orgánica.
2. La posibilidad de que el metal pueda ser lixiviado hacia horizontes más profundos o completamente fuera del perfil. Esto es particularmente importante en el suelo de regiones tropicales y húmedas.
3. Translocación de elementos traza en los procesos de formación del suelo.
4. Movilización de oligoelementos mediante la descomposición de los minerales del suelo.
5. La translocación mecánica de la arcilla, por lo que los oligoelementos se hacen más abundantes en la arcilla que en otras fracciones del suelo.
6. Acumulación superficial de sales solubles tales como boratos en regiones áridas.
7. Movilización o fijación derivada de la actividad microbológica [31].

Como se puede observar, existe una relación entre la disponibilidad, distribución y movilidad del Cu en el suelo, estos tres factores son importantes en el análisis del comportamiento del Cu y en la determinación de un riesgo potencial de contaminación, de ahí la importancia de abordar y analizar estos tres factores.

6 METODOLOGÍA

6.1 LOCALIZACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN

El desarrollo de los análisis se llevó a cabo en las instalaciones del laboratorio del grupo de investigación en Agroquímica y de la unidad de análisis industriales del Departamento de Química de la Universidad del Cauca. Las muestras del suelo analizadas fueron colectadas de cuatro parcelas destinadas al cultivo de papa (Anexo A 1) ubicadas en el corregimiento de Gabriel López (Totoró, Cauca) a 30 km de Popayán, a una altura de 3100 msnm, con temperaturas que varían entre 7 °C y 12 °C, con las siguientes coordenadas geográficas: parcela 1: 2° 30´ 39,1´´N 76° 16´ 14,7´´W, parcela 2: 2° 30´ 40, 6´´N 76° 16´ 14,9´´W, parcela 3: 2° 30´ 21,7´´N 76° 16´ 14,7´´W, parcela 4: 2° 35´ 08,52´´N 76° 16´ 07,12´´ W.

6.2 TOMA DE MUESTRAS

6.2.1 Para análisis de las características físicas y químicas

La toma de muestras se realizó según el modelo de retícula fija o cuadrícula, se seleccionaron cuatro parcelas (Ver Anexo A 1) teniendo en cuenta condiciones como el uso de suelo, topografía, grado de inclinación y manejo de cultivo, se delimita un área de 20 x 20 m, la recolección se realizó a una profundidad de 20 cm y 5 m de distancia entre cada punto para obtener un total de 25 submuestras con las que se formó una muestra compuesta de cada una de las parcelas.

6.2.2 Para análisis de distribución y movilidad de cobre

En este caso el muestreo se lleva a cabo aleatoriamente en columnas de lixiviación (5.08 cm x 30 cm) construidas con tubos de PVC las muestra de suelo fueron recolectadas sin disturbar a 5 cm de profundidad cada una, enterrando una sobre otra hasta alcanzar una profundidad de 30 cm, también se tomó el suelo que se encuentra alrededor de las columnas. Cada fracción de las columnas se envolvió en plástico Strech (Vinipel) y se almacenaron bajo refrigeración hasta su posterior análisis en el caso de las muestras de suelo de los alrededores se realizó el mismo tratamiento que a las muestras de las parcelas que se describirá a continuación.

6.3 MANEJO DE MUESTRAS EN EL LABORATORIO

Las muestras se secaron a temperatura ambiente durante aproximadamente 15 días evitando la exposición directa al sol, por lo cual se extendieron homogéneamente sobre papel limpio (Ver Anexo A 2). Una vez las muestras se

encontraron secas se procedió a macerar, posteriormente se pasaron por un tamiz con tamaño de orificio es de 2 mm (malla # 10) (Ver Anexo A 3), finalmente se homogenizaron y se guardaron en recipientes de vidrio con boca ancha limpios y secos; y se almacenaron en un lugar fresco y seco.

Previo a cada uno de los análisis se realizó el procedimiento de cuarteo hasta obtener la fracción de suelo según fuera requerida por el método de análisis a realizar en la determinación de las propiedades físicas y químicas.

6.4 PROPIEDADES FÍSICAS Y QUÍMICA DEL SUELOS

La caracterización de las propiedades físicas y químicas del suelo se realizó de acuerdo a lo establecido por la Norma Técnica Colombiana NTC ISO/IEC 17025:2005 siguiendo la metodología descrita por el Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC) [32] y estandarizada en el laboratorio de Agroquímica de la Universidad del Cauca. Esta metodología comprende las siguientes determinaciones:

6.4.1 Análisis Físicos

➤ Humedad Higroscópica

El agua es un factor fundamental para el desarrollo de la vida de plantas, animales y humanos. En el caso particular de las plantas su principal fuente y reservorio de agua es el suelo, una medida del contenido de agua en el suelo es la humedad del mismo, esta característica está influenciada por factores como las condiciones climáticas, la cobertura vegetal y por las propiedades del suelo. En el suelo existen diferentes clasificaciones para el agua dependiendo de la disponibilidad de esta para ser tomada por la planta, en este caso se realizó la medida de la humedad higroscópica que se refiere al agua en estrecho contacto con la fase sólida, está es retenida con gran fuerza en la superficie de las partículas y no puede ser utilizada por la planta [33].

La determinación de la humedad higroscópica se realizó utilizando el método gravimétrico que consistió en someter una muestra previamente pesada a calentamiento en una estufa Binder WTC a una temperatura de 105 °C durante 24 horas hasta alcanzar un peso constante, procedimiento en el cual se busca eliminar el agua superficial presente en la muestra y se establece una relación entre la masa de agua y la masa de sólidos del suelo. La humedad higroscópica se expresa en porcentaje.

➤ **Densidad Aparente**

Para la determinación de la densidad aparente se usaron cilindros de aluminio con peso y diámetro conocido, los cuales fueron introducidos en el horizonte A de cada parcela en el sitio de muestreo saturándose con suelo no disturbado, se enrazó con una espátula metálica y se selló con sus respectivas tapas. Este procedimiento se realizó dos veces en cada parcela en puntos elegidos aleatoriamente. Los cilindros se llevaron a laboratorio y se sometieron a calentamiento a una temperatura de 105 °C durante 24 horas en una estufa Binder WTC, se dejaron enfriar hasta temperatura ambiente en desecador y se pesó nuevamente. La densidad aparente se expresó en g de suelo/ volumen de suelo y se determinó de la siguiente manera:

En primer lugar se determinó el volumen del cilindro considerando las dimensiones ya conocidas de acuerdo con la ecuación 3:

$$V_{CILINDRO} = \pi r^2 h \quad \text{(Ecuación 3)}$$

Siendo **r** el radio del cilindro y **h** la altura del mismo

Entonces, la densidad aparente está dada por la ecuación 4:

$$\text{Densidad aparente} = \text{suelo seco (g)} / \text{Volumen suelo seco (cm}^3\text{)} \quad \text{(Ecuación 4)}$$

➤ **Textura**

La textura de un suelo está dada por el contenido de arenas, limos y arcillas (partículas de diámetro menor a 2 mm) que se encuentra en una masa de suelo determinada. Esta característica se determinó por medio del método del Bouyoucos que se basa en la medida de la densidad de una suspensión de suelo por medio de un hidrómetro ASTM HYDR Fisher Brand, la cual varía a medida que las partículas en suspensión precipitan. El tiempo que tarda en precipitar cada partícula depende de su tamaño por lo cual se realizan dos lecturas a diferentes tiempos. La primera medida se realizó a los 40 segundos, lectura que corresponde a partículas mayores a 50 micras es decir a la sedimentación de arenas midiéndose así la densidad de limos y arcillas, la segunda medida se realizó a las dos horas que corresponde a la sedimentación de las partículas mayores a 5 micras es decir los limos midiéndose entonces la densidad de las arcilla, finalmente la cantidad de limos se establece por diferencia. Una vez obtenidos los porcentajes de arenas, limos y arcillas se ubicaron en el triángulo de textura para determinar la textura del suelo.

El método se fundamenta en la ley de Stokes que dice que la velocidad de caída de las partículas de diferente tamaño en un medio líquido es directamente proporcional al cuadrado del radio de la partícula de donde $V = k \times r^2$.

6.4.2 Análisis químicos

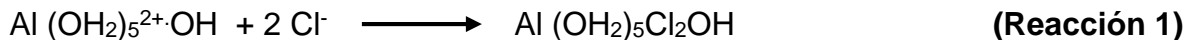
Los análisis químicos comprenden las siguientes determinaciones:

➤ pH

La determinación de pH se realizó por el método potenciométrico utilizando un pH-metro METROHM E-774 con electrodo combinado de vidrio para medir la suspensión suelo: agua en relación 1:2 que se agitó intermitentemente durante una hora, una vez terminado este tiempo se realizó la lectura.

➤ Acidez y Aluminio Intercambiable

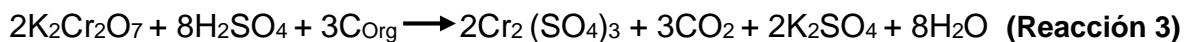
Para la determinación de la acidez y el Al intercambiable se realizó el desplazamiento de los iones H^+ y Al^{3+} de la fase coloidal del suelo utilizando una solución neutra de Cloruro de Potasio (KCl), posteriormente los iones desplazados se determinaron volumétricamente mediante una titulación con Hidróxido de Sodio (NaOH) usando como indicador la fenolftaleína, al realizar esta titulación en la solución se produce $Al(OH_2)_5^{2+}$ lo que permite la valoración de los iones Al^{3+} presentes en forma hidratada según las siguientes reacciones 1 y 2:



El NaOH fue titulado con Ácido Clorhídrico (HCl), teniendo en cuenta que la cantidad de NaOH es directamente proporcional al contenido de Al^{3+} el número de miliequivalentes de HCl empleados para neutralizar el NaOH es igual a los miliequivalentes de Al^{3+} . La acidez intercambiable menos el aluminio intercambiable es igual a la acidez de hidrógeno.

➤ Carbono Orgánico y Materia Orgánica

La determinación del contenido de carbono orgánico realizó mediante el método de Walckley Black con determinación colorimétrica, el cual se basa en la oxidación del carbono orgánico presente en el suelo usando como agente oxidante el dicromato de potasio ($K_2Cr_2O_7$) 1N en medio ácido, proceso que se describe en la reacción 3. Las muestras se dejaron en reposo durante 12 horas, una vez transcurrido ese tiempo se realizó la lectura de cada muestra en un espectrofotómetro SPECTRONIC GENESYS 20® visible a 585nm.

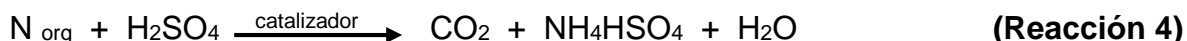


El contenido de carbono orgánico (%C_{org}) en la muestra de suelo se obtuvo al interpolar el valor de absorbancia en una curva de calibración realizada con sacarosa en el rango de 0.84, 1.68, 3.36, 4.2, 6.3, y 8.4 mg de C_{org}. El contenido de MO se determinó multiplicando el %CO por 1.724.

➤ **Determinación de Nitrógeno.**

El método Kjeldahl es empleado universalmente para la determinación cuantitativa de nitrógeno procedente de diversos materiales; este método se realiza en tres etapas que son la oxidación de la muestra, la descomposición del sulfato ácido de amonio y finalmente la titulación del borato de amonio, cada una de las etapas se describen a continuación:

- ✓ **Oxidación de la muestra:** Las muestras de suelo fueron tratadas separadamente con H₂SO₄ y una mezcla catalizadora de CuSO₄, Selenio y K₂SO₄ con el propósito de oxidar la materia orgánica y convertir el nitrógeno en sulfato ácido de amonio según la reacción 4

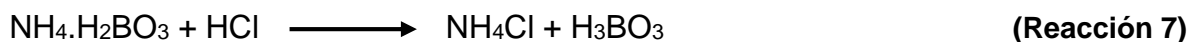


Las muestras fueron tratadas en un digestor BÜCHI B-426 hasta obtener una solución incolora.

- ✓ **Descomposición del sulfato ácido de amonio:** El sulfato de amonio se descompone con exceso de álcali para liberar el amoníaco, el cual se recogió por destilación sobre ácido bórico, como se muestra en las reacciones 5 y 6

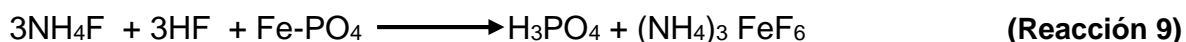
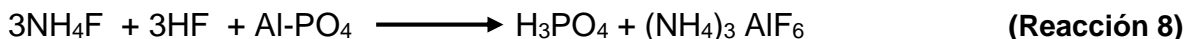


- ✓ **Titulación del borato de amonio:** El borato de amonio formado en el paso anterior se valoró con HCl 0.1 N utilizando un indicador mixto que es la mezcla de rojo de metilo y verde de bromocresol, (reacción 7).

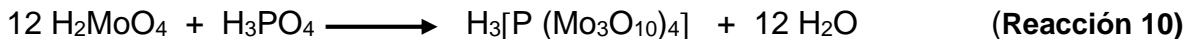


➤ **Determinación de fósforo disponible.**

El método más apto para esta determinación de fósforo en suelos ácidos es el de Bray II, en el que se utilizó como solución extractora NH_4F (0.03N)- HCl (0.1N), proceso que se describe a través de las reacciones 8 y 9



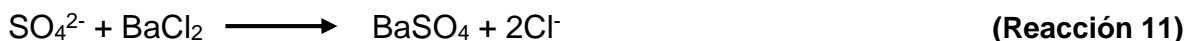
El fósforo extraído es determinado colorimétricamente utilizando el método cloro-molibdico que consiste en hacer reaccionar una solución de HCl - $(\text{NH}_4)_6\text{Mo}_7\text{O}_{24}\cdot 4\text{H}_2\text{O}$ con H_2MoO_4 , posteriormente, este ácido molibdico reacciona con el ácido fosfórico de acuerdo a reacción 10.



El heterocompuesto $[\text{P}(\text{Mo}_3\text{O}_{10})_4]$ formado es incoloro, por lo cual se redujo con ácido ascórbico para formar un compuesto de color azul que absorbe a 660nm el cual es determinado mediante un espectrofotómetro visible SPECTRONIC GENESYS 20.

➤ **Determinación de azufre disponible.**

La determinación de azufre disponible en suelos ácidos se realiza turbidimétricamente, este método consistió en extraer el azufre soluble y el débilmente absorbido utilizando una solución extractora de Fosfato de Calcio, donde el anión H_2PO_4^- desplaza al anión SO_4^{2-} adsorbido en la fase coloidal y en la materia orgánica, forzándolo a pasar a la solución. Para la cuantificación el extracto con sulfato libre reacciona con BaCl_2 de acuerdo a la reacción 11.



Una vez se obtiene el sulfato de bario, este interacciona con el reactivo turbidimétrico que actúa como coloide protector formando flóculos permitiendo que las partículas de sulfato de bario queden suspendidas en la solución de tal manera que la turbidez de está es proporcional al contenido de sulfato. La determinación de la turbidez se hizo en un espectrofotómetro visible SPECTRONIC GENESYS 20 midiendo la transmitancia.

➤ **Determinación de Microelementos.**

La determinación de los micro elementos hierro, manganeso y zinc, se realizó mediante extracción con Dietilén triamino pentaacetato (DTPA) el cual es un agente quelante que atrapa a los elementos extrayéndolos de la solución del suelo para su posterior cuantificación por absorción atómica en el equipo Thermo® serie S4SN71203.

➤ **Determinación de la Capacidad de Intercambio Catiónico (CIC).**

Consistió en reemplazar todas las posiciones de intercambio de la muestra de suelo seco y tamizado, por el ion amonio NH_4^+ y su posterior desplazamiento con una solución de cloruro de sodio (NaCl) al 10 % obteniéndose cloruro de amonio NH_4Cl en solución, donde en presencia de formaldehído forma un complejo nitrogenado y HCl, el cual se tituló con NaOH 0,1 N. (Reacción 12).



➤ **Determinación de las bases de cambio.**

La determinación de las bases de cambio correspondientes a calcio, magnesio, sodio y potasio, se realizó a partir del primer extracto del tratamiento con acetato de amonio (AcONH_4) de la determinación de la capacidad de intercambio catiónico, la cuantificación se realizó por espectrofotometría de Absorción Atómica, en el equipo Thermo® serie S4SN71203.

➤ **Cu pseudo-total.**

Se determinó el contenido de cobre pseudo-total en las muestras de suelo, mediante una digestión ácida del suelo con una mezcla de ácido perclórico: nítrico (1:3), calentando a fuego lento hasta sequedad, el proceso se repitió tres veces, posteriormente se filtró el residuo y se aforó a 50 mL. La cuantificación del Cu se realizó por espectrofotometría de Absorción Atómica en el equipo Thermo® serie S4SN71203.

➤ **Fraccionamiento de la materia orgánica del suelo (MOS).**

Se realizó por el método granulométrico [25]. Este método se basa en la disgregación de los agregados por medio de un tratamiento mecánico que permita obtener microagregados y complejos orgánico-arcillosos que son separados posteriormente mediante granulometría según el procedimiento descrito en la Figura 5 garantizando con este método la menor desnaturalización de las sustancias

húmicas. La fracción de la MOS separada físicamente está compuesta por restos de plantas, animales y microorganismos en diferentes estados de descomposición. Esta mezcla heterogénea hace que su composición sea muy variable y sea considerada un intermedio entre los residuos frescos de los cultivos y la MOS estabilizada [34].

Este método se basa en la diferencia del tamaño molecular de la MOH (menor de 53 μm) y MOF o no humificada (mayor de 106 μm), separadas en un tamizaje en húmedo mediante un tamizador automático Retsch As200. La separación de la MOH de la MOF se inició sometiendo una suspensión suelo: agua (1:6) a agitación mecánica en un test de jarras, seguidamente esta suspensión fue tamizada en húmedo con agua destilada en tamices de 106 y 53 μm en un tamizador vertical Restch a 60 MHz de potencia. La suspensión obtenida correspondía a la MOH.

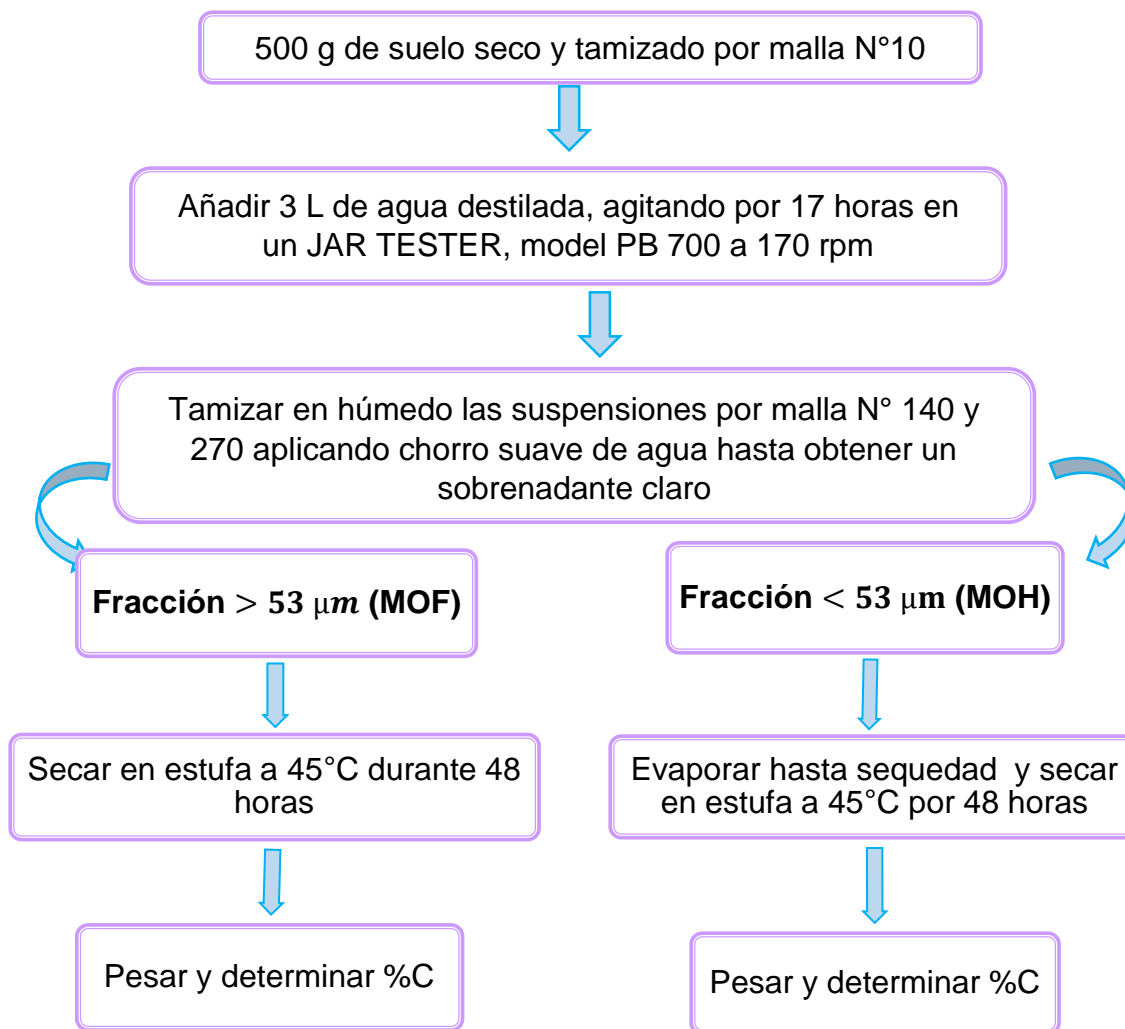


Figura 5. Diagrama de separación Granulométrica de la MO.

6.5 Evaluación de la disponibilidad de cobre

Se realizó la determinación de cobre disponible haciendo una extracción con Dietilén triamino pentaacetato (DTPA) que extrae el cobre en solución y el débilmente unido a la fase coloidal del suelo, este procedimiento se realizó por triplicado. La determinación de cobre se hizo mediante espectroscopia de absorción atómica Thermo® serie S4SN71203.

6.6 Evaluación de la distribución de cobre

Para conocer la distribución de cobre en un perfil de suelo se utilizó el método de columna saturada, para lo cual se construyen columnas de PVC de 30 cm de profundidad formada por seis cilindros de PVC cada uno de 5 cm de alto que contienen suelo de la respectiva profundidad, los cilindros se saturaron por capilaridad con una solución de Cloruro de Calcio (CaCl_2) 0.01 M. Una vez realizado este procedimiento se dispusieron las columnas verticalmente (Ver Anexo A 4), como soporte en la parte inferior de la columna se colocó fibra de vidrio y arena previamente lavada y tratada con ácido sulfúrico, se selló con una tapa que presenta un orificio por donde sale y se recoge el lixiviado. El dopaje se realizó adicionando 5 mL de una solución de cloruro de cobre (CuCl_2) que contiene 400 mg /L Cu, una vez se finalizó el proceso de dopaje se realizó la simulación de lluvia con una solución de CaCl_2 0.01M durante 24 horas, dosificando el flujo a 0.2 mL por minuto.

Se realizaron tres eventos de lluvia, con una intensidad de 100 mm, dejando pasar 12 h entre cada evento. [35]

6.7 Evaluación de la movilidad de cobre

La evaluación de la movilidad de cobre se realizó a través del procedimiento de extracción secuencial de Tessier que consistió en someter una muestra de suelo a cinco extracciones sucesivas con diferentes extractantes en orden creciente de fuerza de extracción. Se determinaron las siguientes fracciones:

La fracción 1 (F1) que corresponde al cobre adsorbido e intercambiable utilizando como extractante Cloruro de Magnesio (MgCl_2) 1M a pH 7 y se sometió a agitación continua durante una hora, posteriormente se centrifugó durante 10 min a 10000 rpm, se decantó, filtró y diluyó a 50 mL obteniendo finalmente F1.

En la fracción 2 (F2) al residuo de la etapa anterior se adicionó acetato de sodio (CH_3COONa) 1M a pH 5 ajustando el pH con ácido acético (CH_3COOH), se agitó continuamente durante 5 horas a temperatura ambiente, se centrifugó durante 10

min a 10000 rpm, se filtró y diluyó a 50 mL con agua destilada obteniendo la F2 que corresponde a cobre unido a carbonatos.

El residuo insoluble de la etapa anterior, se trató con $\text{NH}_2\text{OH}\cdot\text{HCl}$ 0,04M al 25% con ácido acético se calentó la mezcla a 96 °C y se mantiene a esa temperatura durante 6 horas con agitación intermitente, se centrifugó durante 10 min a 10000 rpm, se filtró y diluyó a 100 mL, obteniendo F3 correspondiente a el cobre unido a óxidos amorfos

Al residuo sólido procedente de la etapa anterior se le trató con ácido nítrico (HNO_3) y peróxido de hidrogeno (H_2O_2) (al 30% y $\text{pH}= 2$ con HNO_3). La mezcla se calentó hasta 85 °C y manteniendo esa temperatura durante dos horas con agitación ocasional. Se añadió más H_2O_2 y mantuvo 85 °C por 3 horas con agitación intermitente. Se enfrió la mezcla y se añadió acetato de amonio ($\text{CH}_3\text{COONH}_4$) 3,2 M en HNO_3 al 20% se diluyó hasta 20 mL con agua destilada y se mantiene 30 minutos en agitación continua. Se centrifugó durante 10 min a 10000 rpm, se filtró y diluyó a 100 mL con agua destilada, obteniendo F4 que corresponde al cobre unido a la materia orgánica.

El residuo sólido resultante de la extracción anterior se trató con HNO_3 concentrado y ácido perclórico (HClO_4) hasta sequedad. Se recogió con solución tampón $\text{CH}_3\text{COOH}/ \text{CH}_3\text{COONa}$ a pH 4,5, se filtró y diluyó hasta 100 mL con agua destilada, obteniendo F5 que corresponde al cobre residual.

Cada una de las fracciones obtenidas en el proceso se cuantificaron mediante espectroscopia de absorción atómica de llama Thermo® serie S4SN71203.

Finalmente se determinó el factor de movilidad (FM) teniendo en cuenta que $\text{FM} = (\text{F1} + \text{F2}) / (\text{F1} + \text{F2} + \text{F3} + \text{F4} + \text{F5}) * 100$ [28]

6.8 Diseño Experimental

6.8.1 Evaluación de la movilidad de cobre.

Para evaluar la movilidad de cobre en suelo mediante extracción secuencial de Tessier, se utilizó un diseño totalmente al azar donde los factores o variables independientes fueron: parcelas, tipo y especie de metal y la variable dependiente es: la concentración de cada especie de metal en el suelo.

Para el análisis de los datos se aplicaron pruebas de modelo lineal multivariable, pruebas de comparaciones múltiples (Duncan), utilizando un nivel de significancia de 0.05, también comparación de medias ANOVA de un factor y correlaciones de Pearson para determinar la relación entre variables. Todos estos análisis fueron procesados en el programa estadístico SPSS 20 versión 23 con un nivel de confianza > 95 %

6.8.2 Evaluación de la distribución de cobre

Para evaluar la distribución de cobre en suelo, mediante el método de columna saturada, se realizó un diseño factorial multivariable, donde los factores o variables independientes fueron: parcelas, columnas, profundidad y tipo de metal. Las variables dependientes fueron: la concentración del metal en el suelo. El diseño comprendió 4 parcelas x 2 columnas (CA, CB, CC, CD, CE, CF, CG, CH) x 6 profundidades (0 – 5 cm, 5 – 10 cm, 10 – 15 cm, 15 – 20 cm, 20 – 25 cm, 25 – 30cm) x 1 metal (cobre) para un total de 192 tratamientos con tres réplicas por tratamiento. Este tratamiento se describe en la Figura 6.

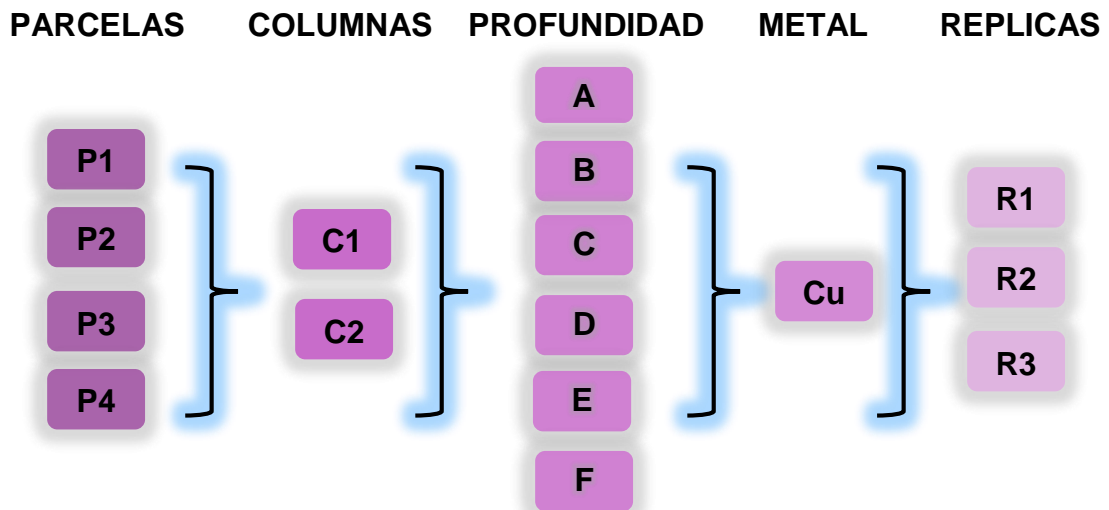


Figura 6. Diagrama del diseño experimental distribución de cobre.

7 ANÁLISIS DE RESULTADOS

Es importante conocer el manejo del cultivo y establecer claramente las características de las parcelas que pueden influir en las propiedades del suelo y por tanto en el análisis de los resultados presentados en este trabajo.

Según la información entregada por los agricultores, al suelo antes de ser sembrado se le realiza un proceso de encalado con Cal viva o Dolomita según sea la consideración del agricultor adicionando 10 bultos/ ha. En el momento de la siembra se adiciona Abocol N: P: K 10:30:10 en relación bulto a bulto es decir, por cada bulto de papa a sembrar se adiciona un bulto de abocol. La muestra de suelo es recolectada cuando las parcelas 1 y 2 presentan aproximadamente 3 meses y medio de siembra y las parcelas 3 y 4 ya han sido cosechadas. Mediante observación directa en el momento del muestreo se puede notar que el suelo es abonado con estiércol de vaca.

7.1 PROPIEDADES FÍSICAS Y QUÍMICAS.

La interpretación de las propiedades físicas y químicas se realizó teniendo en cuenta los datos reportados en el Boletín del Manejo Integral del Suelo y la Nutrición Vegetal del Laboratorio de Suelos de la Facultad de Ciencias de la Universidad Nacional de Colombia – Sede Medellín [36] y en el texto fundamentos para la interpretación de análisis de suelos, plantas y aguas para riego [29] (Ver Anexo B).

Los resultados obtenidos en la determinación de las propiedades físicas y químicas de las cuatro parcelas de suelo analizadas se encuentran consignados en la Tabla 1. Los resultados son expresados en base seca teniendo en cuenta la humedad higroscópica y son el producto de tres réplicas.

De las 26 propiedades físicas y químicas evaluadas las parcelas 1 y 2 muestran diferencias significativas según las pruebas de Duncan (Anexo C) en 24 pruebas es decir en un 92.31 % mientras que las parcelas 3 y 4 presentan diferencias significativas en 16 pruebas, es decir, en un 61.54 %, lo que indica que cuantitativamente estas parcelas son diferentes entre sí, sin embargo, las parcela 1 y 2 presentan el mismo comportamiento en 13 de las propiedades evaluadas (50 %) y en el caso de las parcelas 3 y 4 el comportamiento es similar en un 65.38 %. Esto nos indica que muy probablemente el tratamiento que se hace a estas parcelas no es de manera uniforme dando como resultado grandes diferencias entre las propiedades de las mismas.

La humedad higroscópica presenta diferencias significativas entre las cuatro parcelas siendo la parcela 4 la que mayor contenido de humedad presenta a pesar de su alto contenido de arena, por lo cual se relaciona esta humedad al alto contenido de materia orgánica humificada la cual tiene la capacidad de almacenar

y retener agua, esto se comprueba con la correlación de Pearson positiva y significativa (0.658) entre la HH y MOH (Ver Anexo C-1)

Tabla 1. Propiedades físicas y químicas del suelo

| PROPIEDADES FÍSICAS | | | | |
|---|---------------------|---------------------|----------------------|----------------------|
| Características | Parcela 1 | Parcela 2 | Parcela 3 | Parcela 4 |
| Humedad H. (%) | 14.78 ^c | 14.60 ^b | 13.55 ^a | 16.64 ^d |
| Densidad Aparente (g/ cm ³) | 0.55 ^b | 0.48 ^a | 0.63 ^c | 0.49 ^a |
| Tipo | Franco arenosa | Franco arenosa | Arenosa franco | Franco arenosa |
| Textura | Arenas (%) | 67.70 ^a | 60.17 ^b | 79.42 ^c |
| | Arcillas (%) | 16.18 ^c | 11.40 ^b | 9.07 ^a |
| | Limos (%) | 16.12 ^b | 28.43 ^c | 11.51 ^a |
| PROPIEDADES QUÍMICAS | | | | |
| pH | 4.13 ^a | 4.60 ^c | 4.57 ^b | 4.57 ^b |
| CO (%) | 35.57 ^a | 38.13 ^c | 41.28 ^d | 37.41 ^b |
| MO (%) | 61.32 ^a | 65.74 ^c | 75.15 ^d | 64.50 ^b |
| NT (%) | 1.44 ^d | 1.39 ^c | 1.10 ^b | 1.06 ^a |
| C/N | 24,70 ^a | 27,43 ^b | 37,53 ^d | 35,29 ^c |
| P Dis (mg/Kg) | 135.41 ^c | 84.15 ^b | 53.96 ^a | 81.81 ^b |
| S (mg/ Kg) | 7.11 ^c | 3.44 ^a | 4.35 ^b | 4.63 ^b |
| Acidez Interc. (meq/ 100g) | 8.04 ^c | 6.86 ^a | 8.32 ^d | 7.80 ^b |
| Al interc. (meq/ 100g) | 6.92 ^b | 5.92 ^a | 6.95 ^b | 7.20 ^c |
| H ⁺ interc. (meq/ 100g) | 1.12 ^b | 0.94 ^b | 1.38 ^c | 0.61 ^a |
| CIC (meq/ 100g) | 64.02 ^d | 55.61 ^b | 61.50 ^c | 53.59 ^a |
| Bases de cambio (meq/ 100g) | Ca | 0.12 ^a | 0.18 ^b | 0.11 ^a |
| | Mg | 0.31 ^a | 0.42 ^b | 0.30 ^a |
| | Na | 0.0057 ^a | 0.00213 ^b | 0.00743 ^c |
| | K | 3.05 ^c | 2.57 ^b | 1.78 ^a |
| Microelementos (mg/ Kg s) | Cu | 0.25 ^b | 0.31 ^c | 0.21 ^a |
| | Fe | 209.87 ^a | 276.89 ^b | 202.83 ^a |
| | Mn | 0.95 ^a | 1.49 ^b | 0.91 ^a |
| | Zn | 0.16 ^c | 0.25 ^b | 0.10 ^a |
| Cu Pseudototal (mg/ Kg s) | 65.95 ^b | 65.62 ^b | 63.36 ^a | 67.37 ^b |
| MOH (%) | 60,33 ^d | 45,42 ^b | 43,79 ^a | 57,23 ^c |
| MOF (%) | 36.55 ^b | 53.42 ^d | 50.92 ^c | 33.69 ^a |
| MOH/ MOF | 1.65 ^c | 0.85 ^a | 0.86 ^b | 1.69 ^d |

* Letras diferentes en sentido horizontal difieren significativamente (p< 0.05). Prueba de Duncan (Anexo C-1)

En cuanto al pH se presenta valores entre 4.13 - 4.60 que se clasifican como suelos de acidez extrema en gran parte aportada por el elevado contenido de aluminio intercambiable que se presenta (5.92 – 7.20).

Se encontraron deficiencias en el contenido disponible de azufre, bases de cambio (Na, Ca y Mg) y microelementos como el Cu, Zn y Mn disponible; por el contrario existe una alta CIC, exceso en el contenido disponible de P, K, Fe y de Al

intercambiable, NT, CO y MO. La deficiencia de estos metales es un claro indicio de que se pueden estar presentando un fenómeno de retención de metales debido a la acción de la materia orgánica y a los compuestos de Fe y Al que tiene esta capacidad.

La relación C/N está por encima de lo establecido indicando que no hay un buen proceso de mineralización por lo cual se está presentando una acumulación de MO lo que justifica el alto contenido de materia orgánica en las parcelas

Por otro lado los resultados reflejan los procesos de fertilización del suelo según la información recolectada en las salidas de campo, pues el alto contenido de materia orgánica se debe al abono con estiércol de vaca el cual era notable en el momento de la recolección de las muestras, así mismo, el alto contenido de N, P y K procedente del producto abocol.

7.2 Evaluación de la disponibilidad de cobre.

Se realizó la determinación de Cu disponible mediante una extracción con dietilén triamino pentaacetato (DTPA), que extrae la fracción de Cu que se encuentra en la solución del suelo y la débilmente adsorbida. Esta fracción extraída proporciona una estimación del Cu potencialmente disponible, sin embargo, es una sobreestimación de la fracción biodisponible (fracción que es absorbida por las plantas).

Los resultados obtenidos se encuentran consignados en la Tabla 1 y representados en la Figura 7, observando que el contenido de cobre disponible en las cuatro parcelas analizadas es bajo, incluso se encuentra por debajo de los rangos recomendados para un suelo agrícola (Ver Anexo B-3), lo que hace pensar que el suelo presenta deficiencias de cobre. Sin embargo, al analizar el contenido de Cu pseudo total se encuentra en un nivel de investigación recomendable según los umbrales españoles para suelos agrícolas establecidos por la Consejería de medio ambiente de la junta de Andalucía [37] (Ver Anexo B-5), indicando que hay acumulación de Cu y que existen propiedades del suelo que están reteniendo el Cu de tal manera que se presentan deficiencias en la disponibilidad del mismo. En la Figura 8 se puede evidenciar la gran diferencia que existe entre el contenido de Cu pseudo total y el Cu disponible.

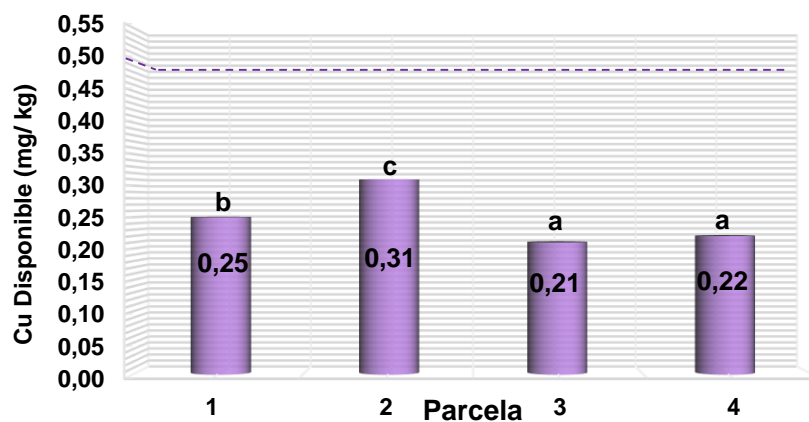


Figura 7. Contenido de cobre disponible en las parcelas. La línea discontinua en la gráfica indica el límite inferior del rango establecido para cobre disponible en suelos agrícola

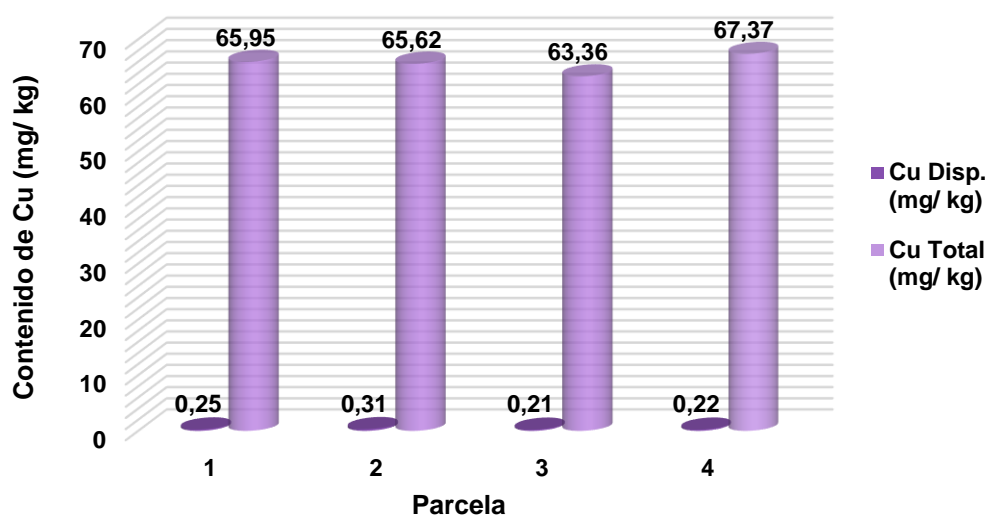


Figura 8. Gráfica comparativa del contenido de Cu pseudototal y el Cu disponible en las parcelas.

Según lo reportado en la literatura las principales características del suelo que influyen en la disponibilidad del Cu son el pH, CIC, MO, el contenido de arcillas, óxidos de Fe y Mn [38].

El aumento de pH genera un mayor número de sitios cargados negativamente sobre la superficie aumentando así la capacidad de adsorción del suelo y por tanto disminuye la disponibilidad de Cu. Sin embargo, este no es el factor causante de la deficiencia de Cu encontrada en el suelo, debido a que las parcelas analizadas presentan un pH extremadamente ácido en los que se presenta una mayor disponibilidad del metal. En la Tabla 1 se puede encontrar el contenido de Fe y Mn

disponible presente en las parcelas analizadas, según lo establecido para suelos agrícolas (Ver Anexo B-3), el contenido de Mn se encuentra por debajo de lo requerido, haciendo evidente el antagonismo existente con el Fe, pues este por el contrario se encuentra por encima de los rangos establecidos, sin embargo con estos valores no se puede determinar la influencia de los óxidos de Fe y Mn sobre la disponibilidad de Cu. De igual manera en la Tabla 1 se registran los valores para el contenido de arcillas evidenciando que es relativamente bajo entre 9.07 y 16.18 %, sin embargo la capacidad de retención que tienen es significativa por lo cual podría considerarse uno de los factores que influyen sobre la baja disponibilidad del Cu.

Finalmente, el alto contenido de MO es uno de los factores que más influye sobre la disponibilidad de Cu debido a la afinidad que tiene la MO para formar complejos altamente estables con este metal, en mayor proporción con la MOH considerando esta propiedad como la principal causante de la retención de Cu y en consecuencia de la deficiencia de la disponibilidad del mismo. [39]

En la Tabla 2 se observa que existe una correlación negativa y significativa entre el contenido de Cu disponible y la MO (-0.307), MOH (-0.184), CIC (-0.204), que indica que un mayor contenido de estas propiedades determinarían un menor contenido de Cu disponible, por el contrario hay una correlación positiva y significativa entre el contenido de Cu disponible y la MOF (0.428), indicando que entre mayor contenido de MOF haya en un suelo mayor será la disponibilidad de Cu, ya que la MOF no ha sufrido el proceso de humificación por tanto no presenta la capacidad de formar complejos con el metal y no podrá ser retenido. También se puede observar una correlación negativa y significativa entre el contenido de Cu disponible y la CIC (-0.204), debido a que al aumentar la CIC indica un mayor número de cargas negativas con la capacidad de adsorber iones de Cu limitando la disponibilidad del mismo, sin embargo no es un factor determinante pues este puede ser liberado a la solución del suelo por intercambio con otro metal presentes en la solución.

Tabla 2. Correlación de Pearson para algunas propiedades que influyen en la disponibilidad de Cu.

| | | Cu Disp. (mg/Kg) | MO (%) | MOH (%) | MOF (%) | CIC (meq /100g) |
|---------------------|---------------------------|---------------------|--------|---------|---------|--------------------|
| Cu Disp. (mg/Kg) | Correlación de Pearson | 1 | -,307 | -,184 | ,428** | -,204 |
| | Sig. (bilateral) | | ,069 | ,284 | ,009 | ,234 |
| | N | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 |

** La correlación es significativa al nivel 0,01 (bilateral).

7.3 Evaluación de la distribución de cobre en un perfil de suelo.

Se realizó la evaluación de la distribución de Cu en un perfil de suelo utilizando el método de columna saturada, analizando la distribución en columnas de suelo no disturbado. El montaje está representado en la Figura 9.

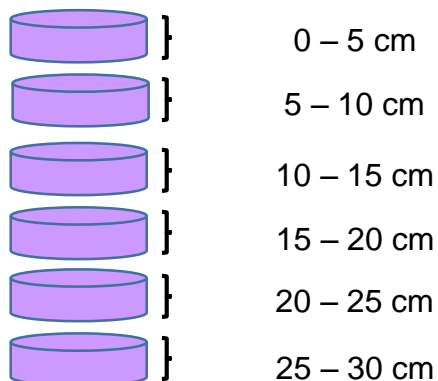


Figura 9. Representación del montaje de las columnas.

Las columnas de suelo no disturbadas son dopadas con 400 mg/ L de Cu utilizando como fuente el Cloruro de Cobre (CuCl_2), seguidamente son sometidas a tres eventos de lluvia, recogiendo un lixiviado en cada uno de los eventos dejando reposar las columnas durante 12 h después de cada evento. Una vez realizados los tres eventos de lluvia se procede a desmontar las columnas, el suelo dentro de cada una de las fracciones que las conforman se seca, para su posterior digestión con una mezcla de ácido perclórico: nítrico (1: 3).

Los resultados obtenidos se encuentran consignados en la Tabla 3 y son el promedio de triplicados para cada profundidad.

Tabla 3. Contenido de cobre en las columnas no disturbadas en las diferentes profundidades después de las tres simulaciones.

| Parcela | Columna | Cu (mg/ kg) | | | | | | |
|---------|---------|------------------|-------|-------|-------|-------|------|------|
| | | Profundidad (cm) | | | | | | |
| | | 0 | 5 | 10 | 15 | 20 | 25 | 30 |
| 1 | A | 69,77 | 41,35 | 10,45 | 12,83 | 8,06 | 3,32 | 3,31 |
| | B | 69,72 | 57,72 | 12,75 | 5,69 | 5,70 | 3,32 | 3,32 |
| 2 | C | 69,49 | 48,19 | 12,75 | 10,36 | 3,30 | 3,30 | 3,30 |
| | D | 69,38 | 29,27 | 12,72 | 10,37 | 10,35 | 3,29 | 3,30 |
| 3 | E | 68,11 | 29,05 | 12,64 | 10,31 | 10,28 | 3,27 | 3,27 |
| | F | 67,24 | 40,57 | 10,24 | 12,62 | 7,96 | 3,27 | 3,27 |
| 4 | G | 70,95 | 59,16 | 13,09 | 5,80 | 5,81 | 3,38 | 3,39 |
| | H | 71,52 | 49,41 | 13,05 | 10,64 | 3,38 | 3,38 | 3,39 |

Los resultados obtenidos nos muestran una tendencia de retención en los primeros centímetros de profundidad, el comportamiento en las columnas para cada una de las parcelas esta representadas en las gráficas 10, 11, 12 y 13, que muestran un alto contenido de Cu entre los primeros 5 cm del perfil, disminuyendo al aumentar la profundidad, siendo este el comportamiento observado en todas las columnas de las cuatro parcelas.

Esto está de acuerdo con el resultado obtenido en la evaluación de la disponibilidad pues teniendo en cuenta que uno de los factores más relevantes en la retención de Cu es la MO y que el mayor contenido de MO se encuentra en los horizontes superficiales es de esperarse que el mayor contenido de Cu se encuentre retenido en los primeros centímetros de las columnas y debido al alto contenido de MO encontrado en las parcelas (Ver Tabla 1), el contenido de Cu retenido debe ser significativamente alto.

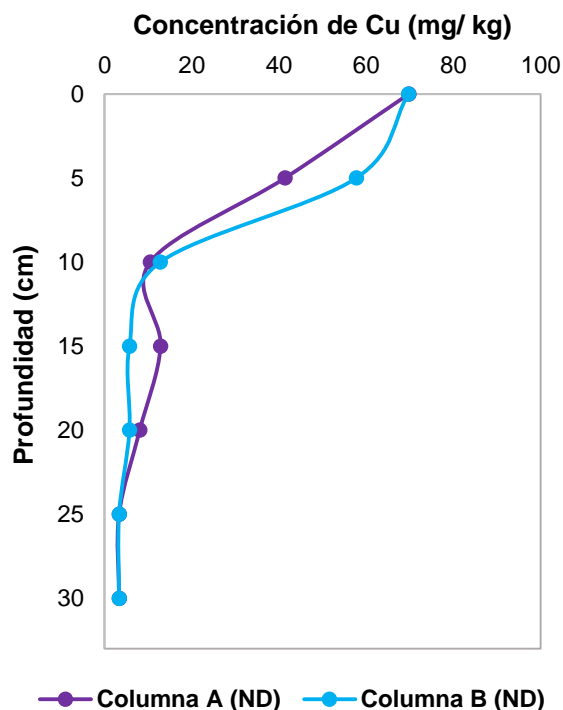


Figura 10. Distribución de cobre en columnas para la parcela 1.

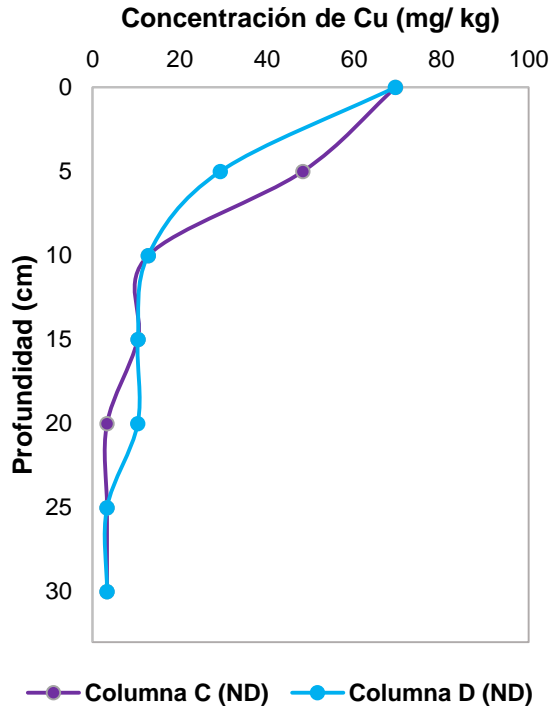


Figura 11. Distribución de cobre en columnas para la parcela 2.

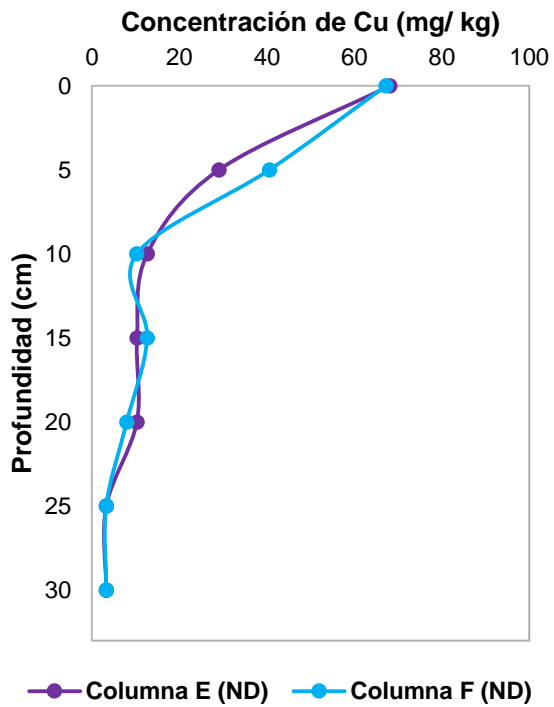


Figura 12. Distribución de cobre en columnas para la parcela 3.

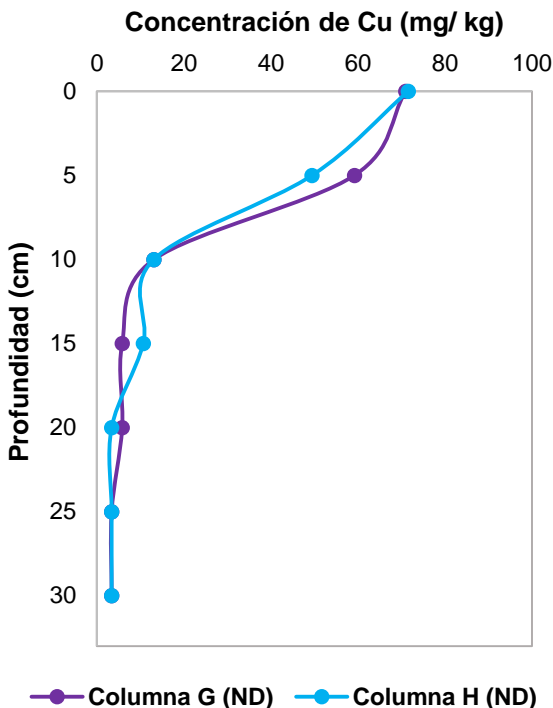


Figura 13. Distribución de cobre en columnas para la parcela 4.

Al aplicar la prueba de Duncan (Tabla 4) se encuentra que hay diferencia significativa en el contenido de cobre en todas las profundidades y que el mayor contenido del mismo se encuentra en los primeros 5 cm para las cuatro parcelas estudiadas, comprobando lo planteado inicialmente.

Tabla 4. Distribución de cobre en columnas no disturbadas en función de la profundidad (Prueba de Duncan $\alpha = 0,05$).

| Profundidad | Subconjunto | | | | |
|-------------|-------------|--------|---------|---------|---------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| 25 | 3,3157 | | | | |
| 30 | 3,3178 | | | | |
| 20 | | 6,8550 | | | |
| 15 | | | 9,8285 | | |
| 10 | | | 12,2112 | | |
| 5 | | | | 44,3398 | |
| 0 | | | | | 69,5228 |
| Sig. | ,997 | 1,000 | 1,000 | 1,000 | 1,000 |

Finalmente, se destaca que el contenido de cobre en los lixiviados no fue detectado, lo que nos indica que el contenido de cobre que pueda perderse por lixiviación es muy bajo, por tanto se descarta una posible contaminación de aguas subterráneas. Sin embargo, se debe tener en cuenta que el hecho de que no se presente cobre en el lixiviado no quiere decir que este no sea un problema de contaminación, pues

todo el cobre que se encuentra retenido en las columnas por procesos de mineralización, puede pasar a la solución del suelo y ser susceptible a los procesos de lixiviación, escorrentía superficial (debido a que la retención se da en los primeros centímetros) o ser absorbido por las plantas.

7.4 Evaluación de la movilidad de cobre.

Al hablar del estudio de la movilidad de cobre en el suelo se hace referencia al fenómeno inverso de la retención, la movilidad es la capacidad o posibilidad que tiene el cobre de desplazarse entre las diferentes fases del suelo, influyendo directamente sobre los problemas de contaminación [40].

La evaluación de la movilidad de cobre en el suelo se realizó a través de la extracción secuencial de Tessier obteniendo como resultado cinco fracciones que comprenden las especies de cobre presente en cada una de las muestras de suelo de las cuatro parcelas estudiadas. En la Tabla 5 se muestran los resultados obtenidos en el proceso de la extracción secuencial de Tessier.

Tabla 5. Resultados extracción secuencial de Tessier.

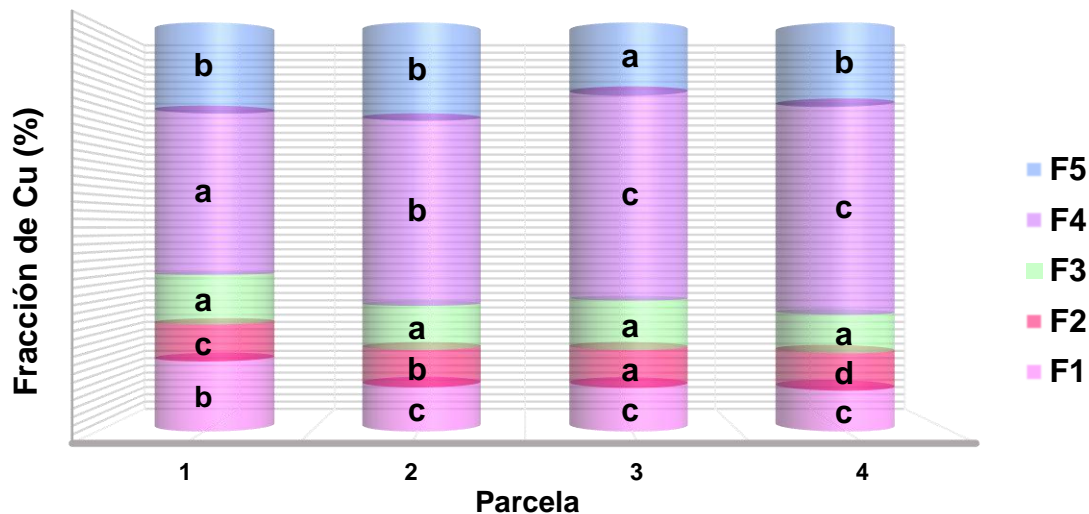
| Parcela | Cu PseuT (mg/ kg) | F1 (mg/ kg) | F2 (mg/ kg) | F3 (mg/ kg) | F4 (mg/ kg) | F5 (mg/ kg) | FM (mg/ kg) | FT (mg/ kg) | % R |
|---------|--------------------|--------------------|-------------------|-------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| 1 | 65,95 ^b | 11,17 ^b | 5,90 ^a | 7,90 ^a | 26,83 ^a | 13,18 ^b | 26,27 ^b | 64,97 ^a | 98,56 ^a |
| 2 | 65,62 ^b | 6,96 ^a | 5,87 ^b | 6,96 ^a | 30,17 ^b | 14,22 ^b | 20,02 ^a | 64,19 ^a | 97,85 ^a |
| 3 | 63,36 ^a | 6,71 ^a | 5,81 ^c | 7,60 ^a | 32,71 ^c | 9,76 ^a | 20,03 ^a | 62,60 ^a | 98,80 ^a |
| 4 | 67,37 ^b | 6,59 ^a | 6,03 ^d | 6,22 ^a | 34,70 ^c | 12,17 ^b | 19,21 ^a | 65,71 ^a | 97,62 ^a |

Cu PseuT: Cobre Pseudo total F1: Intercambiable, F2: Unida a carbonato, F3: Unida a óxidos, F4: Unida a la MO, F5: Residual FM: Factor de movilidad FT: Fracción de cobre total extraída, % R: Porcentaje de recuperación. *Letras distintas en sentido vertical difieren significativamente ($p < 0.05$), Prueba de Duncan (Anexo C-2)

En primer lugar se resaltan, los altos porcentajes de recuperación que se obtuvieron en el proceso y que según la prueba comparativa de Duncan no presenta diferencia significativa entre las cuatro parcelas estudiadas (Ver Anexo C), lo que es un indicativo de la eficiencia del método para la extracción secuencial de cobre en el suelo.

Las fracciones de Cu obtenidas para las parcelas se encuentran representados en la Figura 14, que muestra el porcentaje de Cu presente en cada fracción obtenida en el procedimiento para las cuatro parcelas estudiadas, observando que la fracción F1 es baja, esto lleva a que las cuatro parcelas presenten deficiencias de Cu disponible debido a la continua extracción de este micronutriente por la planta sin que haya reposición del mismo, ya que este es retenido por la fracción mineral del suelo y forma complejos altamente estables con la MO. Esto se ratifica al verificar las fracciones F4 y F5 que corresponden a la fracciones de Cu unida a la MO y la

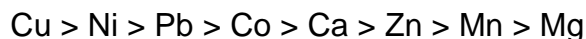
residual respectivamente, ambas son elevadas en las cuatro parcelas constituyendo más del 50 % del Cu presente en el suelo, esto explica porque a pesar de que el suelo tiene una cantidad elevada de Cu pseudo total (Ver Tabla 1) la disponibilidad del Cu es limitada.



F1: Intercambiable, F2: Unida a carbonato, F3: Unida a óxidos, F4: Unida a la MO, F5: Residual. *Letras distintas en sentido vertical difieren significativamente (p < 0.05)

Figura 14. Representación gráfica de las fracciones de cobre en las parcelas de suelo.

Al ser la forma divalente del Cu la mayoritaria en el suelo hace que gran proporción del Cu se encuentre unido a la materia orgánica del suelo y ocluido en las redes cristalinas de los minerales primarios y secundarios, ya que el ion Cu divalente tiene una fuerte afinidad con la materia orgánica del suelo en comparación con otros cationes divalentes como se muestra en la siguiente secuencia:



El cobre puede estar unido en forma quelatada a la materia orgánica, lo que significa que está retenido por enlaces covalentes y coordinados [41], formando complejos con alta estabilidad teniendo en cuenta que los complejos Cu-MO presentan una constante de estabilidad más alta que con metales como el Fe, Zn y Mn según el siguiente orden [42]:

Log K a pH 3.5 Cu (5.78) > Fe (5.06) > Zn (1.73) > Mn (1.47)

Log K a pH 5.0 Cu (8.69) > Fe (5.77) > Mn (3.78) > Zn (2.34)

En consecuencia, el Cu que se encuentra unido a la MO y ocluido en las arcillas, esta tan fuertemente retenido que serán poco móviles.

Por otro lado F3 presenta un valor bajo lo que indica que no hay retención significativa por parte de los óxidos de Fe y Mn presentes en este tipo de suelos derivados de cenizas volcánicas, a pesar del elevado contenido de Fe presente en las cuatro parcelas (Ver Tabla 1) por lo tanto, el Fe podría estar causando problemas de contaminación que deben ser objeto de estudio.

La fracción de Cu unida a carbonatos (F2) es la menor de todas las fracciones obtenidas, debido al bajo contenido de Ca y Mg y los pH fuertemente ácidos de las parcelas lo que obedece a la formación de carbonatos solubles, siendo poco probable que el Cu consiga formar carbonatos que lo retengan.

El bajo contenido de Cu disponible y el elevado contenido de Cu unido a la materia orgánica del suelo da como resultado factores de movilidad bajos (Ver Tabla 5), indicando una baja posibilidad de contaminación por Cu, debido a que este queda retenido formando complejos altamente estables con la materia orgánica, impidiendo su disponibilidad y disminuyendo la probabilidad de lixiviarse a aguas subterráneas pero si, con mayor probabilidad de contaminar aguas superficiales por efecto de la escorrentía superficial.

8 CONCLUSIONES

Tres de las cuatro parcelas analizadas presentan una textura franco arenosa a excepción de la parcela 3 que presenta una textura arenosa franca, las demás propiedades químicas y físicas muestran pH's extremadamente ácidos, altos contenidos de CO, MO, NT, Fe, K, Al, P, altas CIC y bajos contenidos de Ca, Mg, Na, Cu, Zn y S disponibles.

El suelo de las cuatro parcelas analizadas se encuentra recibiendo un tratamiento erróneo y no homogéneo de fertilización ocasionando que se presenten diferencias entre parcelas muy cercanas y excesos de algunos nutrientes presente en el abono utilizado como el N, P y K.

El uso inadecuado de abonos orgánicos como el estiércol de bovino está ocasionando acumulación de la materia orgánica que tiene la capacidad de retener agua y nutrientes, ocasionando problemas en la disponibilidad de los nutrientes para las plantas.

El contenido de Cu pseudo total se encuentra en un nivel de investigación recomendable siendo este un indicativo del uso inadecuado de producto agroquímicos que contienen este metal, que con el paso del tiempo podría generar problemas de contaminación.

Según los resultados obtenidos en este trabajo, no existe riesgo de contaminación de plantas y aguas subterráneas debido a que la disponibilidad de Cu en el suelo es baja en las cuatro parcelas, incluso por debajo de los límites establecidos para suelos agrícolas, por tanto la planta no podrá tomar más de lo que necesita podría incluso presentar problemas por deficiencia de Cu.

Teniendo en cuenta que el mayor coeficiente de correlación de Pearson negativo y altamente significativo (-0.307) corresponde a la MO, siendo este el factor determinante en la retención de Cu en el suelo de las cuatro parcelas analizadas, debido a la formación de complejos órgano-minerales altamente estables con este metal, impidiendo su disponibilidad y movilidad.

La alta relación C/N, indica que no está ocurriendo adecuadamente el proceso de humificación de la MO, por tanto se presenta un bajo contenido de MOH y en contraste un elevado contenido de MO. Sin embargo al ser este el factor determinante en la retención de cobre, se debe tener especial cuidado, pues aunque el cobre presente en el suelo hasta el momento no presente un peligro para las plantas y aguas subterráneas, puede por procesos de mineralización de la MO ser liberado al suelo y generar procesos de contaminación.

Finalmente, tampoco se presentara contaminación de aguas subterráneas debido a que las pérdidas por lixiviación de Cu no fueron detectadas, sin embargo, los estudios de distribución muestran factores de movilidad bajos entre 19,21 y 26,27, evidenciando que el Cu está siendo reteniendo y que dicha retención se presenta en los horizontes superficiales del suelo donde se encuentra el mayor contenido de MO, por lo que se puede presentar contaminación de aguas superficiales por procesos de escorrentía superficial.

9 RECOMENDACIONES

Teniendo en cuenta los resultados obtenidos en este trabajo se recomienda:

La evaluación de los productos agroquímicos utilizados para el tratamiento de las parcelas analizadas, para establecer los productos y las dosis adecuadas que permita generar una alta productividad, manteniendo la calidad del producto y del suelo utilizado para el cultivo garantizando así, la estabilidad económica, ambiental y de salud de los campesinos y familias que dependen del cultivo de papa en la región de Gabriel Lopez.

La evaluación de la velocidad de mineralización de la MO de los suelos analizados para poder establecer la velocidad de liberación de los metales que se encuentran retenidos en ella y así poder establecer el potencial de contaminación por Cu, así como la velocidad con la que el cobre se mueve a través del perfil para establecer el tiempo de permanencia del metal en el suelo y así conocer claramente la posibilidad de contaminación de aguas subterráneas

El estudio de Cu presente en la escorrentía superficial, debido a que la retención del metal se presenta en los horizontes superficiales por tanto podría ser arrastrado hacia fuentes de agua superficiales y ocasionar problemas de contaminación de estas, sobre todo en periodos de lluvias intensas.

El estudio más profundo para establecer umbrales de contenido de cobre y otros metales que se aplican al suelo continuamente como componentes de los agroquímicos, fertilizantes y plaguicidas, en los cultivos de papa de la región y del país que permita establecer políticas claras sobre el uso de productos agroquímicos de las cuales hasta el momento Colombia carece, previniendo así daños ambientales y de salud.

10 BIBLIOGRAFÍA

- [1] A. Kabata-Pendias and H. Pendias, Trace elements in soils and plants, Tercera Ed., vol. 2. Washington, D.C, 2001.
- [2] G. Rueda Saa, J. A. Rodriguez Victoria, and R. Madriñán Molina, “Metodologías para establecer valores de referencia de metales pesados en suelos agrícolas: Perspectivas para Colombia,” *Acta Agron.*, vol. 60, no. 3, pp. 203–218, 2011.
- [3] L. P. Zhang, Z. M. Yang, Z. P. Liu, and S. K. Mehta, “Copper-Induced Proline Synthesis is Associated with Nitric Oxide Generation in *Chlamydomonas reinhardtii*,” *Plant Cell Physiol.*, vol. 49, no. 3, pp. 411–419, 2008.
- [4] Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural, “Cadena de Papa, Indicadores e Instrumentos.” Abril 2017, Bogotá, D.C., 2017.
- [5] Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO), “Gestión de las plagas y enfermedades de la papa,” *Gestión de las plagas y enfermedades de la papa*, 2008.
- [6] M. Ortiz Díez, “Valores de Fondo de Elementos Traza en Suelos de La Provincia de Granada,” Universidad de Granada, 2006.
- [7] DANE and DIMPE, “Encuesta Nacional Agropecuaria ENA Cauca,” 2013.
- [8] Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural, “Papa,” Bogotá, D.C., 2014.
- [9] Municipio de Totoro, “Esquema de Ordenamiento Territorial,” Totoró, Cauca, 2002.
- [10] H. Zhang, F. J. Zhao, B. Sun, W. Davison, and S. P. Mcgrath, “A new method to measure effective soil solution concentration predicts copper availability to plants,” *Environ. Sci. Technol.*, vol. 35, no. 12, pp. 2602–2607, 2001.
- [11] R. Casas Flores, *El suelo de cultivo y las condiciones climáticas. España: Editorial Paraninfo S.A*, 2012.
- [12] V. H. Méndez Estrada and J. Monge-Nájera, *Costa Rica: historia natural*, Primera Ed. San Jose, Costa Rica: Editorial Universidad Estatal a Distancia, 2003.
- [13] C. Luna Zambrano, *Panel Sobre Suelos Volcanicos de America. Caracterización físico-química de algunos suelos volcánicos del Departamento del Cauca (Colombia)*. Pasto, Colombia: Instituto Interamericano de Ciencias Agrícolas, 1972.
- [14] R. Guerrero Riascos, *Fertilización de cultivos en clima frío*, Segunda Ed. Bogotá, D.C.: Monómeros Colombo Venezolanos S.A, 1998.
- [15] C. H. A. Fernando Ramírez Muñoz, María Luisa Fournier Leiva , Clemens Ruepert, “Uso De Agroquímicos En El Cultivo De Papa,” *Agr*, vol. 25, no. 2, pp. 337–345, 2014.

- [16] E. Enríquez Arellano, “El cultivo de la Papa (*Solanum tuberosum* L.) y sus principales plagas y enfermedades,” Universidad Autónoma Agraria “Antonio Narro,” 1998.
- [17] N. Carreño, Á. Vargas, A. J. Bernal, and S. Restrepo, “Problemas fitopatológicos en especies de la familia Solanaceae causados por los géneros *Phytophthora*, *Alternaria* y *Ralstonia* en Colombia. Una revisión.,” *Agron. Colomb.*, vol. 25, no. 2, pp. 320–329, 2007.
- [18] Ministerio de Salud, “Resolución No. 10834 del 25 de Noviembre de 1992,” Bogotá, D.C., 1992.
- [19] J. M. León Morales and G. Sepúlveda Jiménez, “El daño por oxidación causado por cobre y la respuesta antioxidante de las planta,” *Interciencia*, vol. 37, no. 11, pp. 805–811, 2012.
- [20] D. A. de Luis Román, D. Bellido Guerrero, and P. P. García Luna, *Dietoterapia, nutrición clínica y metabolismo*, Primera Ed. Madrid, España: Ediciones Díaz de Santos, 2012.
- [21] A. M. Vargas Vacca, “Estudio del comportamiento del Pb, Cd, Cu Y Zn después de la aplicación de compost en un suelo Typic Haplustolls cultivado con caña de azúcar”, Universidad del Valle, 2012.
- [22] K. Ernest and V. Römheld, “Micronutrientes en la fisiología de las plantas: funciones, absorcion y movilidad”, *Inf. Agron.*, vol. 2, pp. 1–5, 2007.
- [23] B. E. Douglas, D. H. McDaniel, and J. J. Alexander, *Conceptos y modelos de química inorgánica*, Segunda Edición. Barcelona, España: Editorial Reverté, 1994.
- [24] M. del R. Peralta Pérez and T. L. Volke Sepúlveda, “La Defensa Antioxidante en las Plantas: Una Herramienta Clave para la Fitorremediación,” *Rev. Mex. Ing. química*, vol. 11, no. 1, pp. 75–88, 2012.
- [25] D. C. . Kass, *Fertilidad de Suelos*. San José, Costa Rica.: Editorial Universidad Estatal a Distancia, 1996.
- [26] E. Galán Huertos and A. Romero Baena, “Contaminación de Suelos por Metales Pesados,” *Macla*, vol. 10, pp. 48–60, 2008.
- [27] M. Ramos-gómez et al., “Movilidad de metales en jales procedentes del distrito minero de Guanajuato, México”, *Rev. Int. Contam. Ambie*, vol. 28, no. 1, pp. 49–59, 2012.
- [28] M. I. Sánchez Bascones and R. Pardo Almudí, “Determinación de metales pesados en suelos de Mediana del Campo (Valladolid): contenidos extraíbles, niveles fondo y de referencia,” Universidad de Valladolid, 2003.
- [29] E. Amézquita et al., *Fundamentos para la Interpretación de Análisis de Suelos, Plantas y Aguas para Riego*, Tercera Ed. Bogotá, D.C.: Sociedad Colombia de la Ciencia del Suelo, 2000.
- [30] C. A. Arboleda Pardo, “Valoración de potencial de contaminación por metales

pesados en sistemas altoandinos de la subcuenca río las piedras y contribución de los ácidos húmicos a su posible mitigación”, Universidad del Cauca, 2013.

- [31] W. Chesworth, *Encyclopedia of soil science*. Nueva York: Springer, 2008.
- [32] Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC), *Métodos Analíticos Del Laboratorio de Suelos*, Sexta Edic. Bogotá, D.C., 2006.
- [33] J. Gutiérrez Muñoz, “Comparación de cinco Métodos para la Determinación del contenido de Humedad del Suelo.” Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, 2001.
- [34] A. Irizar, A. Andriulo, D. Cosentino, and C. Améndola, “Comparación de dos métodos de Fraccionamiento físico de la Materia Orgánica del suelo,” *Cienc. del suelo*, vol. 28, no. 1, pp. 115–121, 2010.
- [35] J. A. Huertas Campos and M. J. Martínez Córdón, “Lixiviación en columna de suelo de los herbicidas metsulfurón metilo y 2,4-d en suelos arroceros de los municipios de Espinal y Prado (Tolima)”, Universidad Nacional de Colombia, 2014.
- [36] N. Osorio, “Como Interpretar los Resultados del Análisis de Fertilidad del Suelo.” Medellín, 2012.
- [37] Consejería de medio ambiente de la junta de Andalucía, “Criterios y estándares para declarar un suelo contaminado en Andalucía y la metodología y técnicas de toma de muestras y análisis para su investigación,” 1999.
- [38] H. B. Bradl, “Adsorption of heavy metal ions on soils and soils constituents,” *J. Colloid Interface Sci.*, vol. 277, no. 1, pp. 1–18, 2004.
- [39] N. T. Basta, J. A. Ryan, and R. L. Chaney, “Trace Element Chemistry in Residual-Treated Soil: Key Concepts and Metal Bioavailability,” *J. Environ. Qual.*, vol. 34, pp. 49–63, 2005.
- [40] H. W. Fassbender and E. Bornemisza, *Química de Suelos con Énfasis en Suelos de América Latina*, Segunda Ed. San José, Costa Rica.: Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura, 1975.
- [41] K. Mengel, E. A. Kirkby, H. Kosegarten, and T. Appel, “Soil Copper,” in *Principles of Plant Nutrition*, Quinta Edi., Boston: KluwerAcademic Publisher, 2001, pp. 599–611.
- [42] S. P. Mathur and M. P. Levesque, “The Effects of Using Copper for Mitigating Histosol Subsidence On: 2. The Distribution of Copper, Manganese, Zinc and Iron in an Organic Soil, Mineral Sublayers, and Their Mixtures in the Context of Setting a Threshold of Phytotoxic Soil-Copper,” *Soil Sci.*, vol. 135, no. 3, p. 11, 1983.

ANEXOS A

REGISTRO FOTOGRÁFICO DEL DESARROLLO EXPERIMENTAL



Anexo A 1. Parcelas muestreadas (Izquierda parcelas 1 y 2, derecha parcelas 3 y 4)



Anexo A 2. Secado de las muestras a temperatura ambiente.



Anexo A 3. *Procedimientos de maceración (izquierda) y tamizaje (derecha).*



Anexo A 4. *Columnas de suelo dispuestas para la simulación de lluvia.*

ANEXOS B

Anexo B- 1. Estimativo del Nitrógeno Total de acuerdo al clima y la altitud en Colombia.

| Clima | Altitud | % Nitrógeno Total | | |
|--------|---------|-------------------|-------------|--------|
| | | Bajo | Medio | Alto |
| Frío | Alta | < 0,25 | 0,25 – 0,50 | > 0,50 |
| Medio | Media | < 0,15 | 0,15 – 0,25 | > 0,25 |
| Cálido | Baja | < 0,10 | 0,10 – 0,20 | > 0,20 |

Fuente: Fundamentos para la interpretación de análisis de suelos, plantas y aguas para riego. [29]

Anexo B- 2. Clasificación del contenido de materia orgánica en suelos de Colombia de acuerdo al clima y la altura sobre el nivel del mar.

| Clima | Altitud | % Materia Orgánica | | |
|--------|---------|--------------------|--------|------|
| | | Bajo | Medio | Alto |
| Frío | Alta | < 5 | 5 – 10 | > 10 |
| Medio | Media | < 3 | 3 – 5 | > 5 |
| Cálido | Baja | < 2 | 2 – 4 | > 4 |

Fuente: Fundamentos para la interpretación de análisis de suelos, plantas y aguas para riego. [29]

Anexo B- 3. Rangos para interpretar los resultados del análisis químico de suelos utilizados en Colombia.

| Parámetro | Unidad | Interpretación | | | | |
|-----------|----------|----------------|-----------|------------|---------|----------|
| | | Muy baja | Baja | Suficiente | Alta | Muy alta |
| P | mg/Kg | <5 | 5-15 | 15-30 | 30-45 | >45 |
| S | mg/Kg | <3 | 3-6 | 6-12 | 12-15 | >15 |
| Fe | mg/Kg | <10 | 10-25 | 25-50 | 50-100 | >100 |
| Mn | mg/Kg | <2,5 | 2,5-5 | 5-10 | 10-20 | >20 |
| Cu | mg/Kg | <0,5 | 0,5-1 | 1-3 | 3-5 | >5 |
| Zn | mg/Kg | <0,5 | 0,5-1,5 | 1,5-5 | 5-10 | >10 |
| Ca | meq/100g | <1 | 1-3 | 3-6 | 6-9 | >9 |
| Mg | meq/100g | <0,5 | 0,5-1,5 | 1,5-2,5 | 2,5-3 | >3 |
| K | meq/100g | <0,05 | 0,05-0,15 | 0,15-0,3 | 0,3-0,5 | >0,5 |
| Na | meq/100g | <0,5 | 0,5-1 | | | >1 |
| Al | meq/100g | <0,5 | 0,5-2 | | | >2 |

Fuente: Laboratorio de Suelos Facultad de Ciencias Universidad Nacional de Colombia-Sede Medellín. [36]

Anexo B- 4. Rangos para interpretar el pH del suelo.

| pH | Acidez extrema | Acidez fuerte | Acidez moderada | Acidez ligera | Neutralidad | Alcalinidad | Alcalinidad alta |
|----|----------------|---------------|-----------------|---------------|-------------|-------------|------------------|
| | <5 | 5-5,5 | 5,5-6 | 6-6,5 | 6,5-7,3 | 7,3-8 | >8 |

Fuente: Laboratorio de Suelos Facultad de Ciencias Universidad Nacional de Colombia-Sede Medellín. [36]

Anexo B- 5. Umbrales españoles para el Cu (mg/ kg) en suelos agrícolas.

| NIVELES | pH <7 | pH >7 |
|---|-----------|-----------|
| Nivel de referencia | < 50 | < 100 |
| Nivel de investigación recomendable | 50 – 150 | 100 – 300 |
| Nivel de investigación obligatoria | 150 – 300 | 300 – 500 |
| Nivel de intervención | > 300 | > 500 |
| Nivel de intervención en suelos de parques naturales | | > 500 |
| Nivel de intervención en suelos de áreas industriales | | > 1000 |

Fuente: Consejería de medio ambiente de la Junta de Andalucía, 1999.

ANEXOS C

Anexo C- 1. Pruebas comparativas de Duncan para las propiedades químicas y físicas de cada parcela.

HH (%)

| Parcelas | N | Subconjunto para alfa = 0.05 | | | |
|-------------------------------|---|------------------------------|---------|---------|---------|
| | | 1 | 2 | 3 | 4 |
| Duncan ^a parcela 3 | 9 | 13,5511 | | | |
| parcela 2 | 9 | | 14,4600 | | |
| parcela 1 | 9 | | | 14,7833 | |
| parcela 4 | 9 | | | | 16,6433 |
| Sig. | | 1,000 | 1,000 | 1,000 | 1,000 |

Arena (%)

| Parcelas | N | Subconjunto para alfa = 0.05 | | |
|-------------------------------|---|------------------------------|---------|---------|
| | | 1 | 2 | 3 |
| Duncan ^a parcela 2 | 9 | 60,1667 | | |
| parcela 1 | 9 | | 67,7033 | |
| parcela 4 | 9 | | | 78,1067 |
| parcela 3 | 9 | | | 79,4200 |
| Sig. | | 1,000 | 1,000 | ,483 |

Arcilla (%)

| Parcelas | N | Subconjunto para alfa = 0.05 | | |
|-------------------------------|---|------------------------------|---------|---------|
| | | 1 | 2 | 3 |
| Duncan ^a parcela 3 | 9 | 9,0700 | | |
| parcela 4 | 9 | | 11,0967 | |
| parcela 2 | 9 | | 11,3967 | |
| parcela 1 | 9 | | | 16,1800 |
| Sig. | | 1,000 | ,754 | 1,000 |

Limos (%)

| Parcelas | N | Subconjunto para alfa = 0.05 | | |
|-------------------------------|---|------------------------------|---------|---------|
| | | 1 | 2 | 3 |
| Duncan ^a parcela 4 | 9 | 10,7967 | | |
| parcela 3 | 9 | 11,5100 | | |
| parcela 1 | 9 | | 16,1167 | |
| parcela 2 | 9 | | | 28,4300 |
| Sig. | | ,493 | 1,000 | 1,000 |

Densidad Aparente

| Parcelas | N | Subconjunto para alfa = 0.05 | | |
|-------------------------------|---|------------------------------|-------|-------|
| | | 1 | 2 | 3 |
| Duncan ^a parcela 2 | 9 | ,4767 | | |
| parcela 4 | 9 | ,4900 | | |
| parcela 1 | 9 | | ,5500 | |
| parcela 3 | 9 | | | ,6300 |
| Sig. | | ,339 | 1,000 | 1,000 |

pH 1:2

| Parcelas | N | Subconjunto para alfa = 0.05 | | |
|-------------------------------|---|------------------------------|--------|--------|
| | | 1 | 2 | 3 |
| Duncan ^a parcela 1 | 9 | 4,1267 | | |
| parcela 3 | 9 | | 4,5667 | |
| parcela 4 | 9 | | 4,5700 | |
| parcela 2 | 9 | | | 4,6000 |
| Sig. | | 1,000 | ,754 | 1,000 |

CIC (meq /100g)

| Parcelas | N | Subconjunto para alfa = 0.05 | | | |
|-------------------------------|---|------------------------------|---------|---------|---------|
| | | 1 | 2 | 3 | 4 |
| Duncan ^a parcela 4 | 9 | 53,5900 | | | |
| parcela 2 | 9 | | 55,6100 | | |
| parcela 3 | 9 | | | 61,5000 | |
| parcela 1 | 9 | | | | 64,0200 |
| Sig. | | 1,000 | 1,000 | 1,000 | 1,000 |

% NT

| Parcelas | N | Subconjunto para alfa = 0.05 | | | |
|-------------------------------|---|------------------------------|--------|--------|--------|
| | | 1 | 2 | 3 | 4 |
| Duncan ^a parcela 4 | 9 | 1,0600 | | | |
| parcela 3 | 9 | | 1,1033 | | |
| parcela 2 | 9 | | | 1,3867 | |
| parcela 1 | 9 | | | | 1,4433 |
| Sig. | | 1,000 | 1,000 | 1,000 | 1,000 |

Acidez Interc. (meq /100g)

| Parcelas | | N | Subconjunto para alfa = 0.05 | | | |
|---------------------|-----------|---|------------------------------|--------|--------|--------|
| | | | 1 | 2 | 3 | 4 |
| Duncan ^a | parcela 2 | 9 | 6,8637 | | | |
| | parcela 4 | 9 | | 7,7967 | | |
| | parcela 1 | 9 | | | 8,0433 | |
| | parcela 3 | 9 | | | | 8,3189 |
| | Sig. | | 1,000 | 1,000 | 1,000 | 1,000 |

Al Interc. (meq /100g)

| Parcelas | | N | Subconjunto para alfa = 0.05 | | |
|---------------------|-----------|---|------------------------------|--------|--------|
| | | | 1 | 2 | 3 |
| Duncan ^a | parcela 2 | 9 | 5,9233 | | |
| | parcela 1 | 9 | | 6,9200 | |
| | parcela 3 | 9 | | 6,9500 | |
| | parcela 4 | 9 | | | 7,1967 |
| | Sig. | | 1,000 | ,747 | 1,000 |

Acidez H+ (meq /100g)

| Parcelas | | N | Subconjunto para alfa = 0.05 | | |
|---------------------|-----------|---|------------------------------|--------|--------|
| | | | 1 | 2 | 3 |
| Duncan ^a | parcela 4 | 9 | ,6100 | | |
| | parcela 2 | 9 | | ,9400 | |
| | parcela 1 | 9 | | 1,1200 | |
| | parcela 3 | 9 | | | 1,3800 |
| | Sig. | | 1,000 | ,157 | 1,000 |

CO (%)

| Parcelas | | N | Subconjunto para alfa = 0.05 | | | |
|---------------------|-----------|---|------------------------------|---------|---------|---------|
| | | | 1 | 2 | 3 | 4 |
| Duncan ^a | parcela 1 | 9 | 35,5667 | | | |
| | parcela 4 | 9 | | 37,4100 | | |
| | parcela 2 | 9 | | | 38,1300 | |
| | parcela 3 | 9 | | | | 41,2800 |
| | Sig. | | 1,000 | 1,000 | 1,000 | 1,000 |

MO (%)

| Parcelas | | N | Subconjunto para alfa = 0.05 | | | |
|---------------------|-----------|---|------------------------------|---------|---------|---------|
| | | | 1 | 2 | 3 | 4 |
| Duncan ^a | parcela 1 | 9 | 61,3200 | | | |
| | parcela 4 | 9 | | 64,4967 | | |
| | parcela 2 | 9 | | | 65,7433 | |
| | parcela 3 | 9 | | | | 71,1500 |
| | Sig. | | 1,000 | 1,000 | 1,000 | 1,000 |

C/N

| Parcelas | | N | Subconjunto para alfa = 0.05 | | | |
|---------------------|-----------|---|------------------------------|---------|---------|---------|
| | | | 1 | 2 | 3 | 4 |
| Duncan ^a | parcela 1 | 9 | 24,6567 | | | |
| | parcela 2 | 9 | | 27,4989 | | |
| | parcela 4 | 9 | | | 35,2945 | |
| | parcela 3 | 9 | | | | 37,4176 |
| | Sig. | | 1,000 | 1,000 | 1,000 | 1,000 |

Na (meq /100g)

| Parcelas | | N | Subconjunto para alfa = 0.05 | | |
|---------------------|-----------|---|------------------------------|---------|---------|
| | | | 1 | 2 | 3 |
| Duncan ^a | parcela 2 | 9 | ,002133 | | |
| | parcela 1 | 9 | | ,005700 | |
| | parcela 4 | 9 | | ,006733 | ,006733 |
| | parcela 3 | 9 | | | ,007433 |
| | Sig. | | 1,000 | ,181 | ,362 |

K (meq /100g)

| Parcelas | | N | Subconjunto para alfa = 0.05 | | |
|---------------------|-----------|---|------------------------------|--------|--------|
| | | | 1 | 2 | 3 |
| Duncan ^a | parcela 3 | 9 | 1,7840 | | |
| | parcela 4 | 9 | | 2,3700 | |
| | parcela 2 | 9 | | 2,5733 | |
| | parcela 1 | 9 | | | 3,0467 |
| | Sig. | | 1,000 | ,159 | 1,000 |

Mg (meq /100g)

| Parcelas | | N | Subconjunto para alfa = 0.05 | |
|---------------------|-----------|---|------------------------------|-------|
| | | | 1 | 2 |
| Duncan ^a | parcela 3 | 9 | ,3000 | |
| | parcela 4 | 9 | ,3067 | |
| | parcela 1 | 9 | ,3100 | |
| | parcela 2 | 9 | | ,4200 |
| | Sig. | | ,118 | 1,000 |

Ca (meq /100g)

| Parcelas | | N | Subconjunto para alfa = 0.05 | |
|---------------------|-----------|---|------------------------------|-------|
| | | | 1 | 2 |
| Duncan ^a | parcela 3 | 9 | ,1067 | |
| | parcela 4 | 9 | ,1100 | |
| | parcela 1 | 9 | ,1167 | |
| | parcela 2 | 9 | | ,1767 |
| | Sig. | | ,066 | 1,000 |

P (mg/Kg)

| Parcelas | | N | Subconjunto para alfa = 0.05 | | |
|---------------------|-----------|---|------------------------------|---------|----------|
| | | | 1 | 2 | 3 |
| Duncan ^a | parcela 3 | 9 | 53,9600 | | |
| | parcela 4 | 9 | | 81,8133 | |
| | parcela 2 | 9 | | 84,1500 | |
| | parcela 1 | 9 | | | 135,4056 |
| | Sig. | | 1,000 | ,840 | 1,000 |

S (mg/Kg)

| Parcelas | | N | Subconjunto para alfa = 0.05 | | |
|---------------------|-----------|---|------------------------------|--------|--------|
| | | | 1 | 2 | 3 |
| Duncan ^a | parcela 2 | 9 | 3,4400 | | |
| | parcela 3 | 9 | | 4,3500 | |
| | parcela 4 | 9 | | 4,6300 | |
| | parcela 1 | 9 | | | 7,1100 |
| | Sig. | | 1,000 | ,414 | 1,000 |

Cu Disp. (mg/Kg)

| Parcelas | N | Subconjunto para alfa = 0.05 | | |
|-------------------------------|---|------------------------------|-------|-------|
| | | 1 | 2 | 3 |
| Duncan ^a parcela 3 | 9 | ,2100 | | |
| parcela 4 | 9 | ,2200 | | |
| parcela 1 | 9 | | ,2500 | |
| parcela 2 | 9 | | | ,3100 |
| Sig. | | ,054 | 1,000 | 1,000 |

Fe (mg/Kg)

| Parcelas | N | Subconjunto para alfa = 0.05 | |
|-------------------------------|---|------------------------------|----------|
| | | 1 | 2 |
| Duncan ^a parcela 3 | 9 | 202,8300 | |
| parcela 4 | 9 | 207,7467 | |
| parcela 1 | 9 | 209,8733 | |
| parcela 2 | 9 | | 276,8922 |
| Sig. | | ,498 | 1,000 |

Mn (mg/Kg)

| Parcelas | N | Subconjunto para alfa = 0.05 | |
|-------------------------------|---|------------------------------|--------|
| | | 1 | 2 |
| Duncan ^a parcela 3 | 9 | ,9067 | |
| parcela 1 | 9 | ,9467 | |
| parcela 4 | 9 | ,9467 | |
| parcela 2 | 9 | | 1,4911 |
| Sig. | | ,624 | 1,000 |

Zn (mg/Kg)

| Parcelas | N | Subconjunto para alfa = 0.05 | | |
|-------------------------------|---|------------------------------|-------|-------|
| | | 1 | 2 | 3 |
| Duncan ^a parcela 3 | 9 | ,1000 | | |
| parcela 4 | 9 | | ,1433 | |
| parcela 1 | 9 | | ,1600 | |
| parcela 2 | 9 | | | ,2500 |
| Sig. | | 1,000 | ,052 | 1,000 |

Cu PseudoT (mg/Kg)

| Parcelas | | N | Subconjunto para alfa = 0.05 | |
|---------------------|-----------|---|------------------------------|---------|
| | | | 1 | 2 |
| Duncan ^a | parcela 3 | 9 | 63,3600 | |
| | parcela 2 | 9 | | 65,6200 |
| | parcela 1 | 9 | | 65,9500 |
| | parcela 4 | 9 | | 67,3700 |
| | Sig. | | 1,000 | ,144 |

MOH (%)

| Parcelas | | N | Subconjunto para alfa = 0.05 | | | |
|---------------------|-----------|---|------------------------------|---------|---------|---------|
| | | | 1 | 2 | 3 | 4 |
| Duncan ^a | parcela 3 | 9 | 43,7900 | | | |
| | parcela 2 | 9 | | 45,6600 | | |
| | parcela 4 | 9 | | | 57,2300 | |
| | parcela 1 | 9 | | | | 60,3300 |
| | Sig. | | 1,000 | 1,000 | 1,000 | 1,000 |

MOF (%)

| Parcelas | | N | Subconjunto para alfa = 0.05 | | | |
|---------------------|-----------|---|------------------------------|---------|---------|---------|
| | | | 1 | 2 | 3 | 4 |
| Duncan ^a | parcela 4 | 9 | 33,6900 | | | |
| | parcela 1 | 9 | | 36,5500 | | |
| | parcela 3 | 9 | | | 50,9200 | |
| | parcela 2 | 9 | | | | 53,4200 |
| | Sig. | | 1,000 | 1,000 | 1,000 | 1,000 |

MOH/MOF

| Parcelas | | N | Subconjunto para alfa = 0.05 | | | |
|---------------------|-----------|---|------------------------------|-------|--------|--------|
| | | | 1 | 2 | 3 | 4 |
| Duncan ^a | parcela 2 | 9 | ,8547 | | | |
| | parcela 3 | 9 | | ,8600 | | |
| | parcela 1 | 9 | | | 1,6506 | |
| | parcela 4 | 9 | | | | 1,6987 |
| | Sig. | | 1,000 | 1,000 | 1,000 | 1,000 |

Anexo C- 2. Pruebas comparativas de Duncan para las fracciones de cobre obtenidas en la secuenciación de Tessier.

F1

| Parcela | N | Subconjunto para alfa = 0.05 | |
|--------------------------|---|------------------------------|---------|
| | | 1 | 2 |
| Duncan ^a 4,00 | 3 | 6,5898 | |
| 3,00 | 3 | 6,7079 | |
| 2,00 | 3 | 6,9629 | |
| 1,00 | 3 | | 11,1745 |
| Sig. | | ,354 | 1,000 |

F2

| Parcela | N | Subconjunto para alfa = 0.05 | | | |
|--------------------------|---|------------------------------|--------|--------|--------|
| | | 1 | 2 | 3 | 4 |
| Duncan ^a 3,00 | 3 | 5,8112 | | | |
| 2,00 | 3 | | 5,8750 | | |
| 1,00 | 3 | | | 5,8966 | |
| 4,00 | 3 | | | | 6,0313 |
| Sig. | | 1,000 | 1,000 | 1,000 | 1,000 |

F3

| Parcela | N | Subconjunto para alfa = 0.05 | |
|--------------------------|---|------------------------------|--------|
| | | 1 | |
| Duncan ^a 4,00 | 3 | | 6,2174 |
| 2,00 | 3 | | 6,9629 |
| 3,00 | 3 | | 7,6048 |
| 1,00 | 3 | | 7,8986 |
| Sig. | | | ,063 |

F4

| Parcela | N | Subconjunto para alfa = 0.05 | | |
|--------------------------|---|------------------------------|---------|---------|
| | | 1 | 2 | 3 |
| Duncan ^a 1,00 | 3 | 26,8259 | | |
| 2,00 | 3 | | 30,1723 | |
| 3,00 | 3 | | | 32,7147 |
| 4,00 | 3 | | | 34,6986 |
| Sig. | | 1,000 | 1,000 | ,055 |

F5

| Parcela | N | Subconjunto para alfa = 0.05 | |
|--------------------------|---|------------------------------|---------|
| | | 1 | 2 |
| Duncan ^a 3,00 | 3 | 9,7570 | |
| 4,00 | 3 | | 12,1743 |
| 1,00 | 3 | | 13,1764 |
| 2,00 | 3 | | 14,2158 |
| Sig. | | 1,000 | ,077 |

FM

| Parcela | N | Subconjunto para alfa = 0.05 | |
|--------------------------|---|------------------------------|---------|
| | | 1 | 2 |
| Duncan ^a 4,00 | 3 | 19,2144 | |
| 2,00 | 3 | 20,0178 | |
| 3,00 | 3 | 20,0252 | |
| 1,00 | 3 | | 26,2706 |
| Sig. | | ,286 | 1,000 |

FT

| Parcela | N | Subconjunto para alfa = 0.05 | |
|--------------------------|---|------------------------------|--|
| | | 1 | |
| Duncan ^a 3,00 | 3 | 62,5955 | |
| 2,00 | 3 | 64,1888 | |
| 1,00 | 3 | 64,9719 | |
| 4,00 | 3 | 65,7113 | |
| Sig. | | ,115 | |

Porcentaje De Recuperación

| Parcelas | N | Subconjunto para alfa = 0.05 | |
|--------------------------|---|------------------------------|--|
| | | 1 | |
| Duncan ^a 4,00 | 3 | 97,6158 | |
| 2,00 | 3 | 97,8518 | |
| 1,00 | 3 | 98,5646 | |
| 3,00 | 3 | 98,8010 | |
| Sig. | | ,564 | |

Anexo C- 3. Correlación de Pearson para las muestras compuestas de suelo.

| | HH (%) | Arena (%) | Arcilla (%) | Limos (%) | Densidad Ap. (g/ cc) | pH 1:2 | CIC (meq/100g) | NT (%) | Acidez Interc. (meq) | Al Interc. (meq/100g) | Acidez H+ (meq/100g) | CO (%) | MO (%) | Na (meq/100g) | K (meq/100g) | Mg (meq/100g) | Ca (meq/100g) | P (mg/Kg) | S (mg/Kg) | Cu Disp. (mg/Kg) | Fe (mg/Kg) | Mn (mg/Kg) | Zn (mg/Kg) | Cu PseudoT (mg/Kg) | MOH (%) | MOF (%) | | |
|---|--------|-----------|-------------|-----------|----------------------|--------|----------------|--------|----------------------|-----------------------|----------------------|--------|--------|---------------|--------------|---------------|---------------|-----------|-----------|------------------|------------|------------|------------|--------------------|---------|---------|----|----|
| Correlación de Pearson Sig. (bilateral) | 1 | ,059 | ,266 | - ,187 | - ,524 | ,041 | - ,554 | - ,284 | - ,090 | ,297 | - ,543 | - ,556 | - ,556 | ,171 | ,213 | - ,129 | - ,128 | ,201 | ,046 | - ,157 | - ,123 | - ,104 | ,039 | ,478 | ,658 | - ,760 | | |
| N | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | |
| Correlación de Pearson Sig. (bilateral) | ,059 | 1 | - ,572 | - ,933 | ,408 | ,160 | - ,050 | - ,769 | ,668 | ,735 | - ,025 | ,415 | ,414 | ,648 | - ,488 | - ,761 | - ,777 | - ,393 | ,093 | - ,800 | - ,629 | - ,693 | ,734 | - ,005 | ,039 | - ,306 | | |
| N | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 |
| Correlación de Pearson Sig. (bilateral) | ,266 | - ,572 | 1 | ,240 | - ,053 | - ,700 | ,451 | ,593 | ,068 | ,016 | ,067 | - ,717 | - ,717 | - ,049 | ,594 | - ,020 | ,028 | ,707 | ,564 | ,147 | ,007 | ,043 | ,087 | ,161 | ,628 | - ,430 | | |
| N | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 |
| Correlación de Pearson Sig. (bilateral) | - ,187 | - ,933 | ,240 | 1 | - ,460 | ,117 | - ,138 | ,651 | - ,820 | - ,877 | ,000 | - ,177 | - ,176 | ,746 | ,317 | ,910 | ,909 | ,155 | - ,357 | ,884 | ,742 | ,802 | ,832 | - ,065 | - ,321 | ,550 | | |
| N | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 |

Continuación Anexo C-3: Correlación de Pearson para las muestras compuestas de suelo.

| | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|------------------|---|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|-------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|-------------------|-------------------|-------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|-------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|-------------------|
| Densidad Ap. | Correlación de Pearson Sig. (bilateral) | -.524 [*] | .408 [*] | -.053 | -.460 [*] | 1 | -.134 | .675 [*] | -.215 | .779 ^{**} | .248 | .814 ^{**} | .519 [*] | .517 [*] | .530 [*] | -.497 [*] | -.511 [*] | -.488 [*] | -.225 | .092 | -.520 [*] | -.426 [*] | -.437 [*] | -.643 [*] | -.458 [*] | -.273 | .202 |
| | | .001 | .013 | .758 | .005 | | .435 | .000 | .209 | .000 | .144 | .000 | .001 | .001 | .001 | .002 | .001 | .003 | .187 | .594 | .001 | .010 | .008 | .000 | .005 | .107 | .238 |
| | N | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 |
| pH 1:2 | Correlación de Pearson Sig. (bilateral) | .041 | .160 | -.700 [*] | .117 | -.134 | 1 | -.688 [*] | -.606 [*] | -.352 [*] | -.246 | -.165 | .676 [*] | .677 [*] | -.077 | -.626 [*] | .345 [*] | .282 | -.698 [*] | .848 [*] | .030 | .300 | .312 | .090 | -.063 | -.702 [*] | .501 [*] |
| | | .814 | .351 | .000 | .495 | .435 | | .000 | .000 | .035 | .147 | .335 | .000 | .000 | .656 | .000 | .039 | .095 | .000 | .000 | .861 | .075 | .064 | .602 | .714 | .000 | .002 |
| | N | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 |
| CIC (meq) | Correlación de Pearson Sig. (bilateral) | -.554 [*] | -.050 | .451 [*] | -.138 | .675 ^{**} | 1 | .371 [*] | .580 ^{**} | -.201 | .573 ^{**} | .004 | .003 | .081 | .136 | -.419 [*] | -.365 [*] | .301 | .490 [*] | -.204 | -.380 [*] | -.299 | -.409 [*] | -.478 [*] | .110 | .021 | |
| | | .000 | .771 | .006 | .422 | .000 | | .026 | .000 | .240 | .000 | .980 | .985 | .638 | .429 | .011 | .028 | .075 | .002 | .234 | .022 | .076 | .013 | .003 | .523 | .903 | |
| | N | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | |
| % NT | Correlación de Pearson Sig. (bilateral) | -.284 | -.769 [*] | .593 [*] | .651 [*] | -.215 | .606 [*] | 1 | -.422 [*] | -.550 [*] | .127 | -.578 [*] | .578 [*] | .536 [*] | .670 [*] | .508 [*] | .542 [*] | .577 [*] | .370 [*] | .742 [*] | .474 [*] | .422 [*] | .641 [*] | .083 | .196 | .135 | |
| | | .093 | .000 | .000 | .000 | .209 | .000 | | .010 | .001 | .462 | .000 | .000 | .001 | .000 | .002 | .001 | .000 | .026 | .000 | .004 | .010 | .000 | .631 | .251 | .434 | |
| | N | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | |
| Acidez Interc. | Correlación de Pearson Sig. (bilateral) | -.090 | .668 [*] | .068 | -.820 [*] | .779 ^{**} | 1 | .580 [*] | -.422 [*] | 1 | .759 [*] | .428 ^{**} | .209 | .208 | .781 [*] | -.296 | -.908 [*] | .870 [*] | -.024 | .441 [*] | -.874 [*] | .801 [*] | .791 [*] | .909 [*] | -.217 | .230 | |
| | | .603 | .000 | .694 | .000 | .000 | | .035 | .000 | .010 | .000 | .009 | .221 | .224 | .000 | .080 | .000 | .000 | .891 | .007 | .000 | .000 | .000 | .000 | .204 | .176 | |
| | N | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | |
| Al Interc. (meq) | Correlación de Pearson Sig. (bilateral) | .297 | .735 [*] | .016 | -.877 [*] | .248 | -.246 | .201 | -.550 [*] | .759 ^{**} | 1 | -.263 | .003 | .002 | .617 [*] | -.073 | -.908 [*] | .882 [*] | .039 | .513 [*] | -.856 [*] | .781 [*] | .762 [*] | .841 [*] | .085 | .493 [*] | |
| | | .079 | .000 | .926 | .000 | .144 | .147 | .240 | .001 | .000 | | .121 | .985 | .991 | .000 | .674 | .000 | .000 | .822 | .001 | .000 | .000 | .000 | .000 | .623 | .002 | |
| | N | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | |

Continuación Anexo C-3. Correlación de Pearson para las muestras compuestas de suelo.

| | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|-----------|---|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|---------|---------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|----|
| Acidez H+ | Correlación de Pearson Sig. (bilateral) | -.543* | -.025 | .067 | .000 | .814* | -.165 | .573** | .127 | .428* | -.263 | 1 | .316 | .316 | .304 | -.348* | -.082 | -.060 | -.104 | -.070 | -.108 | -.103 | -.114 | -.179 | -.444* | -.352* | .403* | |
| | | .001 | .886 | .696 | 1,000 | .000 | .335 | .000 | .462 | .009 | .121 | | .060 | .061 | .072 | .038 | .636 | .730 | .547 | .686 | .531 | .550 | .507 | .295 | .007 | .035 | .015 | |
| | N | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 |
| CO (%) | Correlación de Pearson Sig. (bilateral) | -.556* | -.415* | -.717* | -.177 | .519* | .676* | .004 | -.578* | .209 | .003 | .316 | 1 | 1,000** | .147 | -.786* | -.081 | -.122 | -.722* | -.574* | -.308 | -.073 | -.034 | -.393* | -.465* | -.857* | .671** | |
| | | .000 | .012 | .000 | .301 | .001 | .000 | .980 | .000 | .221 | .985 | .060 | | .000 | .393 | .000 | .639 | .478 | .000 | .000 | .068 | .674 | .846 | .018 | .004 | .000 | .000 | |
| | N | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 |
| MO (%) | Correlación de Pearson Sig. (bilateral) | -.556* | -.414* | -.717* | -.176 | .517* | .677* | .003 | -.578* | .208 | .002 | .316 | 1,000** | 1 | .146 | -.786* | -.080 | -.121 | -.722* | -.575* | -.307 | -.072 | -.032 | -.393* | -.464* | -.858* | .672** | |
| | | .000 | .012 | .000 | .304 | .001 | .000 | .985 | .000 | .224 | .991 | .061 | .000 | | .396 | .000 | .644 | .481 | .000 | .000 | .069 | .678 | .851 | .018 | .004 | .000 | .000 | |
| | N | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 |
| Na (meq) | Correlación de Pearson Sig. (bilateral) | .171 | .648* | -.049 | -.746* | .530* | -.077 | .081 | -.536* | .781* | .617* | .304 | .147 | .146 | 1 | -.373* | -.656* | -.640* | -.103 | .361* | -.796* | -.538* | -.678* | -.695* | .238 | .187 | -.371* | |
| | | .318 | .000 | .778 | .000 | .001 | .656 | .638 | .001 | .000 | .000 | .072 | .393 | .396 | | .025 | .000 | .000 | .550 | .031 | .000 | .001 | .000 | .000 | .161 | .274 | .026 | |
| | N | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 |
| K (meq) | Correlación de Pearson Sig. (bilateral) | .213 | -.488* | .594* | .317 | -.497* | -.626* | .136 | .670* | -.296 | -.073 | -.348* | .786** | .786** | .373* | 1 | .179 | .227 | .642* | .522* | .421* | .145 | .146 | .411* | .272 | .606* | -.384* | |
| | | .213 | .003 | .000 | .059 | .002 | .000 | .429 | .000 | .080 | .674 | .038 | .000 | .000 | .025 | | .297 | .184 | .000 | .001 | .010 | .398 | .395 | .013 | .109 | .000 | .021 | |
| | N | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 |
| Mg (meq) | Correlación de Pearson Sig. (bilateral) | -.129 | -.761* | -.020 | .910* | -.511* | .345* | -.419* | .508* | -.908* | -.908* | .082 | -.081 | -.080 | -.656* | .179 | 1 | .987* | -.029 | -.463* | .918* | .870* | .823* | .916* | .121 | -.417* | .588** | |
| | | .455 | .000 | .907 | .000 | .001 | .039 | .011 | .002 | .000 | .000 | .636 | .639 | .644 | .000 | .297 | | .000 | .866 | .004 | .000 | .000 | .000 | .000 | .482 | .011 | .000 | |
| | N | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 |

Continuación Anexo C-3. Correlación de Pearson para las muestras compuestas de suelo.

| | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|------------|---|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Ca (meq/l) | Correlación de Pearson Sig. (bilateral) | -,128 | -,777 | -,028 | -,909 | -,488 | -,282 | -,365 | -,542 | -,870 | -,882 | -,060 | -,122 | -,121 | -,640 | -,227 | -,987 | 1 | -,010 | -,413 | -,924 | -,828 | -,788 | -,916 | -,085 | -,372 | -,555 |
| | | ,455 | ,000 | ,872 | ,000 | ,003 | ,095 | ,028 | ,001 | ,000 | ,000 | ,730 | ,478 | ,481 | ,000 | ,184 | ,000 | | ,953 | ,012 | ,000 | ,000 | ,000 | ,000 | ,620 | ,025 | ,000 |
| | N | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 |
| P (mg/Kg) | Correlación de Pearson Sig. (bilateral) | ,201 | -,393 | -,707 | -,155 | -,225 | -,698 | -,301 | -,577 | -,024 | ,039 | -,104 | -,722 | -,722 | -,103 | -,642 | -,029 | -,010 | 1 | -,605 | -,175 | ,008 | -,016 | -,164 | -,317 | -,625 | -,435 |
| | | ,240 | ,018 | ,000 | ,368 | ,187 | ,000 | ,075 | ,000 | ,891 | ,822 | ,547 | ,000 | ,000 | ,550 | ,000 | ,866 | ,953 | | ,000 | ,308 | ,965 | ,925 | ,339 | ,059 | ,000 | ,008 |
| | N | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 |
| S (mg/Kg) | Correlación de Pearson Sig. (bilateral) | ,046 | ,093 | -,564 | -,357 | -,092 | -,848 | -,490 | -,370 | -,441 | -,513 | -,070 | -,574 | -,575 | -,361 | -,522 | -,463 | -,413 | -,605 | 1 | -,242 | -,325 | -,456 | -,272 | -,374 | -,709 | -,597 |
| | | ,789 | ,588 | ,000 | ,032 | ,594 | ,000 | ,002 | ,026 | ,007 | ,001 | ,686 | ,000 | ,000 | ,031 | ,001 | ,004 | ,012 | ,000 | | ,155 | ,053 | ,005 | ,108 | ,025 | ,000 | ,000 |
| | N | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 |
| Cu Disp. | Correlación de Pearson Sig. (bilateral) | -,157 | -,800 | -,147 | -,884 | -,520 | -,030 | -,204 | -,742 | -,874 | -,856 | -,108 | -,308 | -,307 | -,796 | -,421 | -,918 | -,924 | -,175 | -,242 | 1 | -,804 | -,771 | -,958 | -,086 | -,184 | -,428 |
| | | ,359 | ,000 | ,392 | ,000 | ,001 | ,861 | ,234 | ,000 | ,000 | ,000 | ,531 | ,068 | ,069 | ,000 | ,010 | ,000 | ,000 | ,308 | ,155 | | ,000 | ,000 | ,000 | ,618 | ,284 | ,009 |
| | N | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 |
| Fe (mg/Kg) | Correlación de Pearson Sig. (bilateral) | -,123 | -,629 | -,007 | -,742 | -,426 | -,300 | -,380 | -,474 | -,801 | -,781 | -,103 | -,073 | -,072 | -,538 | -,145 | -,870 | -,828 | -,008 | -,325 | -,804 | 1 | -,664 | -,790 | -,289 | -,353 | -,502 |
| | | ,474 | ,000 | ,966 | ,000 | ,010 | ,075 | ,022 | ,004 | ,000 | ,000 | ,550 | ,674 | ,678 | ,001 | ,398 | ,000 | ,000 | ,965 | ,053 | ,000 | | ,000 | ,000 | ,088 | ,035 | ,002 |
| | N | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 |
| Mn (mg/Kg) | Correlación de Pearson Sig. (bilateral) | -,104 | -,693 | -,043 | -,802 | -,437 | -,312 | -,299 | -,422 | -,791 | -,762 | -,114 | -,034 | -,032 | -,678 | -,146 | -,823 | -,788 | -,016 | -,456 | -,771 | -,664 | 1 | -,732 | -,048 | -,367 | -,510 |
| | | ,546 | ,000 | ,801 | ,000 | ,008 | ,064 | ,076 | ,010 | ,000 | ,000 | ,507 | ,846 | ,851 | ,000 | ,395 | ,000 | ,000 | ,925 | ,005 | ,000 | ,000 | | ,000 | ,782 | ,028 | ,001 |
| | N | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 |

Continuación Anexo C-3. Correlaciones de Pearson para las muestras compuestas de suelo.

| | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|------------|---|----------|----------|----------|--------|----------|----------|----------|--------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|---------|---------|---------|----------|----------|--------|---------|---------|--------|---------|----------|----------|
| Zn (mg/Kg) | Correlación de Pearson Sig. (bilateral) | ,039 | - ,734** | ,087 | ,832** | - ,643** | ,090 | - ,409* | ,641** | - ,909** | - ,841** | - ,179 | - ,393* | - ,393* | - ,695** | ,411* | ,916* | ,916* | ,164 | -,272 | ,958** | ,790* | ,732* | 1 | ,231 | -,099 | ,309 |
| | | ,821 | ,000 | ,614 | ,000 | ,000 | ,602 | ,013 | ,000 | ,000 | ,000 | ,295 | ,018 | ,018 | ,000 | ,013 | ,000 | ,000 | ,339 | ,108 | ,000 | ,000 | ,000 | | ,175 | ,565 | ,066 |
| | N | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 |
| Cu PseudoT | Correlación de Pearson Sig. (bilateral) | ,478** | -,005 | ,161 | - ,065 | - ,458** | -,063 | - ,478** | ,083 | -,217 | ,085 | - ,444** | - ,465** | - ,464** | ,238 | ,272 | ,121 | ,085 | ,317 | ,374* | ,086 | ,289 | ,048 | ,231 | 1 | ,403* | - ,398* |
| | | ,003 | ,977 | ,347 | ,707 | ,005 | ,714 | ,003 | ,631 | ,204 | ,623 | ,007 | ,004 | ,004 | ,161 | ,109 | ,482 | ,620 | ,059 | ,025 | ,618 | ,088 | ,782 | ,175 | | ,015 | ,016 |
| | N | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 |
| MOH (%) | Correlación de Pearson Sig. (bilateral) | ,658** | ,039 | ,628** | - ,321 | -,273 | - ,702** | ,110 | ,196 | ,230 | ,493** | - ,352* | - ,857** | - ,858** | ,187 | ,606* | - ,417* | - ,372* | ,625** | ,709** | - ,184 | - ,353* | - ,367* | - ,099 | ,403* | 1 | - ,944** |
| | | ,000 | ,823 | ,000 | ,056 | ,107 | ,000 | ,523 | ,251 | ,176 | ,002 | ,035 | ,000 | ,000 | ,274 | ,000 | ,011 | ,025 | ,000 | ,000 | ,284 | ,035 | ,028 | ,565 | ,015 | | ,000 |
| | N | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 |
| MOF (%) | Correlación de Pearson Sig. (bilateral) | - ,760** | -,306 | - ,430** | ,550** | ,202 | ,501** | ,021 | ,135 | - ,370* | - ,682** | ,403* | ,671** | ,672** | - ,371* | - ,384* | ,588* | ,555* | - ,435** | - ,597** | ,428** | ,502* | ,510* | ,309 | - ,398* | - ,944** | 1 |
| | | ,000 | ,070 | ,009 | ,001 | ,238 | ,002 | ,903 | ,434 | ,026 | ,000 | ,015 | ,000 | ,000 | ,026 | ,021 | ,000 | ,000 | ,008 | ,000 | ,009 | ,002 | ,001 | ,066 | ,016 | ,000 | |
| | N | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 |

** La correlación es significativa al nivel 0,01 (bilateral).

* La correlación es significativa al nivel 0,05 (bilateral).

Anexo C- 4. Correlaciones de Pearson para las fracciones de cobre y algunas propiedades del suelo.

| | | F1 | F2 | F3 | F4 | F5 | FM | FT | %R | Arcilla (%) | pH 1:2 | CIC (meq /100g) | Al Interc. (meq /100g) | MO (%) | Fe (mg/K g) | Mg (meq /100g) | Ca (meq /100g) | MOH (%) | MOF (%) |
|----|------------------------|---------|-------|-------|---------|-------|---------|-------|-------|-------------|--------|-----------------|------------------------|--------|-------------|----------------|----------------|---------|---------|
| F1 | Correlación de Pearson | 1 | -,085 | ,410 | -,842** | ,323 | ,979** | ,186 | ,026 | -,440 | -,369 | ,239 | ,374 | -,302 | -,034 | -,379 | -,500 | ,375 | -,375 |
| | Sig. (bilateral) | | ,794 | ,186 | ,001 | ,306 | ,000 | ,562 | ,935 | ,152 | ,238 | ,454 | ,231 | ,340 | ,917 | ,224 | ,098 | ,230 | ,229 |
| | N | 12 | 12 | 12 | 12 | 12 | 12 | 12 | 12 | 12 | 12 | 12 | 12 | 12 | 12 | 12 | 12 | 12 | 12 |
| F2 | Correlación de Pearson | -,085 | 1 | -,514 | ,370 | ,255 | -,155 | ,516 | -,197 | -,576* | ,917** | -,923** | -,920** | ,925** | ,773** | ,909** | ,835** | -,920** | ,920** |
| | Sig. (bilateral) | ,794 | | ,087 | ,236 | ,423 | ,630 | ,086 | ,539 | ,050 | ,000 | ,000 | ,000 | ,000 | ,003 | ,000 | ,001 | ,000 | ,000 |
| | N | 12 | 12 | 12 | 12 | 12 | 12 | 12 | 12 | 12 | 12 | 12 | 12 | 12 | 12 | 12 | 12 | 12 | 12 |
| F3 | Correlación de Pearson | ,410 | -,514 | 1 | -,341 | -,267 | ,378 | ,086 | ,426 | ,020 | -,547 | ,499 | ,571 | -,529 | -,367 | -,514 | -,493 | ,565 | -,564 |
| | Sig. (bilateral) | ,186 | ,087 | | ,277 | ,402 | ,226 | ,790 | ,167 | ,950 | ,066 | ,099 | ,053 | ,077 | ,241 | ,087 | ,103 | ,056 | ,056 |
| | N | 12 | 12 | 12 | 12 | 12 | 12 | 12 | 12 | 12 | 12 | 12 | 12 | 12 | 12 | 12 | 12 | 12 | 12 |
| F4 | Correlación de Pearson | -,842** | ,370 | -,341 | 1 | -,407 | -,885** | ,173 | -,022 | -,040 | ,672* | -,600* | -,676* | ,636* | ,397 | ,661* | ,717** | -,675* | ,675* |
| | Sig. (bilateral) | ,001 | ,236 | ,277 | | ,189 | ,000 | ,592 | ,945 | ,901 | ,017 | ,039 | ,016 | ,026 | ,201 | ,019 | ,009 | ,016 | ,016 |
| | N | 12 | 12 | 12 | 12 | 12 | 12 | 12 | 12 | 12 | 12 | 12 | 12 | 12 | 12 | 12 | 12 | 12 | 12 |
| F5 | Correlación de Pearson | ,323 | ,255 | -,267 | -,407 | 1 | ,224 | ,522 | -,375 | ,184 | -,076 | ,078 | ,037 | -,067 | -,155 | -,119 | -,212 | ,047 | -,048 |
| | Sig. (bilateral) | ,306 | ,423 | ,402 | ,189 | | ,484 | ,082 | ,230 | ,567 | ,814 | ,809 | ,910 | ,836 | ,631 | ,713 | ,509 | ,886 | ,883 |
| | N | 12 | 12 | 12 | 12 | 12 | 12 | 12 | 12 | 12 | 12 | 12 | 12 | 12 | 12 | 12 | 12 | 12 | 12 |
| FM | Correlación de Pearson | ,979** | -,155 | ,378 | -,885** | ,224 | 1 | -,011 | ,055 | -,406 | -,418 | ,293 | ,429 | -,355 | -,063 | -,417 | -,519 | ,428 | -,428 |
| | Sig. (bilateral) | ,000 | ,630 | ,226 | ,000 | ,484 | | ,972 | ,864 | ,190 | ,176 | ,356 | ,164 | ,257 | ,846 | ,177 | ,084 | ,165 | ,165 |
| | N | 12 | 12 | 12 | 12 | 12 | 12 | 12 | 12 | 12 | 12 | 12 | 12 | 12 | 12 | 12 | 12 | 12 | 12 |

Continuación Anexo C- 5. Correlaciones de Pearson para las fracciones de cobre y algunas propiedades del suelo.

| | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|------------------------|------------------------|-------|---------|-------|--------|-------|-------|-------|-------|---------|---------|---------|-------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| FT | Correlación de Pearson | ,186 | ,516 | ,086 | ,173 | ,522 | -,011 | 1 | -,165 | -,325 | ,367 | -,403 | -,394 | ,394 | ,278 | ,315 | ,202 | -,385 | ,384 |
| | Sig. (bilateral) | ,562 | ,086 | ,790 | ,592 | ,082 | ,972 | | ,607 | ,302 | ,241 | ,194 | ,206 | ,205 | ,381 | ,319 | ,529 | ,217 | ,218 |
| | N | 12 | 12 | 12 | 12 | 12 | 12 | 12 | 12 | 12 | 12 | 12 | 12 | 12 | 12 | 12 | 12 | 12 | 12 |
| % R | Correlación de Pearson | ,026 | -,197 | ,426 | -,022 | -,375 | ,055 | -,165 | 1 | -,011 | -,152 | ,154 | ,191 | -,162 | ,025 | -,083 | -,007 | ,179 | -,177 |
| | Sig. (bilateral) | ,935 | ,539 | ,167 | ,945 | ,230 | ,864 | ,607 | | ,974 | ,638 | ,632 | ,551 | ,614 | ,939 | ,798 | ,983 | ,578 | ,581 |
| | N | 12 | 12 | 12 | 12 | 12 | 12 | 12 | 12 | 12 | 12 | 12 | 12 | 12 | 12 | 12 | 12 | 12 | 12 |
| Arcilla (%) | Correlación de Pearson | -,440 | -,576* | ,020 | -,040 | ,184 | -,406 | -,325 | -,011 | 1 | -,700** | ,451** | ,016 | -,717** | ,007 | -,020 | ,028 | ,628** | -,430** |
| | Sig. (bilateral) | ,152 | ,050 | ,950 | ,901 | ,567 | ,190 | ,302 | ,974 | | ,000 | ,006 | ,926 | ,000 | ,966 | ,907 | ,872 | ,000 | ,009 |
| | N | 12 | 12 | 12 | 12 | 12 | 12 | 12 | 12 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 |
| pH 1:2 | Correlación de Pearson | -,369 | ,917** | -,547 | ,672* | -,076 | -,418 | ,367 | -,152 | -,700** | 1 | -,688** | -,246 | ,677** | ,300 | ,345* | ,282 | -,702** | ,501** |
| | Sig. (bilateral) | ,238 | ,000 | ,066 | ,017 | ,814 | ,176 | ,241 | ,638 | ,000 | | ,000 | ,147 | ,000 | ,075 | ,039 | ,095 | ,000 | ,002 |
| | N | 12 | 12 | 12 | 12 | 12 | 12 | 12 | 12 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 |
| CIC (meq /100g) | Correlación de Pearson | ,239 | -,923** | ,499 | -,600* | ,078 | ,293 | -,403 | ,154 | ,451** | -,688** | 1 | ,201 | ,003 | -,380* | -,419* | -,365* | ,110 | ,021 |
| | Sig. (bilateral) | ,454 | ,000 | ,099 | ,039 | ,809 | ,356 | ,194 | ,632 | ,006 | ,000 | | ,240 | ,985 | ,022 | ,011 | ,028 | ,523 | ,903 |
| | N | 12 | 12 | 12 | 12 | 12 | 12 | 12 | 12 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 |
| Al Interc. (meq /100g) | Correlación de Pearson | ,374 | -,920** | ,571 | -,676* | ,037 | ,429 | -,394 | ,191 | ,016 | -,246 | ,201 | 1 | ,002 | -,781** | -,908** | -,882** | ,493** | -,682** |
| | Sig. (bilateral) | ,231 | ,000 | ,053 | ,016 | ,910 | ,164 | ,206 | ,551 | ,926 | ,147 | ,240 | | ,991 | ,000 | ,000 | ,000 | ,002 | ,000 |
| | N | 12 | 12 | 12 | 12 | 12 | 12 | 12 | 12 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 |

Continuación Anexo C- 6. Correlaciones de Pearson para las fracciones de cobre y algunas propiedades del suelo.

| | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|----------------|------------------------|-------|---------|-------|--------|-------|-------|-------|-------|---------|---------|--------|---------|---------|--------|--------|--------|---------|---------|
| MO (%) | Correlación de Pearson | -,302 | ,925** | -,529 | ,636* | -,067 | -,355 | ,394 | -,162 | -,717** | ,677** | ,003 | ,002 | 1 | -,072 | -,080 | -,121 | -,858** | ,672** |
| | Sig. (bilateral) | ,340 | ,000 | ,077 | ,026 | ,836 | ,257 | ,205 | ,614 | ,000 | ,000 | ,985 | ,991 | | ,678 | ,644 | ,481 | ,000 | ,000 |
| | N | 12 | 12 | 12 | 12 | 12 | 12 | 12 | 12 | 12 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 |
| Fe (mg/Kg) | Correlación de Pearson | -,034 | ,773** | -,367 | ,397 | -,155 | -,063 | ,278 | ,025 | ,007 | ,300 | -,380* | -,781** | -,072 | 1 | ,870** | ,828** | -,353* | ,502** |
| | Sig. (bilateral) | ,917 | ,003 | ,241 | ,201 | ,631 | ,846 | ,381 | ,939 | ,966 | ,075 | ,022 | ,000 | ,678 | | ,000 | ,000 | ,035 | ,002 |
| | N | 12 | 12 | 12 | 12 | 12 | 12 | 12 | 12 | 12 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 |
| Mg (meq /100g) | Correlación de Pearson | -,379 | ,909** | -,514 | ,661* | -,119 | -,417 | ,315 | -,083 | -,020 | ,345* | -,419* | -,908** | -,080 | ,870** | 1 | ,987** | -,417* | ,588** |
| | Sig. (bilateral) | ,224 | ,000 | ,087 | ,019 | ,713 | ,177 | ,319 | ,798 | ,907 | ,039 | ,011 | ,000 | ,644 | ,000 | | ,000 | ,011 | ,000 |
| | N | 12 | 12 | 12 | 12 | 12 | 12 | 12 | 12 | 12 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 |
| Ca (meq /100g) | Correlación de Pearson | -,500 | ,835** | -,493 | ,717** | -,212 | -,519 | ,202 | -,007 | ,028 | ,282 | -,365* | -,882** | -,121 | ,828** | ,987** | 1 | -,372* | ,555** |
| | Sig. (bilateral) | ,098 | ,001 | ,103 | ,009 | ,509 | ,084 | ,529 | ,983 | ,872 | ,095 | ,028 | ,000 | ,481 | ,000 | ,000 | | ,025 | ,000 |
| | N | 12 | 12 | 12 | 12 | 12 | 12 | 12 | 12 | 12 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 |
| MOH (%) | Correlación de Pearson | ,375 | -,920** | ,565 | -,675* | ,047 | ,428 | -,385 | ,179 | ,628** | -,702** | ,110 | ,493** | -,858** | -,353* | -,417* | -,372* | 1 | -,944** |
| | Sig. (bilateral) | ,230 | ,000 | ,056 | ,016 | ,886 | ,165 | ,217 | ,578 | ,000 | ,000 | ,523 | ,002 | ,000 | ,035 | ,011 | ,025 | | ,000 |
| | N | 12 | 12 | 12 | 12 | 12 | 12 | 12 | 12 | 12 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 |
| MOF (%) | Correlación de Pearson | -,375 | ,920** | -,564 | ,675* | -,048 | -,428 | ,384 | -,177 | -,430** | ,501** | ,021 | -,682** | ,672** | ,502** | ,588** | ,555** | -,944** | 1 |
| | Sig. (bilateral) | ,229 | ,000 | ,056 | ,016 | ,883 | ,165 | ,218 | ,581 | ,009 | ,002 | ,903 | ,000 | ,000 | ,002 | ,000 | ,000 | ,000 | |
| | N | 12 | 12 | 12 | 12 | 12 | 12 | 12 | 12 | 12 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 |

** La correlación es significativa al nivel 0,01 (bilateral).

* La correlación es significante al nivel 0,05 (bilateral).