

UNIVERSIDAD CENTRAL DE VENEZUELA
FACULTAD DE CIENCIAS
ESCUELA DE QUÍMICA
INSTITUTO DE CIENCIAS DE LA TIERRA
DEPARTAMENTO DE GEOQUÍMICA



**“ESTUDIO SOBRE LA RETENCIÓN DE NUTRIENTES EN SUELOS
ÁCIDOS DE SABANA ENMENDADOS CON LODOS ROJOS
NEUTRALIZADOS CON SALMUERA MARINA, Y SU EFECTO SOBRE
LA ESPECIE *Chrysopogon zizanioides* (VETIVER)”**

Trabajo Especial de Grado presentado
ante la Ilustre Universidad Central de
Venezuela por la **Br. Luanda Vanderly
Concha Díaz** como requisito para
aprobar la asignatura Proyecto
Geoquímico II y optar al título de
Licenciada en Geoquímica.

Caracas, Mayo de 2017

ACTA

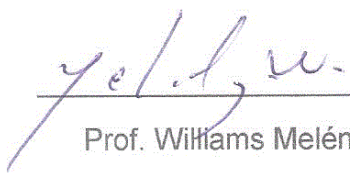
Los abajo firmantes, designados por la Universidad Central de Venezuela, como integrantes del Jurado examinador del Trabajo Especial de Grado titulado: "Estudio sobre la retención de nutrientes en suelos ácidos de sabana enmendados con lodos rojos neutralizados con salmuera marina, y su efecto sobre la especie *Chrysopogon zizanioides* (vetiver)" presentado por la Br. Luanda Vanderly Concha Díaz, certificamos que este trabajo cumple con los requisitos exigidos por nuestra Magna Casa de Estudios para optar al título de Licenciada en Geoquímica.



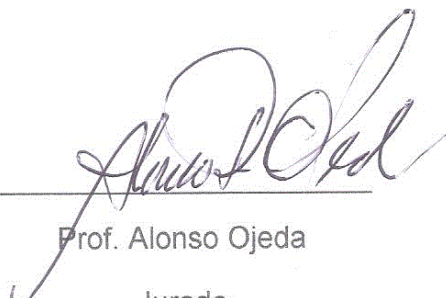
Prof. Santiago Marrero
Tutor



Prof. José Vicente Gutiérrez
Tutor



Prof. Williams Meléndez
Jurado



Prof. Alonso Ojeda
Jurado

DEDICATORIA

*A la mujer más maravillosa
que la vida pudo darme como
madre, gracias a la cual soy la
persona que soy, quien me
enseño que hay que trabajar
duro y nunca rendirse para
alcanzar las metas. A la mujer
que amo con mi vida, todo es
gracias a ti mamá.*

AGRADECIMIENTOS

Primeramente a la magna casa de estudios en la que pude formarme como profesional y crecer como ser humano, la gran Universidad Central de Venezuela, en especial a la Facultad de Ciencias. A todos los profesores que con su amor por la generación y transmisión de conocimiento han llevado adelante la loable labor de enseñarnos a pesar de las dificultades que ha enfrentado nuestra universidad.

Agradezco en especial a mis tutores, mi querido profe Santiago y profe José Vicente, quienes me guiaron en la realización de este proyecto, por su paciencia y sus valiosos aportes tanto en el proyecto como en mi formación académica. Así como también a mis jurados los profesores Williams y Alonso por su asesoría a lo largo del proyecto.

A todo el personal que labora en el Instituto de Ciencias de la Tierra y en el Instituto de Zoología Tropical, por la colaboración prestada para llevar a cabo los análisis de la presente investigación.

Agradezco a mi pequeña familia, en especial a las mujeres más fuertes que tengo la dicha de conocer, mi mamá y mi vovó por su apoyo incondicional, este nuevo logro es debido a ustedes.

Y por último, pero no menos importante a esa familia que se elige, a mis amigos, que me apoyaron algunos desde más lejos que otros (Eva, Bei, Jorge y Ale) y otros viéndonos casi a diario en el laboratorio, en especial a los que me ayudaron cuando lo necesité en el laboratorio (Andrés, Gene, Lineu y Kevin). E infinitas gracias a mi súper ayudante, mi amigo y novio Juan Luis, por tomar parte del montaje de los ensayos y siempre estar pendiente de toda mi tesis.

¡Gracias a todos por su aporte!

RESUMEN

Los lodos rojos como material residual producto del proceso industrial de extracción de aluminio en numerosos países, y siendo considerado un material peligroso ambientalmente, ha impulsado diversos estudios para sus posibles usos. La presente investigación se llevó a cabo para estudiar el impacto sobre la retención de nutrientes en suelos ácidos de sabana con aplicación de dichos lodos (neutralizados con salmuera marina) y determinar el efecto de dicha enmienda sobre el desarrollo de la especie *Chrysopogon zizanioides* (vetiver). Para la realización de este estudio se llevaron a cabo 8 ensayos, cada uno de ellos realizado por triplicado, los cuales comprendían 4 controles sin enmienda: suelos ácidos de sabana (S), suelos plantados (SP), suelos con aplicación de fertilizante (SF) y suelos plantados con aplicación de fertilizante (SFP); y 4 ensayos enmendados (mezcla con lodos rojos neutralizados al 2%): suelos enmendados (SL), suelos enmendados plantados (SLP) y suelos emendados plantados con aplicación de fertilizante (SLFP), obteniendo que en los suelos enmendados hubo un incremento importante de retención de los elementos nutrientes N-P-K en relación a los controles sin enmienda. Adicionalmente los valores de pH alcanzados gracias a la enmienda tuvieron un incremento de 5,33 a 7,61 unidades, que es un valor en el cual los elementos nutrientes se encuentran disponibles para ser absorbidos por la biota lo cual se traduce en un incremento en la fertilidad del suelo, así como también el incremento en la capacidad de intercambio catiónico una vez aplicada la enmienda de 4,383cmol/kg en el suelo ácido a 6,739cmol/kg en el suelo enmendado al finalizar el experimento.

Palabras clave: lodos rojos, suelos ácidos, enmiendas, vetiver, elementos nutrientes.

ÍNDICE DE CONTENIDO

	Página
INTRODUCCIÓN _____	1
Objetivo General.....	3
Objetivos Específicos	3
Fundamentos teóricos _____	4
Suelos.....	4
Propiedades del suelo	6
Textura _____	6
Porosidad del suelo _____	7
Estructura _____	8
Retención de humedad _____	9
Intercambio iónico _____	10
pH en los suelos _____	12
Elementos Nutrientes	13
Coloides del suelo	15
Procesos de degradación del Suelo	15
Degradación física _____	16
Degradación química _____	17
Acidez de los suelos	18
Enmienda de suelos	19
Lodos rojos	20
Neutralización de lodos rojos con salmuera marina	21
Chrysopogon zizanioides.....	22
Antecedentes.....	23

Metodología experimental _____	28
Etapa de oficina.....	28
Etapa de campo y tratamiento de muestras	28
Etapa de laboratorio	29
Preparación de los ensayos _____	29
Análisis químico de las muestras _____	33
Determinación de CIC _____	33
Determinación de N mediante el método Kjeldahl _____	36
Determinación de P mediante absorción molecular en el espectro UV-visible _____	39
Determinación de K mediante la técnica de espectroscopia de emisión atómica _____	43
Desarrollo de la especie <i>Chrysopogon zizanioides</i> _____	43
Resultados y discusión _____	44
Crecimiento de la especie <i>Chrysopogon zizanioides</i> (vetiver).....	44
Determinación de pH y variaciones	46
Determinación de conductividad eléctrica y variaciones.....	50
Determinación de la capacidad de intercambio cationico	55
Análisis químico de las muestras	56
Nitrógeno _____	57
Fósforo _____	61
Potasio _____	65
Tratamiento estadístico de los datos _____	68
Conclusiones _____	70
Recomendaciones _____	72
Referencias bibliográficas _____	73
Apéndice A- Neutralización de lodos rojos provenientes de la bomba GEHO con salmuera marina en proporción 4:1 masa (g)/volumen (mL).	78
Apéndice B- Cantidad de muestra por ensayo y dosificación de fertilizante N-P-K. _____	78

Apéndice C- Parámetros de crecimiento evaluados en el vetiver. _____	79
Apéndice D- Mediciones de pH en muestras de sustrato y sus lixiviados. _____	78
Apéndice E- Mediciones de conductividad eléctrica en muestras de sustrato y sus lixiviados. _____	81
Apéndice F- Determinación de la capacidad de intercambio catiónico en muestras de sustrato. _____	84
Apéndice G- Determinación de N_T en las muestras de sustrato y sus lixiviados. _____	85
Apéndice H. Determinación de P_T en muestras de sustrato y sus lixiviados. _____	89
Apéndice I. Determinación de K_T en muestras de sustrato y sus lixiviados. _____	99

INDICE DE TABLAS

Tabla 1. Aporte de nutrientes al suelo por parte de algunos minerales primarios.....	14
Tabla 2. Origen de los problemas de acidez en el suelo.....	19
Tabla 3. Composición química de los lodos rojos.....	21
Tabla 4. Parámetros de crecimiento determinados en el vetiver (<i>Chrysopogon zizanioides</i>).....	44

INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Composición por volumen del sistema suelo.....	5
Figura 2. Representación de un perfil de suelo.....	6
Figura 3. Triángulo de textura de suelos.....	7
Figura 4. Curvas de retención de humedad del suelo según su composición textural.....	10
Figura 5. Mecanismo de intercambio catiónico.....	11
Figura 6. Generación de cargas positivas y negativas en la superficie de una arcilla.....	12
Figura 7. Macollo de vetiver suministrado por la Facultad de Agronomía de la UCV.....	29
Figura 8. Plántulas en etapa de enraizamiento.....	30
Figura 9. Ensayos experimentales y controles.....	31
Figura 10. Ensayos plantados con vetiver.....	32
Figura 11. Ensayos de control sin planta.....	32
Figura 12. Colección de las submuestras en los ensayos.....	33
Figura 13. Esquema experimental para la determinación de CIC.....	35
Figura 14. Equipo digestor y destilador VELP utilizado para el tratamiento de muestras de sustrato.....	36
Figura 15. Titulación ácido base para determinación de %N.....	37
Figura 16. Esquema experimental para digestión de la muestra.....	38
Figura 17. Esquema experimental para la determinación de N total.....	38
Figura 18. Perlas de fusión y disolución en HNO_3	39

Figura 19. Preparación y medida del complejo coloreado de P.....	40
Figura 20. Esquema experimental para la fusión de la muestra.....	41
Figura 21. Esquema experimental para la determinación de P total.....	42
Figura 22. Efectos del exceso de potasio (pobre desarrollo y clorosis)...	45

INDICE DE GRÁFICOS

Gráfico 1. Variación de pH en las muestras de sustrato en el tiempo.....	48
Gráfico 2. Variación de pH en suelos enmendados en el tiempo.....	49
Gráfico 3. Variación de pH en lixiviados en el tiempo.....	50
Gráfico 4. Variación de C.E. en muestra de sustratos en el tiempo.....	51
Gráfico 5. Variación de C.E. en muestras de suelo sin enmienda en el tiempo.....	52
Gráfico 6. Variación de C.E. de las muestras de lixiviado en el tiempo....	53
Gráfico 7. Variación de C.E. en muestras de lixiviado de suelos sin enmienda en el tiempo.....	54
Gráfico 8. Variación de C.I.C. para muestras de sustrato en el tiempo....	55
Gráfico 9. Variación en la concentración de N en muestras de suelo sin enmendar en el tiempo.....	57
Gráfico 10. Variación de la concentración de N en muestras de suelo enmendado en el tiempo.....	58
Gráfico 11. Variación en la concentración de N en muestras de lixiviado en el tiempo.....	59
Gráfico 12. Variación de la concentración de N en muestras de lixiviado de suelos sin aplicación de fertilizante en el tiempo.....	60

Gráfico 13. Variación en la concentración de P en muestras de sustrato en el tiempo.....	61
Gráfico 14. Variación en la concentración de P en muestras de sustrato sin aplicación de fertilizante en el tiempo.....	62
Gráfico 15. Variación de la concentración de P en muestras de lixiviado en el tiempo.....	63
Gráfico 16. Variación en la concentración de K en muestras de suelo enmendado en el tiempo.....	64
Gráfico 17. Variación de la concentración de K en muestras de suelo sin enmendar en el tiempo.....	65
Gráfico 18. Variación de la concentración de K en muestras de lixiviados en el tiempo.....	66

INTRODUCCIÓN

El suelo, desde el punto de vista geoquímico, representa un sistema de gran importancia para la distribución de los elementos en la biosfera. Del mismo modo, también posee una gran importancia en el ámbito económico debido al desarrollo de actividades agropecuarias para la satisfacción de las necesidades de la creciente población. Desde un punto de vista ecológico el suelo es el subsistema de los ecosistemas terrestres, en donde se realiza principalmente el proceso de descomposición de materia orgánica obteniendo sucesiva y cíclicamente los nutrientes esenciales para mantener la biota.

Las características de dicho sistema están sujetas a las condiciones ambientales en el que éste se encuentra. Entre éstas: la pluviosidad, temperatura, tiempo, litología del material parental, topografía y biota.

Actualmente existe la necesidad de aprovechar los suelos a nivel global, para satisfacer la demanda de la creciente población en lo referente a la explotación de los suelos en actividades agropecuarias. En el caso particular del territorio nacional, existe un sistema de sabanas que ocupa una gran extensión (18.000 km²), sin embargo, sus características fisicoquímicas (entre las que se encuentran pH bajos, un drenaje interno altamente efectivo y una escasa capacidad de intercambio catiónico) han generado una baja fertilidad y productividad en estos ecosistemas (Valera, 2009).

Entre diversos métodos que se han empleado, para la enmienda y recuperación de suelos ácidos se encuentra uno de tipo inorgánico, que se lleva a cabo a través de la aplicación y mezcla de los suelos de sabana con los lodos rojos tratados con diversos agentes neutralizantes (yeso, sulfuro de hierro, fosfoyeso, ácido diluido, agua de mar o salmuera marina) (Vlahos et al., 1989; Summers et. al, 1993; Ward y Summers, 1993; Summers et. al, 1996; Summers et. al, 2001; Snars et. al, 2003;

Snars et. al, 2004; Fernandes, 2012; González, 2015) . Estos hacen posible la enmienda de suelos ácidos arenosos, incrementando el pH y reduciendo la disponibilidad de metales tóxicos para las plantas, tal es el caso del cadmio y níquel, lo que mejora la fertilidad del suelo. El contenido de óxidos en los lodos rojos promueve la retención de fósforo, y su textura fina contribuye a la retención de agua en los suelos ácidos arenosos infértiles (Summers et al., 1996; Snars et al. 2003).

La neutralización de los lodos rojos se realiza con la finalidad de disminuir el pH de los mismos, que alcanza valores de alta basicidad (≥ 10), y lograr alcanzar valores más cercanos a la neutralidad. Además de lo anteriormente mencionado, el uso de la salmuera marina como agente neutralizante contribuye a mejorar la composición química de los lodos rojos, desde el punto de vista de fertilidad mediante la incorporación de elementos nutrientes como lo son el magnesio y calcio, lo que le proporciona mayor valor como enmienda.

Venezuela es uno de los principales países productores de alúmina, por lo que se dispone del residuo generado (lodos rojos) en cantidades suficientes para la aplicación de estos en la enmienda de suelos de sabana, una vez neutralizados con salmuera marina.

Por otra parte, en estudios recientes realizados en la zona (González, 2015), se han establecido las proporciones óptimas para la mezcla, entre lodos rojos neutralizados con salmuera marina en suelos ácidos de sabana, correspondiendo dicha proporción a 2% de los lodos rojos, sin embargo, no había sido cuantificada la capacidad de retención de las especies de macronutrientes primarios como N, P y K, y la movilidad de los mismos dentro del sistema.

En función de esto se propuso la determinación de los elementos N, P y K en los sustratos y los lixiviados de suelos plantados con la especie *Chrysopogon zizanioides* (Vetiver) haciendo uso de fertilizante de

formula completa. En tal sentido fueron planteados los siguientes objetivos:

OBJETIVO GENERAL

Estudiar la retención de nutrientes en un sustrato compuesto por una mezcla de Suelos Ácidos de Sabana con Lodos Rojos Neutralizados, con uso y sin uso de fertilizante de fórmula completa y su efecto sobre la especie *Chrysopogon zizanioides* (Vetiver).

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Evaluar la variabilidad de los parámetros físico-químicos (pH, conductividad eléctrica y capacidad de intercambio catiónico) en los sustratos de prueba.
2. Determinar la concentración de los nutrientes N, P, K en los sustratos de prueba y sus lixiviados.
3. Definir la variación en la retención de los nutrientes.
4. Contrastar el desarrollo de la especie *Chrysopogon zizanioides* en los sustratos de prueba.

FUNDAMENTOS TEÓRICOS

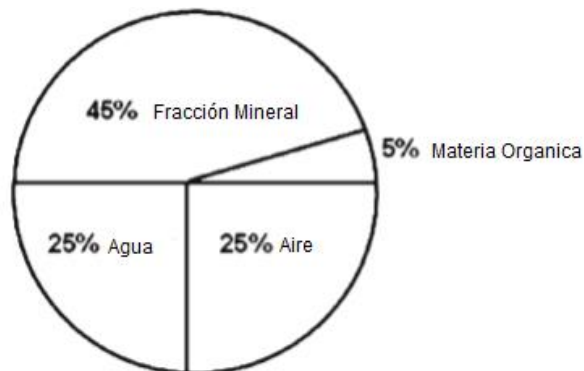
En la siguiente sección se lleva a cabo la revisión de ciertos términos básicos, los cuales representan la base conceptual del trabajo de investigación propuesto.

Suelos

Los suelos son materiales biogeoquímicos complejos en los cuales puede desarrollarse la biota, con propiedades estructurales, químicas, mineralógicas y biológicas diferentes a los materiales a partir de los cuales se originan. Son, a su vez, sistemas ecológicos dinámicos que proporcionan soporte, agua, nutrientes y air a las plantas, además de mantener una gran población de microorganismos, los cuales reciclan los materiales de la vida. (Singer y Munns, 1999)

Los suelos siendo materiales biogeoquímicos de gran complejidad, que se definen en tres fases, sólida, líquida y gaseosa, las cuales pueden variar en proporción, pero en condiciones ideales guardan una relación en base a volumen de 50% de fase sólida, y el restante 50% la fase no sólida. (Adams, 1995). A su vez, la fracción sólida está compuesta de aproximadamente 45% de fracción mineral y 5% de materia orgánica, que incluye a la biota; por otro lado la fase no sólida, se compone principalmente de agua y aire en proporciones que pueden ser variables dependiendo de las características climáticas, pero idealmente se encuentran en iguales proporciones (Figura 1) (Osman, 2013).

Cabe destacar que en la fracción mineral, la distribución de los elementos en la extensión del suelo, depende tanto del porcentaje original



en el material parental que dio origen al suelo, como de la variación que se va dando gracias a la meteorización, que depende de la resistencia de estos, ya que muchos se vuelven inestables a las nuevas condiciones fisicoquímicas en la superficie de la corteza. (Casanova, 2005).

Figura 1. Composición por volumen del sistema suelo. Tomado de Osman, 2013.

La génesis del suelo (pedogénesis) se da como producto de un largo proceso en el que interviene: el clima; seres vivos; el material parental, es decir la roca más superficial en la corteza; la topografía y el tiempo, y es mediante las interacciones entre estos factores, que el sistema suelo va evolucionando gracias a los cambios en composición, textura y porosidad, que generan los agentes meteorizantes, y se va produciendo la diferenciación en horizontes del sistema (Figura 2). A medida que este proceso de evolución avanza, el suelo deja de tener características similares al material que le dio origen. (Osman, 2013)

Un suelo, entonces, es una entidad con tres dimensiones: dos laterales y una vertical, es decir, largo, ancho y profundidad; siendo la unidad más pequeña de un suelo, denominada pedon, y la misma puede ser definida como la sección vertical de la superficie del suelo (Osman, 2013).

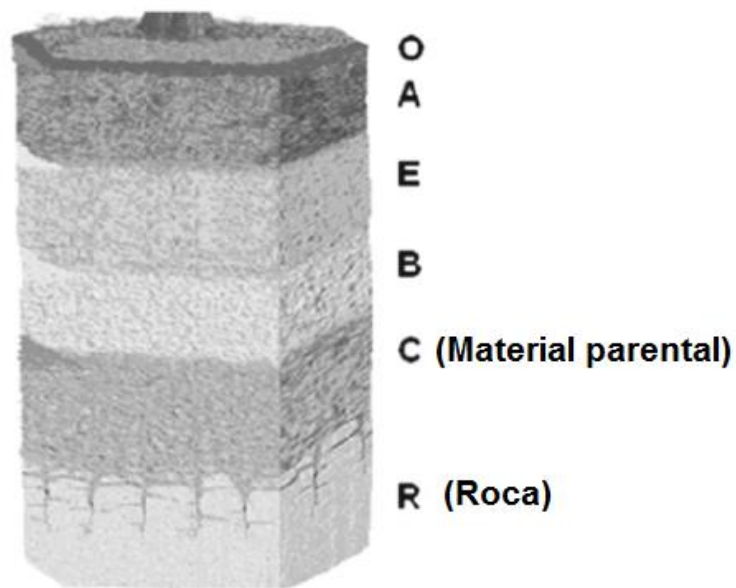


Figura 2. Representación de un perfil de suelo. Tomado de Osman, 2013.

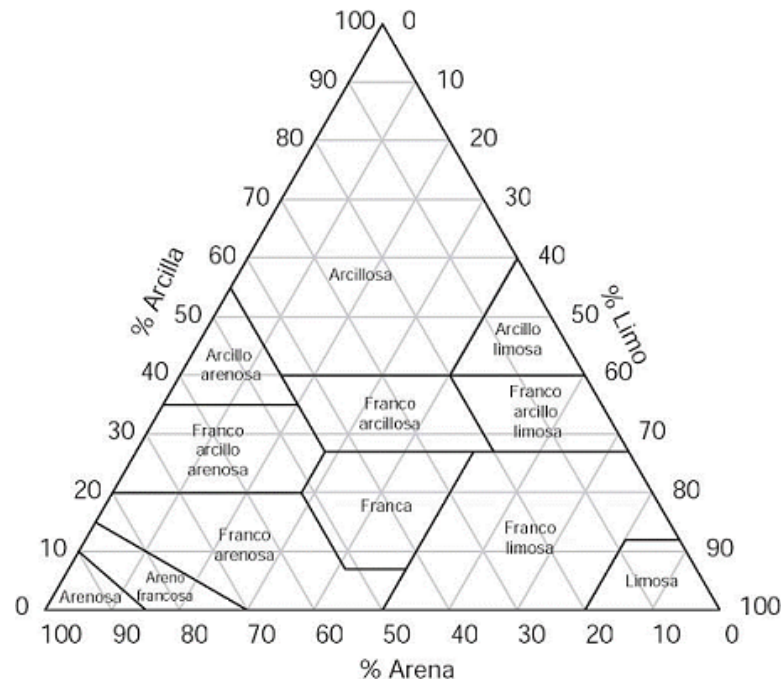
Propiedades del suelo

Las propiedades físicas del suelo tienen mucho que ver con su idoneidad para los muchos usos que se le da. La rigidez y la capacidad de soporte, el drenaje y la capacidad de retención de humedad, plasticidad, facilidad de penetración de raíces, aireación, y retención de nutrientes, están íntimamente conectados con las condiciones físicas del suelo (Foth, 1990) por lo tanto es importante señalar, que todas ellas vienen dadas por:

Textura

La textura del suelo se refiere a la proporción de componentes inorgánicos de diferentes formas y tamaños como arena, limo y arcilla. Es una propiedad importante ya que influye como factor de fertilidad y en la habilidad de retener agua, aireación, drenaje, contenido de materia orgánica y otras propiedades (Osman, 2013)

Como herramienta para clasificar la textura se tiene el triángulo de textura de suelos (Figura 3), en donde las partículas que componen el



suelo son aquellas de tamaño $<2,0\text{mm}$, como arenas, limos y arcillas.

Figura 3. Triángulo de textura de suelos. Tomado de Osman, 2013.

Siendo los suelos con mayor contenido limoso los que poseen una mayor capacidad de retención de agua disponible para el crecimiento de planta, debido a su combinación única de área superficial y tamaño de poros (Foth, 1990). Igualmente cabe desatacar que cuando predominan componentes orgánicos dentro del suelo, estos son de tipo orgánicos en lugar de minerales.

Porosidad del suelo

El espacio poroso total es el volumen de suelo ocupado por aire y agua. El volumen porcentual del espacio poroso total es lo que se conoce como porosidad (Foth, 1990). La cantidad de espacio poroso es determinada en gran manera por el arreglo de las partículas sólidas. Si estas se encuentran muy cercanas, como en las arenas o suelos compactados, la porosidad total es baja. Si dichas partículas se

encuentran en agregados porosos como es el caso de los suelos de texturas medias, con altos contenidos de materia orgánica, el espacio poroso por unidad de volumen será alto (Brady, 1984).

Los poros más grandes en el suelo son llamados macroporos, y los más pequeños, microporos, pero dicha separación es arbitraria. Los macroporos, drenan el agua más rápidamente después de la saturación por la lluvia, mientras que los microporos retienen agua aun después de que los macroporos se han vaciado (Singer y Munns, 1999), parte de la cual es disponible para las plantas. (FAO, 2016).

Estructura

La estructura se refiere a la combinación o arreglo de las partículas primarias del suelo (arena, limo y arcilla) para formar partículas secundarias o agregados (también llamados peds). Estos agregados se encuentran separados de las unidades adyacentes por superficies de debilidad. (Foth, 1984). La estructura es una importante característica morfológica del suelo debido a que controla el tamaño y número de poros asociado a los agregados (Singer y Munns, 1999)

La estructura del suelo modifica la influencia de la textura sobre la humedad y la aireación, y sus relaciones (Foth, 1990), así como la conducción térmica, el crecimiento radicular y la resistencia a la erosión. El agua es el componente elemental que afecta la estructura del suelo con mayor importancia, debido a su capacidad de precipitar o llevar a solución fases minerales y a sus efectos en el crecimiento de las plantas. (FAO, 2016) Esto a su vez afecta en cierta medida la composición química del sistema, variando las concentraciones de elementos nutrientes en el mismo.

Para la formación de agregados o peds, se necesita que el material coloidal sea primeramente floculado, y luego estabilizado o cementado y dado que estos coloides normalmente están cargados negativamente, las

moléculas de agua (dipolo) se unen a ellos y esta unión agua-partículas coloidales del suelo puede incluir cationes como Ca^{+2} y Mg^{+2} , que ayudan a la floculación de las arcillas. Las moléculas de agua se mantienen unidas fuertemente y en la medida en que el suelo se va secando, la distancia entre las partículas coloidales se hace más corta por lo que tienden a juntarse. Si la pérdida de agua continúa, los coloides se pegan unos a otros o unen las partículas para formar agregados (acción cementante). De esta manera el agua actuando conjuntamente con los coloides, constituyen las fuerzas que induce la agregación en los suelos (Casanova, 2005).

Retención de humedad

Esta propiedad viene dada por la Capacidad de Campo (CC) que se refiere a la cantidad de agua que el suelo es capaz de retener luego de ser saturado (con una succión de 1/3 bar) y dejado drenar libremente evitando procesos de evapotranspiración y hasta que el potencial hídrico se estabilice (tras 24 a 48 horas de la lluvia o riego). El agua que se encuentra ocupando el espacio de los poros más grandes (macroporos) drena hacia capas inferiores bajo la fuerza de gravedad. Los poros más pequeños (microporos) se llenan de agua y los más grandes de aire y agua. La humedad del suelo que se encuentra disponible se puede determinar en el laboratorio (Figura 4) (FAO, 2016).

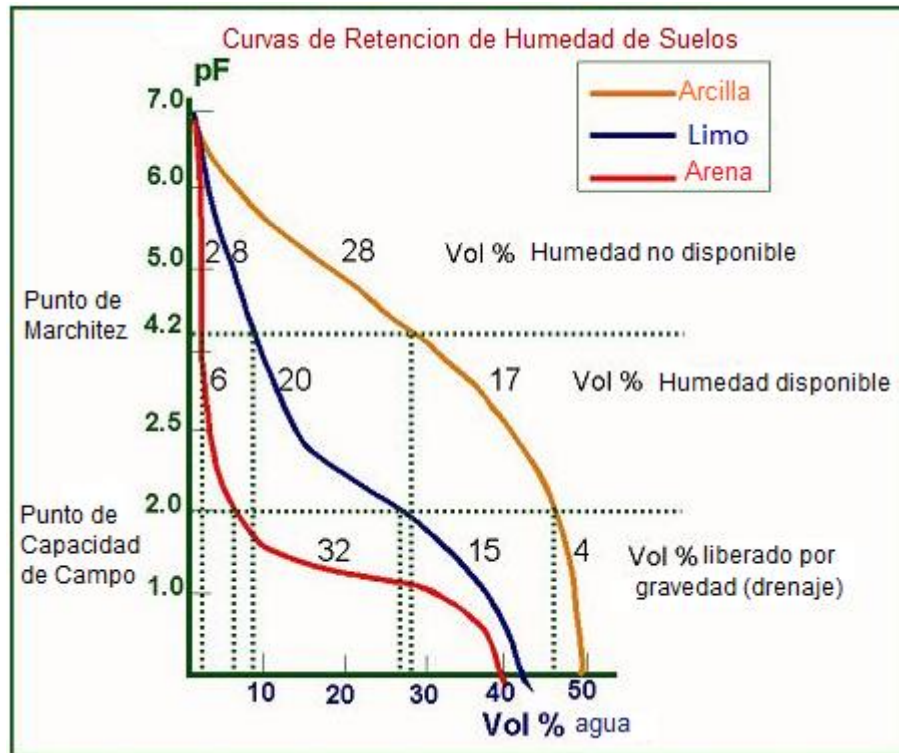


Figura 4. Curvas de retención de humedad del suelo según la composición textural. En eje de las ordenadas se representan el potencial capilar y en de las abscisas los volúmenes de agua en el suelo. (FAO, 2016)

Intercambio iónico

Se trata de un fenómeno basado en la presencia de cargas en las arcillas y demás partículas coloidales de los suelos. Por medio de estas cargas, los iones que son liberados de minerales que han sido sometidos a procesos de meteorización o provenientes de compuestos orgánicos en descomposición, además del agua de lluvia o de riego y de los fertilizantes, pueden ser adsorbidos por las partículas del suelo, siendo retenidos en el mismo. Sin embargo, esta retención no se realiza con una fuerza suficiente que pueda impedir su intercambio con otros iones de la solución del suelo y ser absorbidos por el sistema radical de las plantas. (Casanova, 2005).

Si la carga del ion involucrado es positiva se habla de **Capacidad de Intercambio Catiónico (CIC)**, que se define como la capacidad del suelo para retener cationes (Ca^{+2} , Mg^{+2} , Na^+ , K^+ , NH_4^+ , etc.), mediante la medida de la cantidad de cargas negativas presentes en las superficies de los minerales y componentes orgánicos del mismo (arcillas, materia orgánica o sustancias húmicas); dichos cationes serán intercambiados por otros cationes o iones de hidrógeno presentes en la solución del suelo y liberados por las raíces (Figura 5), y al estar en altas concentraciones en la solución, la tendencia a ser sorbida se incrementa. Otro modo de medir CIC del suelo, es a través de la disponibilidad y cantidad de nutrientes que dicho sistema proporcione a las plantas. La unidad de medición de CIC es en centimoles de carga por kg de suelo cmolc/kg o meq/ 100g de suelo. Un suelo con bajo CIC indica baja habilidad de retener nutrientes, que es de tipo arenoso o pobre en materia orgánica. (FAO, 2016).

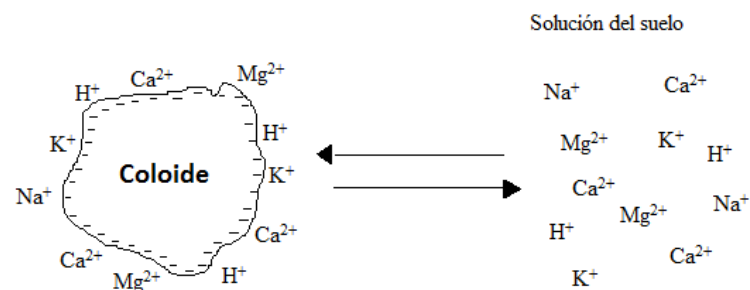


Figura 5. Mecanismo de intercambio catiónico.

En el caso de que la carga del ion involucrado sea negativa, se da un cambio entre aniones en la solución del suelo y aniones que estén adsorbidos en la superficie de materiales con actividad superficial. Dicho mecanismo está asociado con hidróxidos y óxidos, con arcillas silicatadas y materiales amorfos. El proceso de protonación de los grupos OH del mineral, es el que genera una superficie con una carga neta positiva,

dispuesta a adsorber aniones de la solución del suelo, tales como nitratos, fosfatos, cloruros y sulfatos (Figura 6).

Esta cantidad de aniones retenidos de forma intercambiable a un determinado pH expresada en miliequivalentes por 100 gramos de suelo (meq/100g de suelo) se denomina **Capacidad de Intercambio Aniónico** (CIA) (Casanova, 2005)

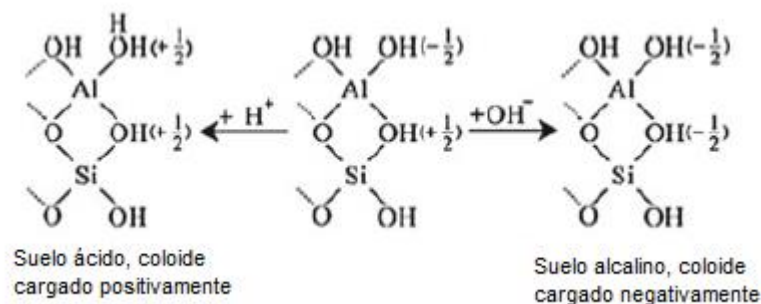


Figura 6. Generación de cargas positivas y negativas en la superficie de una arcilla. Tomado de Osman, 2013.

Ambos procesos de intercambio iónico son de gran importancia al referirnos a la nutrición de las plantas, puesto que determinan la biodisponibilidad de los elementos nutrientes en los suelos.

pH en los suelos

Determina el grado de adsorción de iones (H^+) por las partículas del suelo e indica el nivel de acidez o basicidad del sistema. Es el indicador principal en la disponibilidad de nutrientes para las plantas, influyendo en la solubilidad, movilidad, disponibilidad y de otros constituyentes y contaminantes inorgánicos presentes en el suelo (FAO, 2016).

Tres importantes procesos, o reacciones, contribuyen a una mayor o menor adición de H^+ a los suelos, y estos procesos tienden a hacer los suelos ácidos. El primero relacionado con el proceso de respiración de las raíces y otros organismos del suelo, produce dióxido de carbono que

reacciona con el agua para formar ácido carbónico (H_2CO_3); este ácido débil contribuye a la adición de H^+ a la solución del suelo. El segundo proceso, en donde la acidez es producida cuando la materia orgánica es mineralizada, debido a que ácidos orgánicos se forman y el nitrógeno y azufre mineralizado son oxidados a ácido nítrico y ácido sulfúrico respectivamente. El tercero, debido a precipitados naturales que reaccionan con el dióxido de carbono de la atmósfera, y el ácido carbónico (Foth, 1990)

El valor del pH en el suelo oscila entre 3,5 (muy ácido) a 9,5 (muy alcalino). Los suelos muy ácidos (<5,5) tienden a presentar cantidades elevadas y tóxicas de Al y Mn, mientras que en los suelos muy alcalinos (>8,5) dichos elementos tienden a dispersarse. La actividad de los organismos del suelo es inhibida en suelos muy ácidos y para los cultivos agrícolas el valor del pH ideal se encuentra en 6,5. (FAO, 2016)

Elementos Nutrientes

La cantidad de nutrientes presente en el suelo determina su potencial para alimentar organismos vivos. Las plantas necesitan ciertos *elementos nutrientes esenciales* para completar su ciclo de vida. Ningún otro elemento puede sustituir completamente dichos elementos. Al menos 16 elementos son actualmente considerados esenciales para el crecimiento de las plantas (Foth, 1990).

Carbono (C), hidrógeno (H) y oxígeno (O) son combinados en las reacciones fotosintéticas, y obtenidos del aire y el agua en el sistema. Estos tres elementos componen 90% o más de la materia seca que conforma a las plantas. Los restantes 13 elementos son mayormente obtenidos directamente del suelo. Nitrógeno (N), fósforo (P), potasio (K), calcio (Ca), magnesio (Mg) y azufre (S) son elementos requeridos en relativamente grandes cantidades, y son los así llamados *macronutrientes* (Foth, 1990).

Por otro lado, los elementos requeridos en menores cantidades, son llamados *micronutrientes* e incluyen boro (B), cloro (Cl), cobre (Cu), hierro (Fe), manganeso (Mn), molibdeno (Mo) y zinc (Zn). El cobalto (Co) es un micronutriente necesitado solo por algunas plantas. Aquellas plantas deficientes de algún elemento esencial tienden a exhibir síntomas que son únicos por cada elemento (Foth, 1990).

La composición química del material parental que origina el suelo define, en buena medida, los nutrientes y otros elementos que pueden pasar a él.

Tabla 1. Aporte de nutrientes al suelo por parte de algunos minerales primarios. (Adaptado de Mejía, 1980a, b) Tomado de *Introducción a la ciencia del suelo*, Jaramillo D. UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA FACULTAD DE CIENCIAS MEDELLÍN

MINERAL	APORTE AL SUELO
Feldespatos	K, Na, Ca, Minerales arcilla
Anfíboles	Ca, Na, Mg, Fe
Piroxenos	Ca, Mg, Fe
Micas	K, Mg, Na, Fe, minerales arcilla
Óxidos de hierro	Fe, minerales arcilla
Olivino	Fe, Mg
Carbonatos	Ca, Mg
Sulfuros	S, Ca
Fosfatos	P, Ca

Coloides del suelo

Una partícula coloidal es aquella que posee un tamaño menor de 0.001 mm de diámetro (1000 nm), dimensiones responsables de la alta superficie específica que las caracteriza; poseen, además, carga eléctrica que les confiere una alta reactividad química. La superficie específica de un cuerpo es el área total que expone, es decir, es el área externa que posee ese cuerpo por unidad de peso del mismo (Jaramillo, 2002).

En el suelo, los coloides están representados por las partículas de tamaño arcilla y por los compuestos húmicos; y son los responsables de la actividad química que se desarrolla en dicho sistema, así como de buena parte de su comportamiento físico (Jaramillo, 2002).

Los coloides del suelo pueden poseer dos tipos de carga: permanente o variable, mediante la acción de diferentes mecanismos y, según Yu (1997), los componentes del suelo que pueden aportar carga superficial son los minerales silicatados laminares, los óxidos libres, y el humus. Los silicatos aportan principalmente carga permanente y negativa, excepto cuando son del tipo de arcillas 1:1; los óxidos de Fe, Al y Mn aportan carga variable, tanto negativa como positiva y el humus aporta carga variable, principalmente negativa. (Jaramillo, 2002).

Resulta importante señalar otra de las propiedades más características que poseen los coloides, como lo es su habilidad para adsorber sustancias disueltas en una solución, ya que esta se presenta en el sistema suelo cuando se dan interacciones principalmente entre la fase sólida, líquida y la superficie de las partículas minerales y orgánicas del suelo. Una de las interacciones más estudiada es de tipo electrostática entre un catión o un anión y la superficie sólida cargada, según la naturaleza de esta fuerza nos referimos al proceso de Intercambio iónico (FAO, 2016).

Procesos de degradación del Suelo

Los variados procesos que dan origen a las características poco favorables de un suelo, se dividen principalmente en dos tipos:

Degradación física

La degradación física del suelo implica la destrucción de la estructura que este posee, dispersión de partículas del mismo, pérdida del espacio poroso, compresión y densidad creciente, consolidación, compactación, baja infiltración, inundación y escorrentía, y erosión acelerada. En conjunto con la denudación, estos procesos conducen a la desertificación en las regiones áridas y semiáridas. El resultado final es la pérdida de la capacidad para sustentar ecosistemas (Osman, 2014).

La erosión es un proceso natural de desprendimiento de las partículas del suelo y su transporte y depositación a lugares distantes por agentes naturales como el agua, viento, glaciares y gravedad. El desprendimiento de las partículas de los agregados del suelo, principalmente por gotas de lluvia y agua fluyendo, y su transporte por escorrentía está envuelto en la erosión de suelo por efecto del agua. La erosión natural es considerada como “erosión normal” y usualmente desde el punto de vista de la calidad de los suelos es poco preocupante ya que su tasa es baja y los suelos pueden compensar la pérdida naturalmente a través de la formación de suelo (pedogénesis). La erosión del suelo posee efectos *in situ* y *ex situ*. Los efectos *in situ* incluyen la pérdida de suelo, pérdida de materia orgánica y elementos nutrientes, daño a la cobertura vegetal, exposición de las raíces de las plantas, y disminución de la fertilidad y productividad del suelo; mientras que los efectos *ex situ* incluyen la excavación de las madrigueras e instalaciones, sedimentación de embalses, eutrofización de estanques y lagos, contaminación de agua, etc. (Osman, 2014).

Por razones climáticas y pedogenéticas, los suelos de regiones áridas y semiáridas son usualmente secos, sueltos, bajos en materia orgánica conteniendo suelos arenosos susceptibles a daños severos por

erosión del viento. En dichas regiones la erosión por viento es un problema serio ya que la cubierta vegetal es poca, las precipitaciones escasas y las temperaturas altas. El potencial de evaporación es mayor que el de precipitación por gran parte del año, lo que causa el agotamiento de la humedad del suelo, la materia orgánica y pérdida de la estructura; del mismo modo las tormentas son eventos regulares en estas regiones, y en las estaciones secas y cálidas, fuertes vientos levantan las pequeñas partículas de suelo y las transportan a lugares distantes.

Degradación química

Osman (2014) sugiere que cerca de 240M ha de tierra a nivel global, se encuentran deterioradas químicamente, debido a que el agotamiento de nutrientes ha afectado 136M ha, la salinización ha dañado 77M ha, y la acidificación 6M ha. Las principales causas de la deterioración química del suelo son el mal manejo de los mismos en la agricultura (58%) y la deforestación de las regiones (28%). El agotamiento de nutrientes es el problema más prevaleciente en África (65Mha) y Suramérica (68Mha), mientras que la salinización es el mayor deteriorador químico en Asia (53Mha). El agotamiento de nutrientes ha causado serios desbalances en suelos bajo agricultura de bajos insumos en tierras marginales.

En un estudio, todos los suelos africanos destinados a agricultura exhibieron balances negativos de NPK. El agotamiento de nutrientes es causado por la lixiviación, la cosecha y la quema de residuos, la erosión, y la eliminación de los cultivos. La salinización se produce de forma natural por procesos pedogenéticos en diferentes condiciones climáticas, pero salinización inducida por el hombre ha obligado a abandonar muchos suelos, que eran anteriormente productivos. La principal causa de la salinización inducida por el hombre es el sistema de riego inapropiado en las regiones áridas y semiáridas. La lixiviación de sales por extra irrigación y cultivos tolerantes a la sal son las estrategias para la enmienda del suelo salado. Los suelos se acidifican por la lluvia ácida, la lixiviación de

base, y por el uso de fertilizantes acidificantes. El encalado es un antiguo método de recuperación de suelos ácidos. La producción de cultivos adecuados para la corriente de pH del suelo puede ser rentable en suelos de media a baja acidez.

Acidez de los suelos

Los suelos ácidos son típicos de aquellas regiones en donde la precipitación es elevada, provocando la lixiviación de los cationes básicos observándose un predominio de cationes ácidos, tanto en los sitios de intercambio como en la solución del suelo. (Casanova, 2005).

Contrario a las creencias anteriores donde se creía que la presencia de iones H^+ era responsable de la acidez en los suelos, se ha demostrado que el aluminio intercambiable es el catión asociado a la acidez. Los protones liberados en el proceso de la pedogénesis, pueden interactuar con la estructura de las arcillas liberando el aluminio y ácido salicílico a la solución del sistema suelo. El Al^{+3} pasa a ocupar los sitios de intercambio de las arcillas y puede sufrir el proceso de hidrólisis generando H^+ en la solución del suelo lo cual altera el pH. (Casanova, 2005).

Uno de los efectos más importantes del pH de los suelos está asociado con la nutrición mineral de las plantas. La absorción de los elementos nutritivos esenciales para el normal crecimiento y producción de las plantas ocurre en el rango de pH correspondiente a los suelos neutros (6,5-7,0). Elementos como nitrógeno, azufre, fósforo, potasio, calcio y magnesio son comunes ejemplos de esta situación haciéndose menos solubles cuando los suelos son más ácidos. Otros elementos que constituyen nutrientes esenciales para las plantas, pero requeridos en menores cantidades como lo son los micronutrientes, poseen solubilidades que tienden a aumentar a pH ácido, esto puede llegar a ser nocivo para las plantas. (Casanova, 2005).

Tabla 2. Origen de los problemas de acidez en el suelo. Tomado de Nota Técnica#1-2014. Centro de Investigaciones Agronómicas, Facultad

CAUSA	EFEECTO
Suelos evolucionados	Pérdida de nutrientes básicos por lixiviación y acumulación de iones ácidos.
Materia orgánica	Liberación de hidrógeno por descomposición microbiana de M.O.
Cultivo	Remoción de nutrientes en productos cosechados que disminuyen la fertilidad del suelo.
Fertilizantes nitrogenados amoniacales	Nitrificación de amonio a nitrato genera acidez residual.
Contaminación	Lluvia ácida
Erosión	Pérdida de suelo y disminución de fertilidad.

de Ciencias Agroalimentarias, Universidad de Costa Rica.

Enmienda de suelos

Se refieren a aquellos procesos mediante los cuales materiales son agregados al suelo, y modifican las características físicas, químicas y biológicas del mismo, afectando de este modo la fertilidad del sistema. En este aspecto se tienen enmiendas tanto del tipo orgánico, que son diversos pero en última instancia se derivan de las plantas principalmente, consistiendo de materia vegetal denominado abono “verde”, otros transformados por la industria (fábricas de conservación de residuos), provenientes de los animales (como el estiércol) o por microorganismos (compostaje) (Valera, 2009).

Dado que la aplicación de las enmiendas orgánicas resultan tener costos muy elevados para la producción de cultivos a gran escala, ha sido necesaria la búsqueda de nuevas alternativas que permitan mejorar las condiciones de los suelos ácidos, una de ellas, es la utilización de las emulsiones asfálticas debido a la existencia de importantes reservas de crudos en el país y dado que la aplicación de estas emulsiones no ejercen efectos negativos sobre el ecosistema (Valera, 2009).

Por otro lado se tienen las enmiendas inorgánicas, como lo son la aplicación de encalado en los suelos de muy bajos valores de pH, y la aplicación de lodos rojos neutralizados con salmuera marina a los sistemas de suelos ácidos. Este último teniendo la ventaja de ser de fácil acceso al tratarse de un país productor de alúmina que genera dicho pasivo ambiental.

Los atributos de los residuos producto de la extracción de alúmina, han sido utilizados para descontaminar efluentes, drenajes mineros ácidos y suelos contaminados, por lo que también puede tener aplicación en el ámbito agronómico, particularmente para suelos arenosos, pobres en nutrientes y con una retención limitada de agua (Klauber et al. 2009). Entre dichos atributos se encontraría el efecto de su alcalinidad, alto contenido de óxidos de hierro y aluminio, en conjunto con su textura fina, que mejora la retención de nutrientes como el fósforo y también del agua en el sistema suelo. La retención del fósforo implica otro beneficio ambiental ya que esto previene la lixiviación de dicho elemento y la eutrofización de los cuerpos de agua cercanos. (Summers et al. 1996).

Lodos rojos

Los lodos rojos son clasificados como un pasivo ambiental, obtenido como subproducto del proceso de extracción de alúmina de la bauxita, que es considerado según el decreto 2635 de la Legislación Venezolana como un sólido peligroso, tóxico y corrosivo. Dicho residuo está compuesto principalmente por una fracción gruesa de arena de

composición silícica, siendo separada por decantación de una forma sencilla y por una fracción fina que presenta óxido de hierro (Fe_2O_3), óxido de titanio (TiO_2), sílice (SiO_2) y alúmina insoluble (Al_2O_3), junto con un amplio número de otros óxidos que varían según la composición de la bauxita de la que provengan. Las altas concentraciones de óxido de hierro, le proporcionan al residuo su característico color rojo, siendo esta la razón por la que se les da el nombre de lodos rojos. (Rubinos, 2008; European Aluminium Association, 2013).

Tabla 3. Composición química de los lodos rojos. Tomado de European Aluminum Association 2013.

Óxido	Intervalo de concentración (%)
Fe_2O_3	20-45
SiO_2	5-30
CaO	0-14
TiO_2	4-20
Na_2O	2-8
Al_2O_3	10-22

Neutralización de lodos rojos con salmuera marina

La neutralización de los lodos rojos utilizando agua de mar, consiste en la adición de agua de mar en exceso para precipitar los hidróxidos y carbonatos solubles en forma de hidróxidos insolubles ($\text{Mg}_3(\text{OH})_6$), carbonatos (CaCO_3 y MgCO_3) y los hidrox-carbonatos ($\text{Mg}_6\text{Al}_2(\text{CO}_3)(\text{OH})_{16}\cdot 4\text{H}_2\text{O}$), ($\text{CaAl}_2(\text{CO}_3)_2(\text{OH})_4\cdot 3\text{H}_2\text{O}$). Dicha técnica ha sido de mucha utilidad en diferentes refinerías a nivel mundial donde la cercanía al mar facilita el proceso de neutralización, tal es el caso de la

refinería de alúmina Australiana, Queensland Alumina Limited (Johnston et al. 2010). Durante la neutralización con agua de mar, ocurre la reacción de formación de hidrotalcitas y la formación de para aluminohidrotalcita (Fernandes, 2012).

El uso de salmueras marinas (producto de la evaporación del agua de mar) en el tratamiento de neutralización del residuo de CVG-Bauxilum ha probado ser efectivo. Obteniéndose que para una relación muestra/salmueras marinas de 4/1, es posible obtener un valor de pH cercano a las 8 unidades y la formación de los mismos compuestos que con el agua de mar además de $\text{MgS}_2\text{O}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) (Sarmiento, 2013).

Chrysopogon zizanioides

Los problemas de erosión de los suelos, la contaminación por aguas residuales tanto urbana como rural, contaminación de minas, gasoductos, oleoductos etc., están acelerando los problemas ambientales, la degradación de los recursos naturales y la calidad de vida de las poblaciones con un incremento de la pobreza y problemas de salud. Existen muchas alternativas tecnológicas que son económicamente poco accesibles y ante esto las tecnologías de bajos insumos o baratas son las que ofrecen opciones rentables y que se pueden masificar. Una de estas es la tecnología vetiver (últimamente re-clasificada como *Chrysopogon zizanioides*) antes conocida mundialmente como *Vetiveria zizanioides*, y que fue llamada en algunos países como la planta milagrosa o mágica y que es una excelente alternativa. (Orihuela, 2007)

La especie *Chrysopogon zizanioides* presenta alta resistencia a condiciones extremas: puede soportar sequías extremas debido a su alto contenido de sales de la savia de sus hojas, así como inundaciones por largos periodos (se han reportado hasta 45 días de inundación en el terreno). Crece en un rango amplio de suelos y con diferentes niveles de fertilidad y puede resistir hasta temperaturas de -9°C desde el nivel del mar hasta los 2500 msnm (Orihuela, 2007). También muestra una alta

resistencia a los pH extremos (3,3 a 9,5), condiciones de alta salinidad y concentraciones altas de micronutrientes y metales pesados (Truong et al. 2009). Ha demostrado ser la ideal para la conservación del suelo y agua, la humedad del suelo y otros usos como en bioremediación, bioingeniería, forrajes, agroforestería, medicinal, artesanía, energía etc. Por lo cual ha sido utilizada ampliamente en planes de revegetación y recuperación de suelos.

Antecedentes

Se han llevado a cabo diversos estudios sobre el efecto de enmiendas de suelos de características ácidas y textura arenosa, haciendo uso del residuo del procesamiento de la bauxita (lodos rojos neutralizados), con la finalidad de evaluar la efectividad que poseen las mismas para contrarrestar las características poco favorables de dicho sistema.

Un primer estudio enfocado hacia la mejora en la lixiviación de P, se realizó con la variante de lodos rojos neutralizados con yeso, y lodos rojos neutralizados con sulfato de hierro como agentes remediadores (Vlahos et al., 1989), para ambos casos, se evaluó la reducción de la lixiviación del P presente en el suelo, el cual fue aplicado como superfosfato fertilizante. Los lodos rojos neutralizados con yeso incrementaron la retención de humedad de los suelos (pasando de 6% a 22%), lo que disminuyó la lixiviación del P y aumentó el pH (de 4-5 a 7). Para el caso de la aplicación de lodos rojos neutralizados con sulfato ferroso se reportó, una disminución en la lixiviación de P de aproximadamente 96% durante los 3 años que duró el experimento. Concluyéndose de esta forma que la aplicación de lodos rojos reduce la cantidad de P lixiviado en los suelos arenosos, es decir, incrementan la retención de dicho nutriente debido a la presencia de diversos óxidos en los lodos.

Los estudios sobre el incremento en la retención de P en los suelos arenosos en el oeste de Australia, se continuaron en años posteriores, aplicando únicamente la enmienda de lodos rojos neutralizados con yeso (Summers et al. 1993). De igual modo, se determinó que la pérdida de P se redujo un 70% en los ensayos realizados, en comparación a los sustratos no enmendados y continuó disminuyendo con el paso del tiempo lo cual se debe a la habilidad de los lodos rojos de retener dicho elemento, debido la presencia de óxidos varios en su composición. Además de esto, el efecto sobre la salinidad una vez aplicada la enmienda, se mostró mínimo en términos de magnitud, ya que en los ensayos tratados se registró casi el doble de sales solubles en el lixiviado pero se mantuvo dentro del rango de la mayoría de las aguas subterráneas de la zona a la que se aplicó la enmienda.

En el ámbito del impacto ambiental de la aplicación de los lodos rojos neutralizados con yeso a los suelos arenosos (Ward y Summers, 1993) se realizaron estudios al lixiviado de los suelos enmendados, siendo el efecto en el medio ambiente de tipo positivo, debido a que, como se estudió con anterioridad, impide la pérdida de P en los suelos y a su vez la eutrofización de las aguas subterráneas.

En relación a los límites permitidos de P para el consumo humano, en los acuíferos que podrían ser afectados en las adyacencias, se realizaron dos ensayos de mezclas de lodos rojos con suelos ácidos arenosos, en diferentes proporciones de mezcla (Summers et al. 1996), en un área de 700 ha para cada uno y se llevaron a cabo monitoreos continuos durante más de 12 meses, correspondiente a una simulación de un período de lluvia de 5 años posteriores a la aplicación de la enmienda, con la finalidad de determinar la cantidad de tiempo en el que el P continuó siendo retenido por los lodos rojos neutralizados con yeso y por los lodos rojos sin neutralizar. Las medidas de los elementos lixiviables se encontraron por debajo de los límites permitidos para el consumo

humano, exceptuando el caso del fluoruro que en presencia del yeso no seguía la misma tendencia. Basado en los datos obtenidos se concluyó que la retención del P por la enmienda de lodos rojos neutralizados con yeso continúa por al menos 5 años con aplicación de fertilizantes, gracias a la alcalinidad, textura fina de los mismos y contenido de óxidos. Por otro lado los resultados obtenidos arrojaron que la producción del pasto que se utilizó mejoró con la aplicación de 20 t/ha y 40 t/ha de lodos rojos, el pH cambió de 4,48 a 6 para 20t/ha y 7 para 40t/ha, los ensayos con los lodos rojos neutralizados no mostraron ningún incremento en la producción de pasto, demostrando que la neutralización de los lodos rojos con yeso no aporta ningún beneficio adicional para el suelo en el ámbito de productividad.

Para tener un conocimiento más profundo de la respuesta del P a la aplicación de la enmienda de lodos rojos sobre suelos arenosos se llevó a cabo el estudio sobre el efecto en el crecimiento de la especie *Trifolium subterraneum* (Summers et al. 2001) durante un año de aplicación de superfosfato como fertilizante. Los resultados se compararon con el tratamiento con limo, siendo la enmienda con lodos rojos neutralizados con yeso, la que generaba un incremento mayor en la producción de la especie, es decir, la efectividad del fertilizante de fosfato aumentó al aplicar las enmiendas. Las proporciones de 2-5 t/ha de lodos rojos aplicadas a suelos ácidos arenosos en el Oeste de Australia, mostraron ser las más efectivas en el crecimiento y producción de pasto, sin embargo las relaciones 20-40 t/ha seguían dando buenas respuestas para la retención del fósforo aplicado como fertilizante. Estos resultados indican de manera cualitativa una aparente relación entre la enmienda con lodos rojos neutralizados con yeso y la retención de macronutrientes como N, P y K, por lo que valdría explorar si ocurre lo mismo al enmendar este tipo de suelos con lodos rojos neutralizados con salmueras marinas, tal y como se plantea en la presente investigación.

Ahondando en lo concerniente a la respuesta del P y su disponibilidad, a la aplicación de la enmienda en un suelo arenoso sin aplicación de fertilizantes, las enmiendas se realizaron con lodos rojos, lodos rojos neutralizados con 5% de yeso, y lodos rojos tratados con ácido diluido para remover las sales solubles, todos estos aplicados a 12 podsoles (Snars et al. 2003). En la realización de dichos ensayos se observó un incremento en lo que respecta a la retención del P disponible en el sistema, esto debido al crecimiento de microorganismos y a la presencia de oxihidróxidos en los lodos rojos. A pesar de que el aumento de la disponibilidad de P es un aspecto complejo que al parecer presentar dependencia tanto de la composición de los lodos rojos, es decir, su contenido de oxihidróxidos, como también de los procesos biológicos relacionados a los microorganismos en el suelo, se esperaría un comportamiento similar en lo que respecta a los macronutrientes N y K.

Las limitaciones de la aplicación de lodos rojos neutralizados con yeso, como enmienda en suelos arenosos fueron estudiadas mediante comparación con la aplicación de limo a los mismos (Snars et al. 2004), siendo mayor el volumen necesario de lodos rojos en un 30% al volumen necesario de limo para mejorar las condiciones de fertilidad. Por lo cual los beneficios económicos del uso de lodos rojos podrían estar limitados, pese a esto los beneficios son mayores debido a que aumentan el pH, y lidian con el desperdicio generado por la industria del aluminio.

En estudios más recientes de enmienda a suelos ácidos arenosos, en el territorio nacional, se realizó un estudio sobre enmiendas de suelos ácidos de sabana con lodos rojos provenientes de CVG Bauxilum, neutralizados con diferentes materiales, y consecuentemente las muestras consistieron en mezclas mecánicas de relación 4:1 masa-masa de suelos: lodos rojos (neutralizados y sin neutralizar); dichas neutralizaciones fueron realizadas con fosfoyeso, yeso comercial y agua de mar en distintas proporciones. Siendo los lodos rojos neutralizados con agua de mar en una proporción 5/25 (g/mL) y yeso comercial a 10% m/m,

las más efectivas desde el punto de vista de la neutralización, donde el pH del suelo cambió de 5,69 a 8,58 y 8,48 respectivamente, siendo estos los pH más cercanos a la neutralidad (pH 7) de las mezclas (Fernandes, M., 2012). Del mismo modo, debido a los bajos índices de germinación de la especie usada como indicador (*Lycopersicon esculentum*), se indicó que dichos suelos no resultaron aptos para la revegetación por lo que se recomendó una nueva neutralización con salmuera marina que aportaría concentraciones de Mg y Ca y menores concentraciones de Na, que si bien no se trata de un elemento esencial, es un elemento beneficioso para algunas plantas y cianobacterias en sus procesos metabólicos y fotosintéticos, pero que en grandes concentraciones representa un riesgo para la biota, debido a que compite con el potasio, calcio, magnesio y amonio, y al estar en mayores concentraciones que estos alcanza niveles tóxicos en la biomasa.

Partiendo del anterior estudio y los realizados por Sarmiento (2013), Caccamo (2013) y Marcano (2013), que determinaron la proporción de salmuera marina para una neutralización adecuada de los lodos rojos de CVG-Bauxilum, se realizó la determinación de la proporción óptima de mezcla entre lodos rojos neutralizados con salmuera marina en suelos ácidos de sabana, la cual resultó ser igual a 2%, dicha proporción fue la única de los ensayos realizados que arrojó un resultado de 100% de supervivencia en la especie utilizada (*Chrysopogon zizanioides*), además de que los parámetros de crecimiento medidos en la planta indican que tuvo un mayor desarrollo que en los otros ensayos. Al igual en estudios anteriores se evidenció una variación en el pH de los suelos, de un promedio de 5,01 a 7,41, y los lixiviados (González, 2015).

Si bien se han realizado varios estudios en relación al efecto de la enmienda de lodos rojos sobre la movilidad y disponibilidad del P en el suelo, muy poco se ha dicho acerca de los elementos nutrientes como el N y K, lo cual le otorga importancia a esta investigación.

Metodología experimental

En el siguiente apartado se describirán detalladamente las distintas técnicas y procedimientos que fueron utilizados a lo largo del desarrollo del presente trabajo de investigación.

Etapas de oficina

Dicha etapa comprende la revisión bibliográfica llevada a cabo a lo largo del desarrollo del proyecto, la consulta constante de fuentes bibliográficas referentes al tópico en cuestión e información referente a la zona de estudio, así como la búsqueda de los envases donde se realizaron los ensayos.

Etapas de campo y tratamiento de muestras

Debido a que la etapa de campo, que incluye la toma de muestras, fue realizada para investigaciones anteriores, se utilizaron las muestras de suelos ácidos de sabana y lodos rojos neutralizados con salmuera marina, almacenadas en el Instituto de Ciencias de la Tierra de la Facultad de Ciencias de la Universidad Central de Venezuela. En lo que respecta a las plántulas de vetiver, las mismas fueron suministradas por el Prof. Oscar Rodríguez de la Facultad de Agronomía de la Universidad Central de Venezuela, a partir del espécimen suministrado se tomaron los distintos esquejes utilizados en los ensayos.



Figura 7. Macollo de vetiver suministrado por la Facultad de Agronomía de la UCV.

Etapas de laboratorio

Esta comprende la etapa de preparación de los ensayos, toma de muestras y análisis de las mismas por etapas:

Preparación de los ensayos

Previamente a la realización de los ensayos de diferentes sustratos, se realizó la etapa de enraizamiento de más de 12 plántulas (o esquejes) para garantizar contar con las necesarias para llevar a cabo la etapa de ensayo, dicho enraizamiento se llevó a cabo por 15 días, cuando

se evidenció crecimiento de entre 0.5 y 1cm de las raíces según los indicado por Orihuela (2007). Durante el tiempo de enraizamiento se realizó la neutralización de 2019,6g de lodos rojos provenientes de la bomba GEHO con 500mL de salmuera marina (proporción 4:1 m/v).

Una vez realizado el trasplante a los sustratos de prueba se mantuvieron los 24 ensayos en condición de semi-sombra por los primeros 12 días, para que las plántulas se adecuaran a su nuevo sustrato, posterior a este tiempo, y debido a la intolerancia del vetiver a la sombra se colocaron al sol, la mayor cantidad de tiempo posible durante el día, con limitaciones debido al clima lluvioso que imperó durante el tiempo en el que se llevaron a cabo los ensayos.



Figura 8. Plántulas en etapa de enraizamiento.

En la presente investigación se llevaron a cabo ocho ensayos:

- i. Suelos ácidos de sabana como sustrato, sin planta. (S)
- ii. Suelos ácidos de sabana como sustrato, plantados con vetiver. (SP)
- iii. Suelos ácidos de sabana con dosificación de fertilizante de fórmula completa, sin planta. (SF)
- iv. Suelos ácidos de sabana con dosificación de fertilizante de fórmula completa, plantados con vetiver. (SFP)

- v. Suelos ácidos de sabana en mezcla óptima con lodos rojos neutralizados con salmuera marina (2% de LRN), sin planta. (SL)
- vi. Suelos ácidos de sabana en mezcla óptima con lodos rojos neutralizados con salmuera marina (2% de LRN), plantados con vetiver. (SLP)
- vii. Suelos ácidos de sabana en mezcla óptima con lodos rojos neutralizados con salmuera marina (2% de LRN), con dosificación de fertilizante de fórmula completa. (SLF)
- viii. Suelos ácidos de sabana en mezcla óptima con lodos rojos neutralizados con salmuera marina (2% de LRN), con dosificación de fertilizante de fórmula completa, plantados con vetiver. (SLFP)

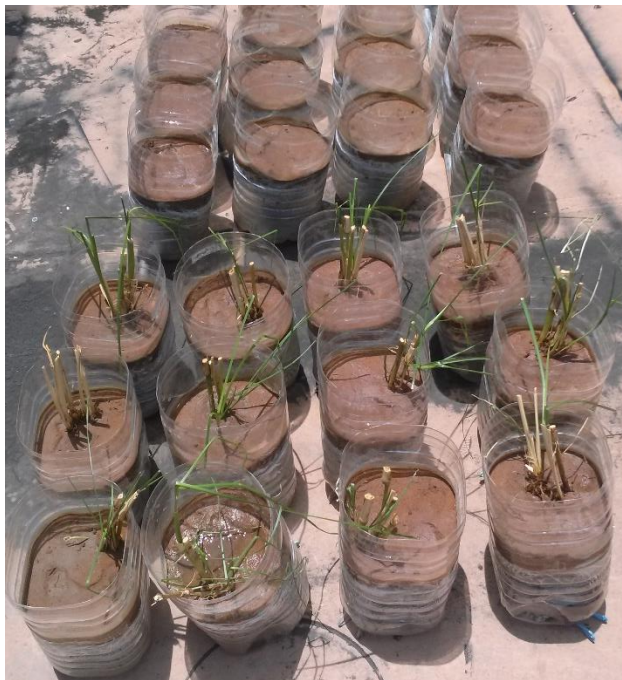
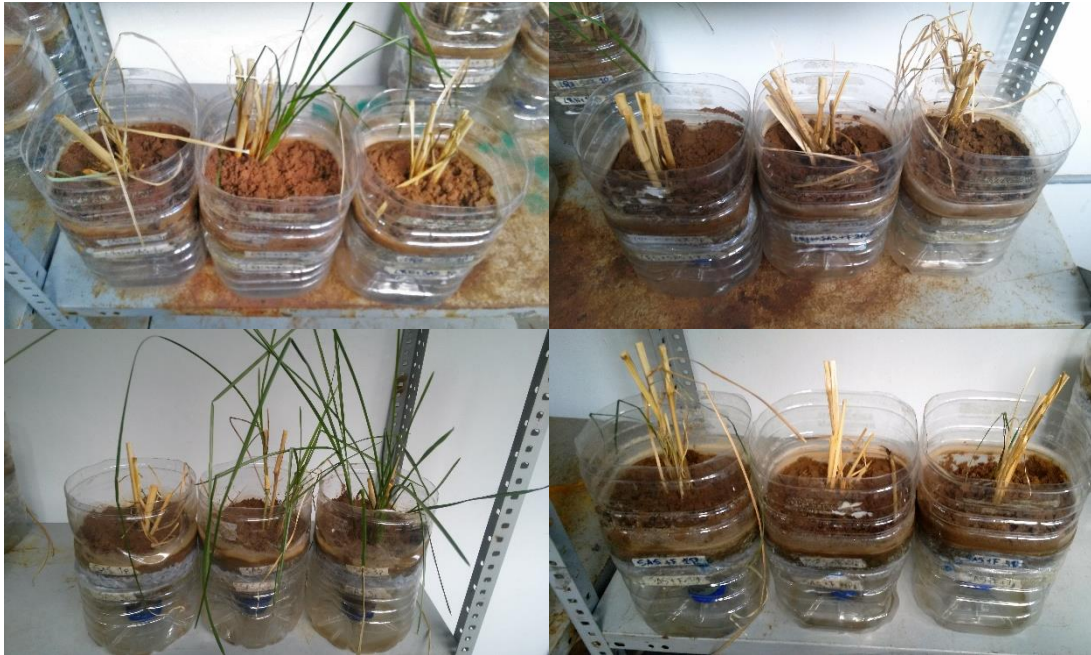


Figura 9. Ensayos experimentales y controles.

Dichos ensayos se llevaron a cabo en envases de agua de 5 litros, que permitieron la salida del agua de riego para la obtención del lixiviado,



y dicho volumen de riego se calculó en función del área de cada recipiente y la precipitación promedio anual de la zona de estudio, lo cual dio como resultado un riego de 90mL/día.

Figura 10. Ensayos plantados con vetiver.

Figura 11. Ensayos de control sin planta.

La toma de submuestras del sustrato se realizó en tres puntos al azar en cada ensayo, y se homogenizaron para hacerla representativa de cada uno de los sistemas. Tanto la submuestra de sustrato como la submuestra de lixiviado fueron tomadas en dos tiempos, al momento de iniciar los ensayos, y luego del transcurso de 3 meses al finalizar los mismos.





Figura 12. Colección de submuestras en los ensayos.

Análisis químico de las muestras

Para una amplia comprensión del efecto de la enmienda de lodos rojos neutralizados con salmuera marina, sobre la retención de nutrientes y la fertilidad general de los suelos de sabana, se determinó en cada ensayo el pH y la conductividad eléctrica en muestras de sustrato sólido (en relación 1:2,5 masa(g)/volumen(mL) de suelo: agua destilada) de acuerdo al método SW-846 9045 para suelos de la US EPA (2000)) y a sus lixiviados; así como la capacidad de intercambio catiónico (CIC) (en muestras de suelo sin enmienda y suelos enmendados) y la concentración de los elementos N, P y K a lo largo de tres meses.

Determinación de CIC

El método utilizado para la determinación de cationes intercambiables y la capacidad total de intercambio que tenga el suelo consistió en cuatro pasos:

- Primero se empleó una solución concentrada de amonio (1N) para reemplazar y liberar los cationes propios del suelo (los cuales de esta manera se podrían cuantificar individualmente en la solución sobrenadante) quedando entonces los NH_4^+ adsorbidos al suelo, saturando todas las cargas negativas de éste.

- Luego se saturó el suelo con sodio, empleando una solución de acetato de sodio (1N), de alta concentración de este catión, para reemplazar todos los NH_4^+ adsorbidos (procedimiento efectuado en el paso anterior), por Na^+ .

- Se eliminó el sodio no adsorbido (y que quedó en la solución sobrenadante) por lavados con etanol al 95%.

- Finalmente se extrajo el sodio adsorbido por saturación del complejo con amonio. Los cationes NH_4^+ reemplazan a los de Na^+ , quedando éstos en solución. La valoración del sodio en la solución extraída representa el total de cargas disponibles para el intercambio catiónico (CIC total o valor T).



Figura 13. Esquema experimental para la determinación de CIC.

Fuente: Determinación de capacidad de intercambio catiónico (CIC) en suelos. Cáceres L.F., 2013.

Determinación de N mediante el método Kjeldahl

La primera parte de la metodología consistió en la digestión de la muestra (aproximadamente 4g) con ácido sulfúrico concentrado (H_2SO_4) en un tubo digestor, que fue colocado en el bloque digestor, en el cual se aumentó gradualmente la temperatura, iniciando la digestión a 90°C por 30 min, luego incrementando la temperatura a 180°C por 30 min y por último la temperatura es llevada a 270°C por otros 30 min. Posteriormente fue añadido, una mezcla 2:1 de catalizador (K_2SO_4 y Cu_2SO_4 respectivamente), y fue aumentada la temperatura hasta 360°C por 90 min.



Figura 14. Equipo digestor y destilador VELP utilizado para el tratamiento de las muestras de sustrato.

La segunda parte corresponde a la determinación de N total, por el método Kjeldahl, para lo que el tubo digestor fue colocado en el equipo destilador, en el cual fue agregado 40mL NaOH (35%) para proceder a la destilación. En el extremo de salida del condensado se colocó una fiola

que contenía 5mL ácido bórico (H_3BO_3 al 5%) con 5 gotas del indicador mixto (mezcla relación 1:5 de rojo de metilo y verde de bromocresol), luego el destilado fue titulado con una solución de ácido clorhídrico estandarizado (HCl 0,01 M). Mediante los valores obtenidos en la titulación se realizó el cálculo del % total de nitrógeno en la muestra.

$\%N = (V \text{ HCl} - V_b \text{ HCl}) * M \text{ HCl} * (1,4 / \text{peso de la muestra})$ (Laboratorio de estudios ambientales, 1993)

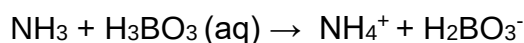
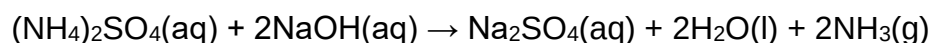
Dónde: V: volumen de ácido consumido en la titulación de la muestra.

V_b : volumen de ácido consumido en la titulación del blanco

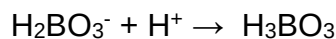
M: concentración del ácido clorhídrico en mol/L.



Ecuación 1. Digestión ácida de la muestra



Ecuación 2. Destilación.



Ecuación 3. Titulación con un ácido monoprótico.



Figura 15. Titulación ácido-base para la determinación de %N.

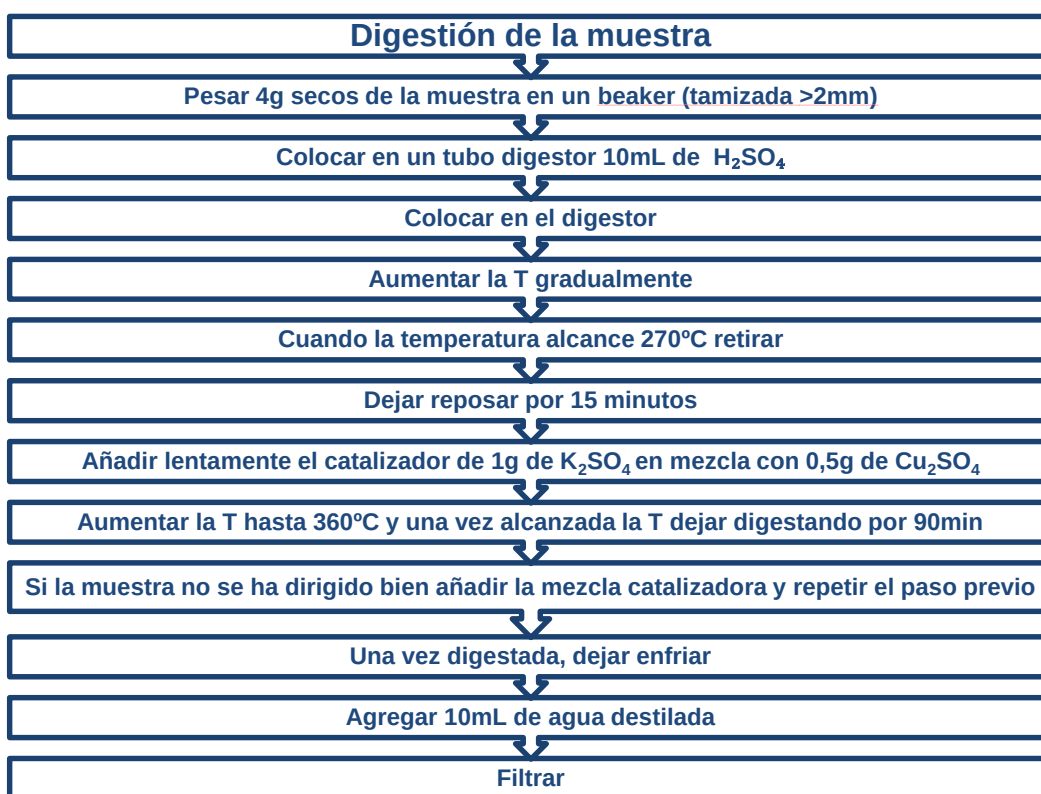


Figura 16. Esquema experimental para digestión de la muestra.

Fuente: Laboratorio de Estudios Ambientales (1993) modificado para la detección en las muestras.

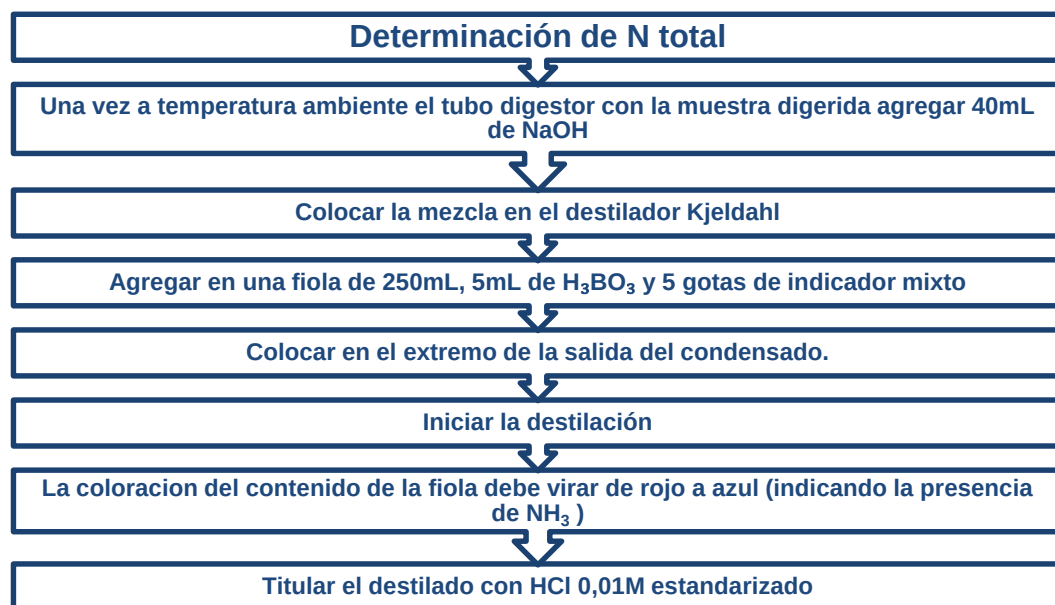


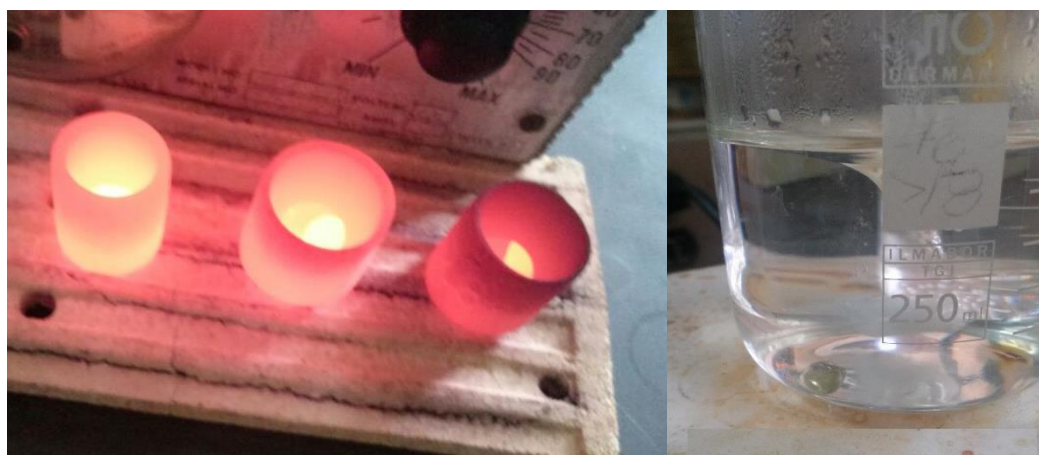
Figura 17. Esquema experimental para la determinación de N total.

Fuente: Laboratorio de Estudios Ambientales (1993)

Determinación de P mediante absorción molecular en el espectro UV-visible

La metodología de determinación, consistió en la fusión de las muestras de sustrato siguiendo la metodología planteada por Liberatore (1993) para la determinación de elementos mayoritarios en muestras geológicas, la cual consiste en la fusión de 0,5g de muestra con 2,5g de *flux borato*, mezcla de relación 1:1 de tetraborato de litio y metaborato de litio, este último preparado a partir de carbonato de litio anhidro y ácido bórico de grado analítico.

Para llevar a cabo la fusión se utilizaron crisoles de grafito, que fueron llevados gradualmente a 1000°C en una mufla, por un espacio de tiempo de 30-45min una vez alcanzada dicha temperatura. Una vez formadas las perlas de fusión se formaron cristalinas, se dejaron enfriar a temperatura ambiente, y se llevaron a beakers de 150mL con 125mL de



ácido nítrico 1,6M con agitación vigorosa, llevando la temperatura de 40-60°C hasta la disolución total de la perla, para posterior aforo (a 200mL las muestras y a 250mL los patrones y blancos).

Figura 18. Perlas de fusión y su disolución en HNO_3 .

Posterior a la fusión de la muestra se siguió el método C colorimétrico con ácido ascórbico, de la norma venezolana COVENIN 3051-93 para la determinación de fósforo en aguas naturales, industriales y residuales. Para lo cual se realizó la preparación de ácido sulfúrico 5N, solución de tartrato antimonial de potasio, solución de molibdato de amonio y ácido ascórbico 0,01M (preparada poco antes de realizar las medidas). Para la preparación de 200mL del reactivo combinado, se siguió el orden estricto dictado por la norma, adicionando primeramente 100mL de H_2SO_4 , posteriormente 10mL de la solución de tartrato de amonio, agitando la mezcla previamente a la adición de 30mL de solución de molibdato de amonio, volviendo a agitar para agregar por último 60mL del ácido ascórbico preparado al momento de realizar el reactivo combinado.



Figura 19. Preparación y medida del complejo coloreado.

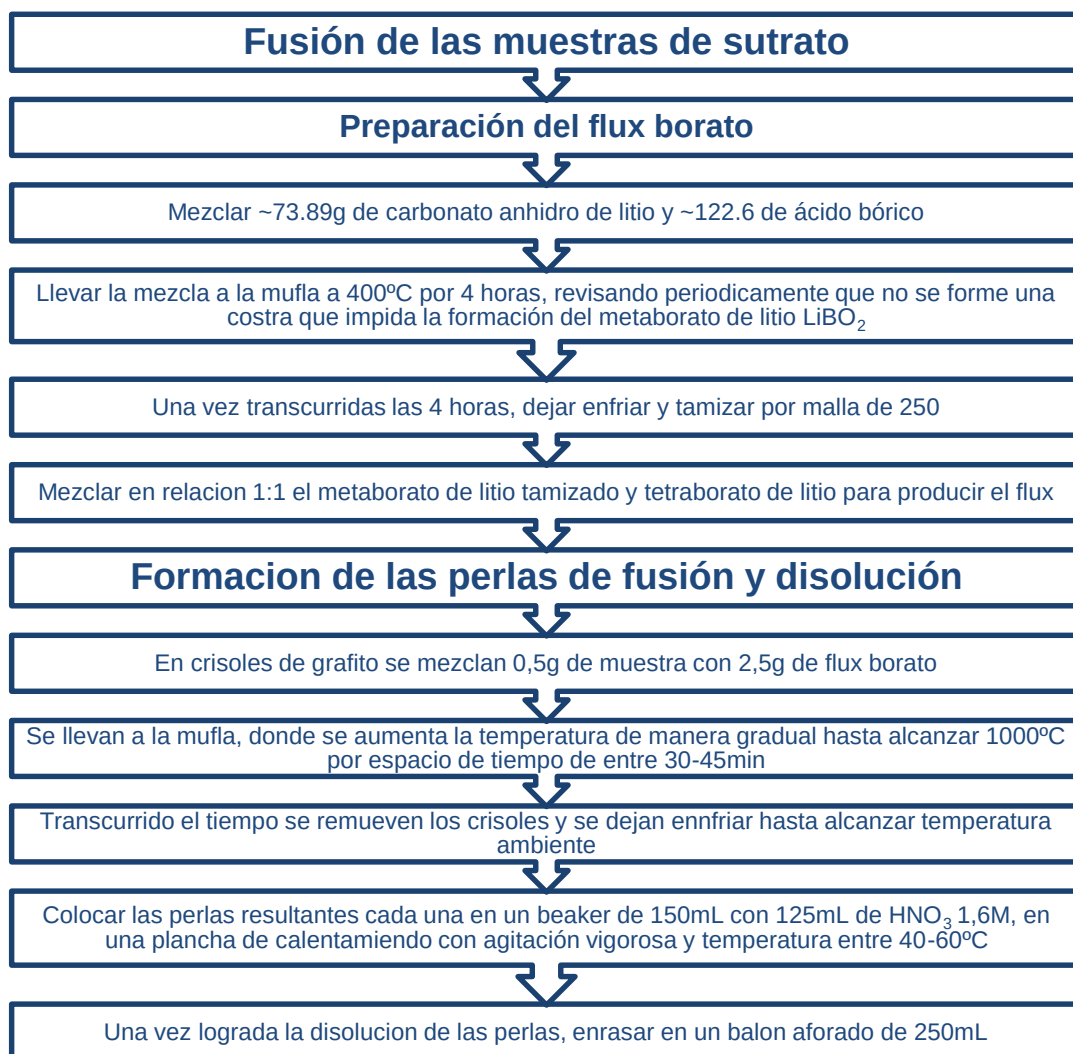


Figura 20. Esquema experimental para la fusión de la muestra.

Fuente: Determination of majors in geological samples by ICP-AES.
Liberatore (1993)

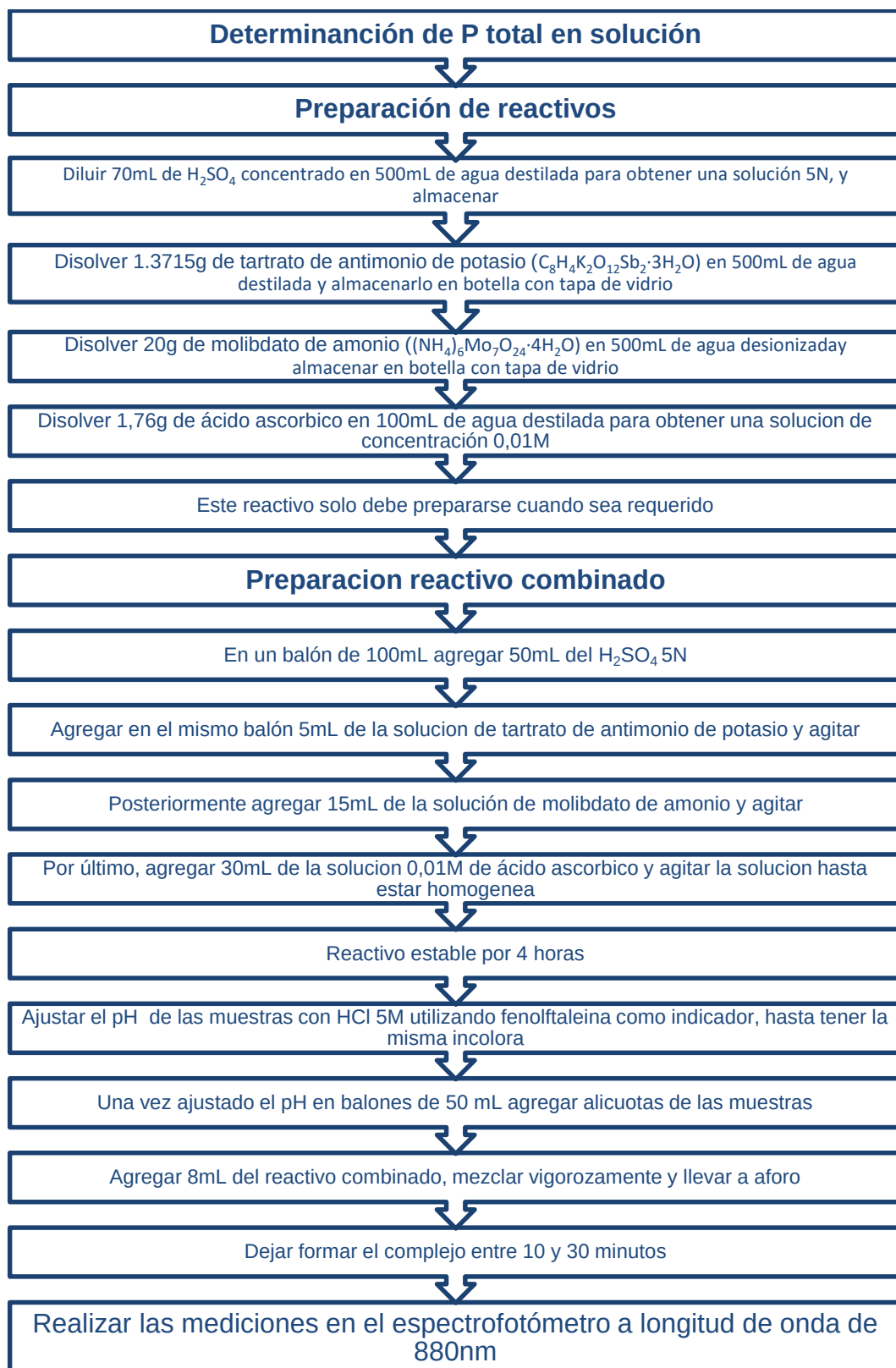


Figura 21. Esquema experimental para la determinación de P total.

Fuente: Norma Venezolana COVENIN 3051-93.

Determinación de K mediante la técnica de espectroscopia de emisión atómica

La digestión para el análisis de K mediante la técnica de espectroscopia de emisión atómica, consistió en el mismo tratamiento de fusión de las muestras de sustrato utilizada para fósforo. Una vez se obtuvieron las muestras en solución fueron analizadas en el equipo de emisión absorción atómica, en conjunto con el patrón certificado MCAF-lote 7b-3 que conlleva el mismo tratamiento con fundente de flux borato y posterior disolución de la perla formada.

NOTA: Para medir la concentración de N, P y K en los lixiviados, se filtró el líquido obtenido por el riego con agua destilada, y se sometieron a determinación tanto los lixiviados de las primeras dos semanas como los de las dos últimas semanas del ensayo, a las mismas técnicas mencionadas para la fracción de sustrato para cada elemento, Kjeldahl para nitrógeno, fósforo mediante absorción molecular en el espectro UV-visible y potasio mediante el espectrómetro de emisión atómica.

Desarrollo de la especie *Chrysopogon zizanioides*

Para evaluar la variación en la fertilidad de los sustratos en los ensayos se empleó la especie *Chrysopogon zizanioides* (vetiver) como indicador, en el cual fueron cuantificados parámetros de crecimiento como: longitud de las raíces y hojas, número de brotes nuevos y peso de la planta (antes de sembrada y al finalizar el experimento).

Resultados y discusión

A continuación serán presentados y discutidos los resultados obtenidos a partir de análisis químicos realizados a los ensayos de suelo y sus lixiviados, así como también la relación de dichos análisis con el crecimiento y desarrollo del vetiver en cada ensayo.

Crecimiento de la especie *Chrysopogon zizanioides* (vetiver)

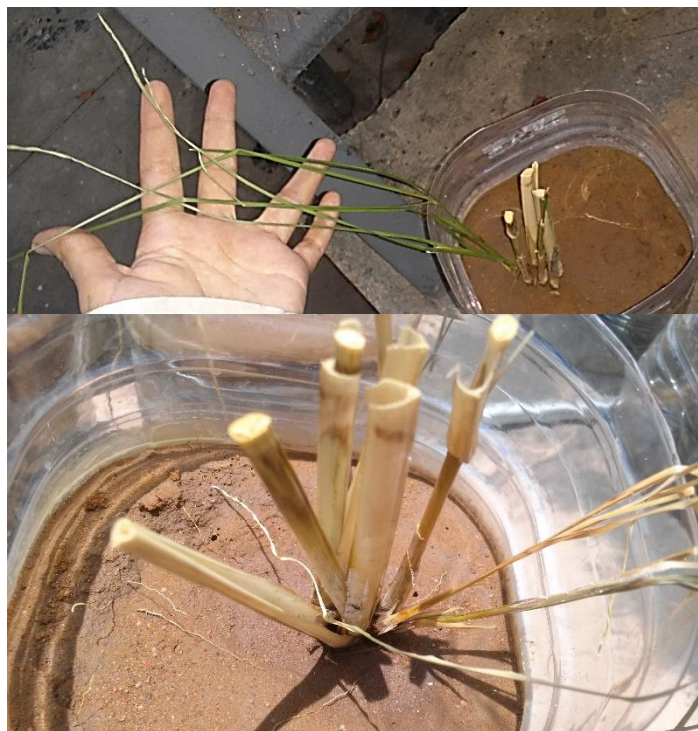
Durante los 3 meses en los que se llevó a cabo el experimento, las plantas con un mejor desarrollo y que sobrevivieron a las variables, fueron las plantas de los ensayos de suelos ácidos plantados con vetiver (SP) y suelos enmendados con lodos rojos neutralizados plantados con vetiver (SLP) (tabla de datos en el apéndice C), tomando en cuenta para dicha afirmación los parámetros evaluados (tabla 4).

Ensayo	Tallos		Raíces		Masa de los esquejes		Tiempo de supervivencia
	Incremento de longitud ($\pm 0,1\text{cm}$)	Promedio	Incremento de longitud ($\pm 0,1\text{cm}$)	Promedio	Diferencial de masa ($\pm 0,1\text{g}$)	Promedio	
SP1	45,0	57,80	4,5	8,00	-2,7	1,2	12 semanas
SP2	62,4		12,5		-1,3		Sobrevivió
SP3	66,0		7,0		7,6		Sobrevivió
SLFP1	5,5	20,77	13,5	12,83	-11,6	-10,5	4 semanas
SLFP2	12,0		13,5		-5,7		6 semanas
SLFP3	44,8		11,5		-14,3		10 semanas
SFP1	46,0	21,70	4,4	6,17	-1,2	-4,0	Sobrevivió
SFP2	10,0		4,3		-7,6		4 semanas
SFP3	9,1		9,8		-3,1		Sobrevivió
SLP1	23,1	39,00	7,2	8,63	-10,5	-6,6	4 semanas
SLP2	39,0		14,7		-4,5		Sobrevivió
SLP3	54,9		4,0		-4,7		13 semanas

Tabla 4. Parámetros de crecimiento determinados en el vetiver (*Chrysopogon zizanioides*).

En general se pudo observar en las plantas de los ensayos una pérdida de masa, exceptuando la planta del ensayo SP3 que tuvo una ganancia en masa, siendo los ensayos SP los que tuvieron una menor pérdida.

Por otro lado los ensayos SLFP fueron los que sufrieron la mayor pérdida durante la realización del experimento, en adición a la pérdida de masa, los mismos ensayos tuvieron el menor desarrollo de tallos y no sobrevivieron a lo largo de los tres meses en los que se llevaron a cabo los ensayos, pudiendo ser esto evidencia del efecto negativo de una dosis elevada del fertilizante inorgánico (N-P-K) aplicado en los mismos y el incremento en la retención de iones del sustrato, que evitó la lixiviación



del exceso.

Figura 22. Efectos del exceso de potasio (pobre desarrollo y clorosis)

Dicho efecto se puede evidenciar en el pobre desarrollo asociado a un exceso de K en su forma catiónica (K^+), el cual interfiere en la absorción y disponibilidad de cationes como Ca^{+2} y Mg^{+2} conllevando al observado pobre desarrollo y la clorosis en los tallos (figura 23). En

relación al desarrollo de las raíces, se observó que hubo un mayor incremento en las plantas de los ensayos enmendados con aplicación de fertilizante (SLFP) en contraste con su pobre desarrollo en tallos, lo cual puede ser debido a la presencia de P biodisponible en el suelo (AgroEstrategias Consultores, 2007). Siendo los de menor desarrollo de raíces los ensayos SP y SFP debido a que en los primeros no hay aporte alguno de fósforo, y en los segundos, el aporte total fue lixiviado con rapidez por las características texturales de dichos suelos.

En general en los ensayos plantados con vetiver se pudo observar que los parámetros evaluados (crecimiento de tallo y raíces, y variación en la masa de los esquejes) favorecieron el crecimiento sostenido de los ensayos de suelo plantado (SP) y suelo enmendado plantado con vetiver (SLP), viéndose un efecto negativo por la aplicación del fertilizante inorgánico en los ensayos de suelo enmendado plantados y con aplicación de fertilizante (SLFP), debido a que el incremento en la retención de los nutrientes y la alta dosis generó un ambiente hostil de toxicidad para la sustentabilidad de los esquejes, afirmación que se apoya en los síntomas presentados por las plantas durante su desarrollo (como la clorosis y pobre desarrollo) y la supervivencia que presentaron los esquejes plantados en dichos ensayos (SLFP), mientras que para los ensayos SFP la adición de fertilizante no tuvo impacto en el desarrollo de los esquejes debido a que el mismo fue lixiviado a lo largo del tiempo del experimento, por lo que el desarrollo de la planta fue muy similar a las plantadas en los ensayos SP.

Determinación de pH y variaciones

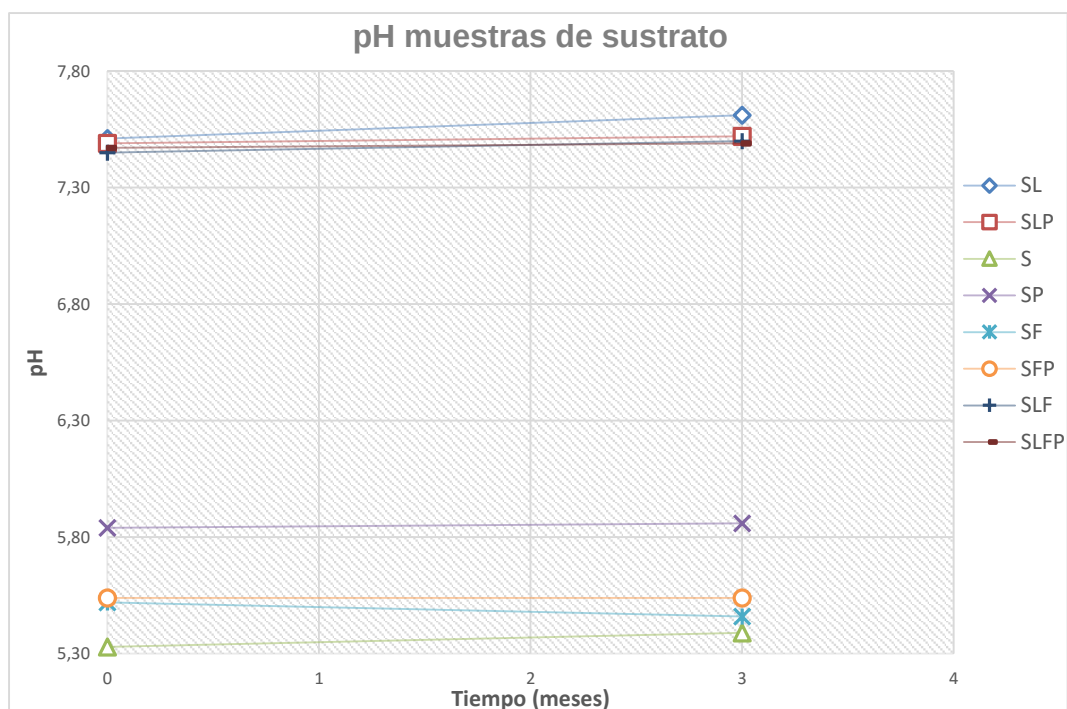
Para llevar a cabo los ensayos con los distintos sustratos de prueba, primeramente se realizó la neutralización de 2019,6g de lodos rojos provenientes de la bomba GEHO, los cuales poseían un pH inicial de 13,00 unidades, con 500mL de salmuera marina (proporción 4:1 m/v), y se obtuvo un pH de 8,13 unidades para los lodos neutralizados, valor dentro de los límites permitidos por Gaceta Oficial N°5021 1995, de la

normativa ambiental venezolana para el vertido de sustancias al medio ambiente, lodos que fueron utilizados en la mezcla de 2% determinada como optima por González (2015).

Una vez agregada la enmienda, el pH de los suelos pasó de 5,33 a 7,51 valores que son permitidos ambientalmente y que son idóneos para la solubilidad y consecuente disponibilidad de los nutrientes esenciales en estudio, de pH de 6 a 8 para la N, de 6,5 a 7,5 para P y a partir de 6,5 para K (Foth, 1990).

En la gráfico 1 se puede observar como los suelos sin enmendar poseen los pH más ácidos (tablas de datos en el apéndice D), existiendo una diferencia entre los suelos plantados (SP) y los suelos sin plantar (S) debido a que el pH es ligeramente mayor donde se encuentra la planta, siendo del mismo modo en los ensayos con fertilizante, donde el suelo plantado con aplicación de fertilizante (SFP) posee un pH ligeramente más elevado que el ensayo sin planta (SF). Siendo el factor en común la presencia de la planta en los ensayos, dicho efecto en el pH se atribuye a la acción de la rizosfera del vetiver sobre el sustrato ácido en el que se encuentran como fue estudiado por Kwon-Rae (2008). Hecho que apoya lo indicado por Casanova (2005), quien señala que las plantas con tolerancia a la acidez de los suelos pueden aumentar el pH en soluciones por medio de su rizosfera, y que fue observado en investigaciones previas como la realizada por González (2015).

Debido a que es un efecto únicamente en sustratos ácidos no se observa que la planta tenga algún efecto importante en el pH en los suelos enmendados y sus variables con fertilizante SLP y SLFP, las cuales prácticamente se solapan.



Gráfica 1. Variación de pH en las muestras de sustrato en el tiempo.

Con respecto al efecto que se observa por parte del fertilizante, en el gráfico 2 se presenta una tendencia general al aumento moderado del pH, y una ligera tendencia a disminuir el pH en los sustratos enmendados con la aplicación del fertilizante, esto pudiendo deberse a que la enmienda permite la retención de los elementos nutrientes en las formas aportadas por el fertilizante inorgánico N-P-K, en el cual el N se encuentra como nitrato (NO_3^-) y como amonio (NH_4^+), donde la nitrificación del amonio libera H^+ generando acidez (Baldoncini, 2015). Dicho efecto también fue observado en los ensayos de suelo con aplicación de fertilizante (SF) cuyo pH en conjunto con el medido en el suelo sin enmienda ni fertilizante (S) son los más ácidos, siendo SF quien presenta una tendencia a disminuir con el tiempo.

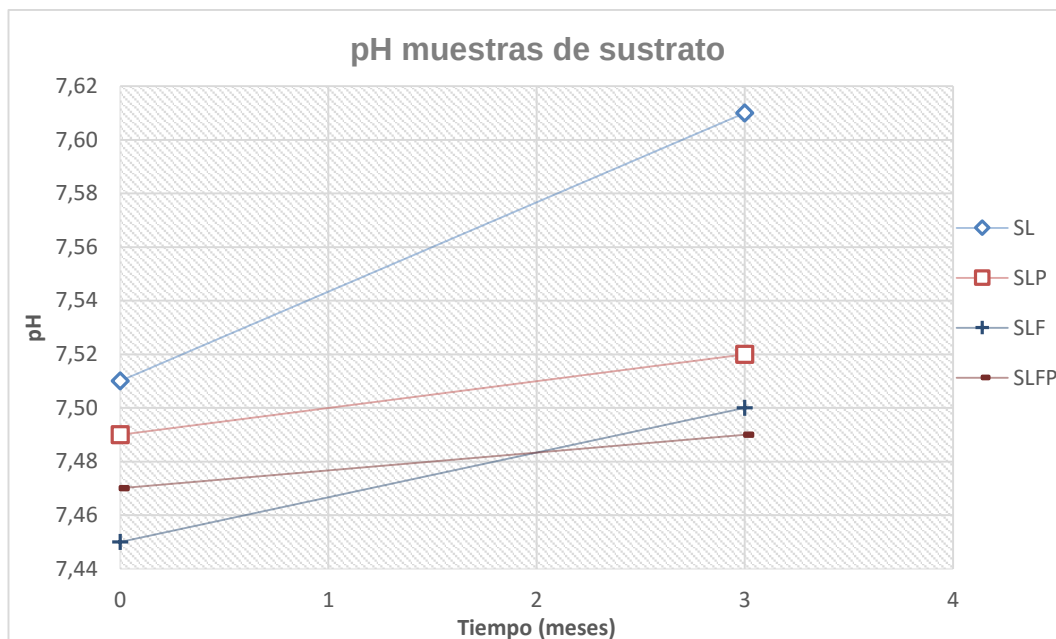


Gráfico 2. Variación de pH en suelos enmendados en el tiempo.

En el grafico 3 es mostrado el pH del lixiviado de las primeras dos semanas del primer mes y de las últimas dos semanas del tercer mes (tabla de datos en apéndice D), en las mismas se denota una tendencia de los sustratos sin enmienda (S, SP, SF y SFP) a acidificarse con el tiempo, lo cual puede deberse en gran manera a la naturaleza acida de los suelos de sabana empleados, ya que los mismos han sido lixiviados y han perdido los cationes básicos a lo largo del tiempo de exposición a los agentes climáticos y al lixiviado del sustrato con un componente mineralógico principal de los suelos de es cuarzo (SiO_2) (González, 2015), pudiendo originar ácido ortosilícico.

De igual manera que en las muestras de sustrato, los lixiviados de los ensayos con aplicación de fertilizante poseen un pH más ácido respecto a los ensayos sin aplicación del mismo. En el caso en los lixiviados de los ensayos sin enmienda SF y SFP debido a que los mismos poseen un drenaje más efectivo por la textura de los sustratos por lo tanto son las que tienen menor porcentaje de humedad (González, 2015), el cual es un resultado esperado puesto a que el sustrato es un suelo arenoso, muy poroso, con mayor conducción de calor comparado

con un suelo arcilloso (Casanova, 2005), lo que permite el arrastre de los iones aportados por el fertilizante hacia el lixiviado, iones que aportan acidez como fue mencionado previamente.

Por otra parte, los lixiviados de los suelos enmendados con aplicación de fertilizante también presentan mayor acidez que los ensayos enmendados sin aplicación de fertilizante, debido a que el exceso del fertilizante aplicado que no pudo ser retenido por el suelo fue arrastrado por el riego aportando acidez al lixiviado al inicio del experimento. Sin embargo, la tendencia general de los suelos una vez enmendados, es a incrementar moderadamente el pH en el tiempo, manteniéndose en un intervalo cercano a la neutralidad, como puede evidenciarse en los lixiviados de los mismos, ya que una vez eliminado el exceso de iones que acidificantes, los pH incrementan entrando al intervalo de los neutros.

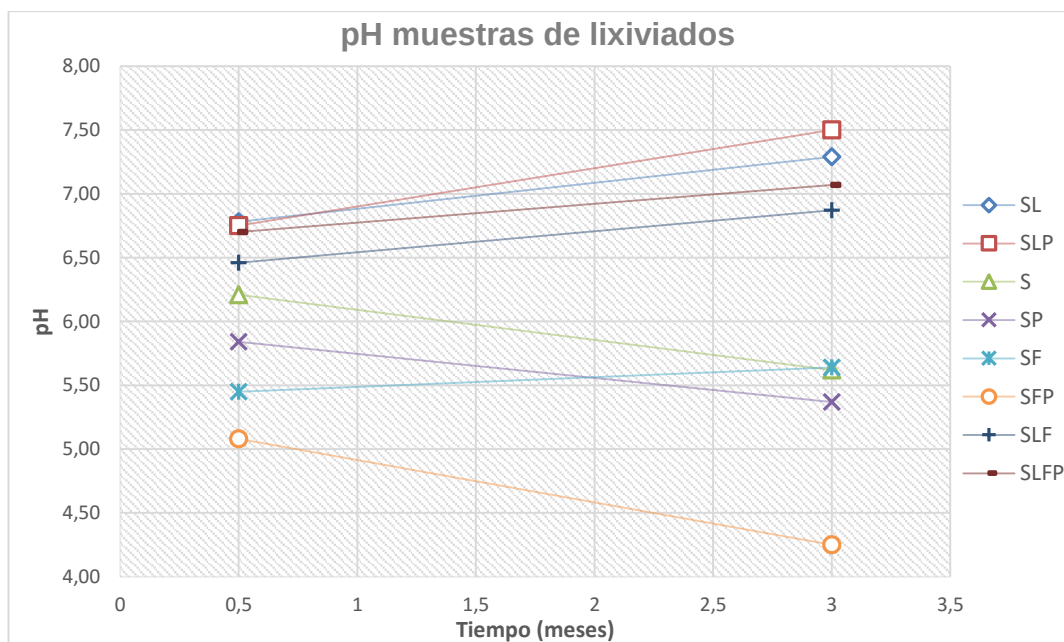


Grafico 3. Variación de pH en lixiviados en el tiempo.

Determinación de conductividad eléctrica y variaciones

En cuanto a la conductividad eléctrica medida en las muestras de sustrato en el gráfico 4 se observa una mayor conductividad eléctrica en los suelos enmendados, siendo la conductividad de los suelos sin

enmienda al finalizar el experimento de 0,013mS/cm y la conductividad en los suelos enmendados de 1,97mS/cm (tabla de datos en apéndice E), dicha diferencia se infiere que se debe al aporte de las salmueras marinas en los lodos neutralizados aplicados como enmienda, que aportaron concentraciones importantes de sales solubles. Por dicha razón, se observa la tendencia general de los ensayos enmendados a poseer una mayor conductividad eléctrica que los ensayos sin enmienda.

La diferencia que se observa entre el control SL (2,187 a 1,973mS/cm) y sus variantes con planta SLP (1,266 a 1,021mS/cm) y SLFP (1,227 a 1,103mS/cm), puede deberse al efecto que tiene la planta en la humedad del suelo, debido a que esta al absorber el agua del medio puede conllevar a una mayor tasa de precipitación de dichas sales, disminuyendo por consiguiente la conductividad eléctrica en la solución del suelo. Adicionalmente, los ensayos enmendados con aplicación de fertilizante SLF y SLFP, al tener una elevada concentración de sales solubles, pueden sobrepasar la saturación y por consiguiente su tasa de precipitación aumentaría, para el caso de SLFP la acción de la planta juega un papel importante ya que al absorber iones para sus procesos metabólicos también afecta la conductividad eléctrica disminuyéndola en el tiempo, razón por la cual la conductividad final de los ensayos SLFP es menor a la de los ensayos SLF

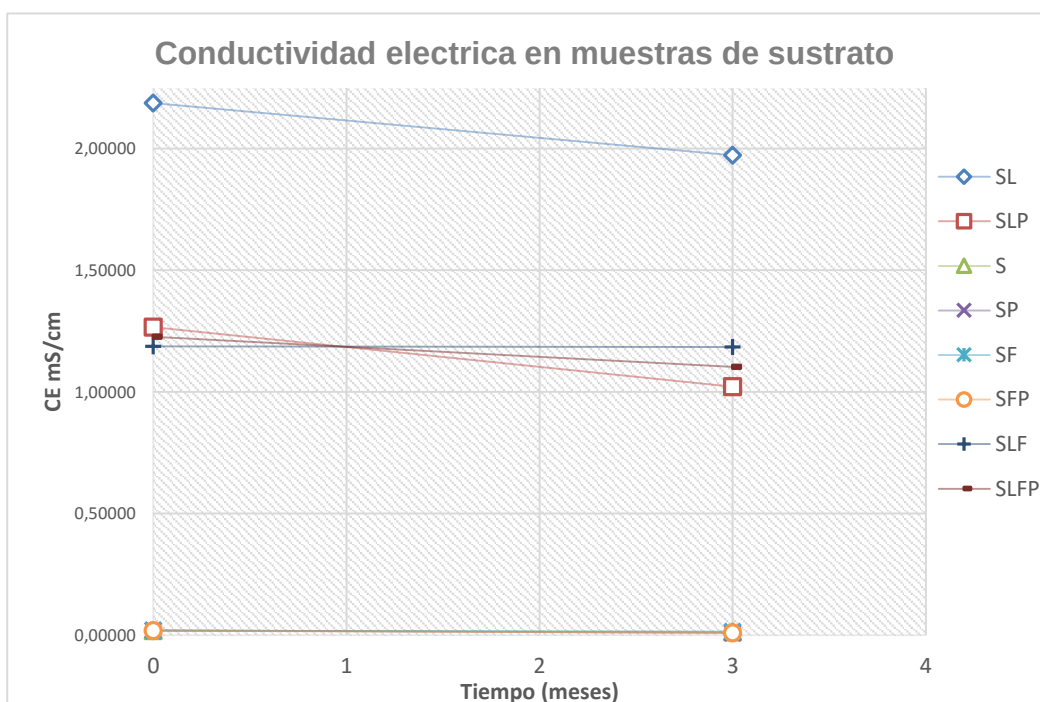


Gráfico 4. Variación de C.E. en muestra de sustratos en el tiempo.

Con respecto a los valores de conductividad observados en los suelos sin enmienda, en el gráfico 5 se observa con mayor detalle, como inicialmente la conductividad, que se esperaría mayor en las muestras de suelo con aplicación de fertilizante debido a que el mismo está compuesto de sales solubles, no difiere en gran medida de las medidas de conductividad de los suelos sin aplicación del mismo, esto se explica por la limitada capacidad de retención de los suelos arenosos. También se observa como la disminución de la conductividad es más marcada en los suelos plantados, esto debido a que la planta toma para sus procesos biológicos los cationes disponibles en el suelo.

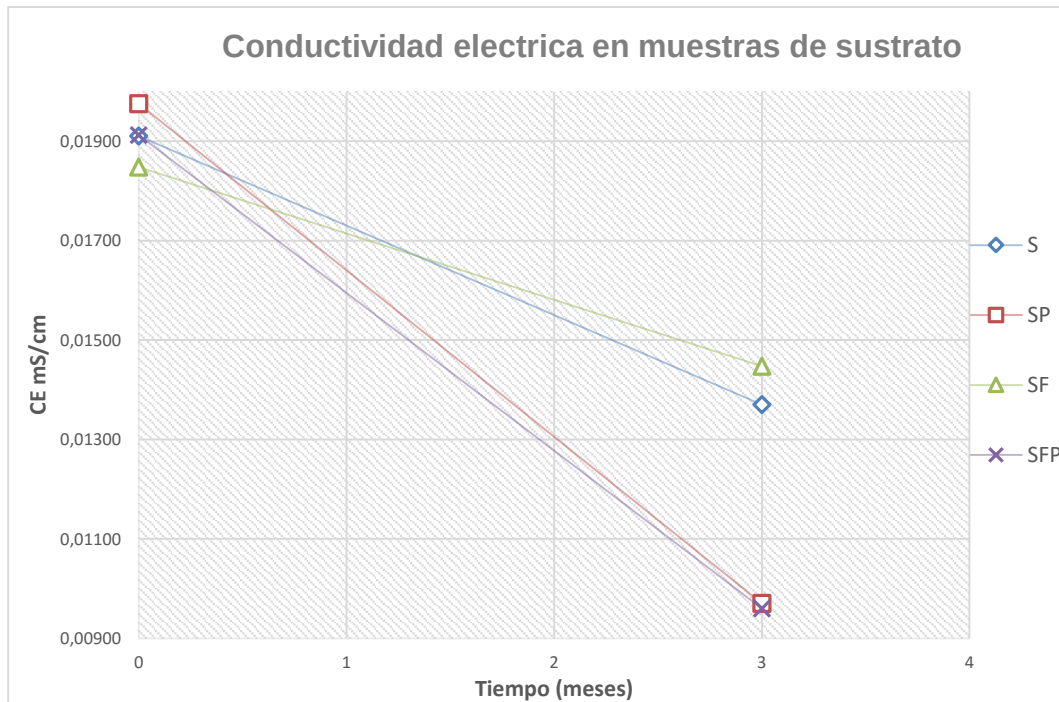


Gráfico 5. Variación de C.E. en muestras de suelo sin enmienda en el tiempo.

En relación a los valores de conductividad medidos en los lixiviados iniciales y finales (tabla de datos en apéndice E) se puede observar una pendiente muy marcada en aquellos lixiviados provenientes de los suelos enmendados (SL, SLP, SLF y SLFP) ya que principalmente el cloruro de sodio presente en el lodo, es una sal altamente soluble que fue lavada prontamente en las primeras semanas de riego, mientras que las sales solubles que conforman el fertilizante que se encontraban en exceso sufrieron el mismo proceso de lixiviación al inicio del experimento.

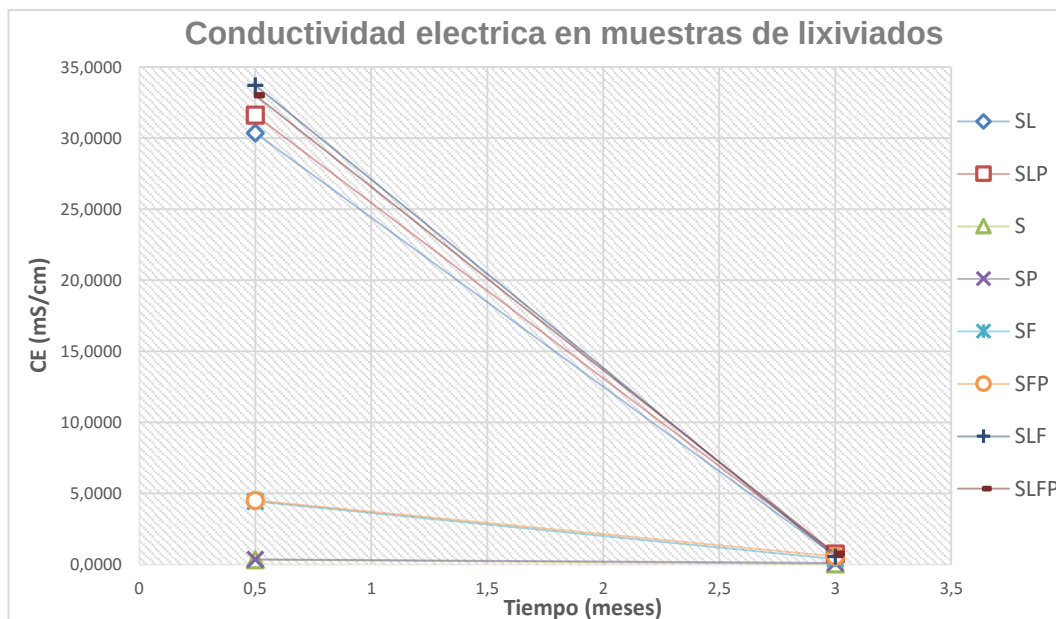


Gráfico 6. Variación de C.E. de las muestras de lixiviado en el tiempo.

Por otro lado, la conductividad en los suelos sin enmienda SF y SFP es mayor a la de sus controles sin fertilizante S y SP, debido al aporte de sales solubles del fertilizante, pero marcadamente menor que la conductividad de los suelos enmendados, evidenciando que el mayor impacto en la conductividad viene dado por la presencia del NaCl en los lodos neutralizados. Siendo los de menor pendiente los ensayos S y SP, como se observa con mayor detalle en el gráfico 7, debido a que los suelos de los que provienen, no poseen concentraciones altas de iones por su exposición prolongada a los agentes climáticos y a su reducida capacidad de retención de cationes debido a su textura arenosa y composición rica en sílice (González, 2015).

El efecto de la planta pareciera ser mínimo pero existente, ya que en los ensayos donde se encontraba plantada SP y SFP, se mantuvo la conductividad ligeramente mayor a los ensayos control sin planta S y SF, al finalizar el experimento, pudiendo esto deberse a que la planta fijó los cationes y fueron lixiviados de forma más paulatina por lo que se observa

una concentración relativa mayor al finalizar el tercer mes del experimento.

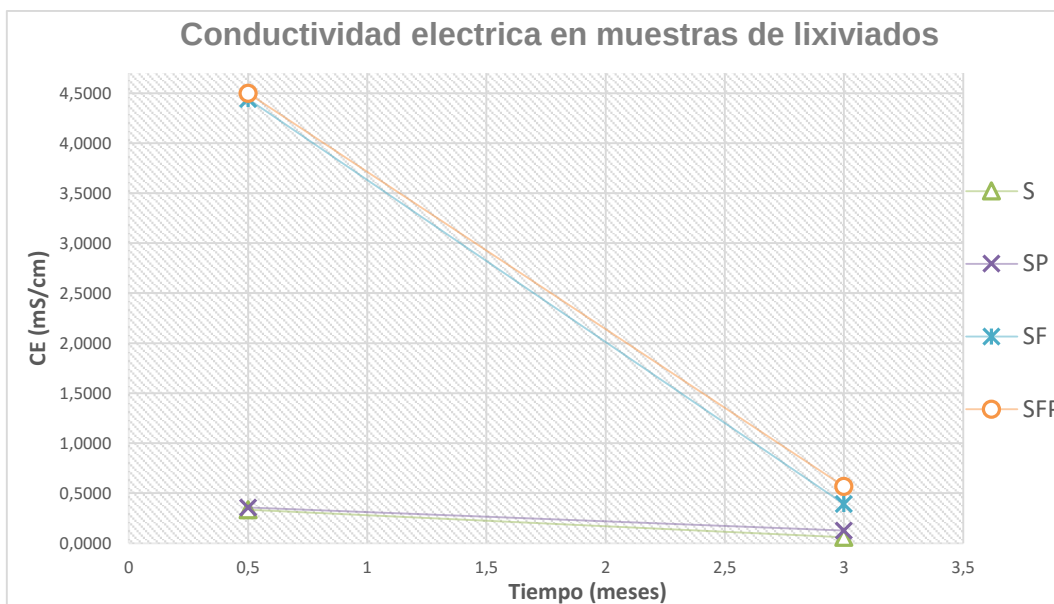


Gráfico 7. Variación de C.E. en muestras de lixiviado de suelos sin enmienda en el tiempo.

Estos resultados de pH y conductividad, nos indican el efecto de la enmienda en el mejoramiento de la condición ácida de los suelos y en la retención de iones, así como también señalan el efecto del vetiver en dichas propiedades, haciendo en conjunto con la enmienda una mejora importante en la fertilidad del suelo ácido de sabana.

Determinación de la capacidad de intercambio catiónico

Para la determinación de CIC se tomaron los triplicados de los ensayos de suelos (S) y suelos enmendados (SL) para evaluar el impacto de la enmienda sobre el suelo y se observó (gráfico 8) que desde la aplicación de la enmienda al inicio del experimento, ocurrió un incremento en la capacidad de intercambio catiónico, esto debido a la adición de material de tamaño arcilla en los lodos rojos, el cual al poseer mayor área superficial permite la adsorción de cationes y el intercambio de los mismos con la solución del suelo, efecto que también viene dado por la presencia de óxidos en los lodos rojos (González, 2015). Por otro lado se

puede observar que los suelos enmendados tienen la tendencia a incrementar su CIC de forma moderada, casi tendiendo a mantenerla a lo largo del tiempo (tabla de datos en apéndice F).

En el gráfico 8 puede observarse que para el final del experimento la capacidad de intercambio en los suelos sin enmendar disminuye de forma considerable, esto debido a que con el constante riego al que fue sometido, para emular las condiciones de la zona de estudio, son arrastradas las partículas más finas que pudieran permitir la adsorción en su superficie, razón por la cual la CIC se ve afectada de importante manera.

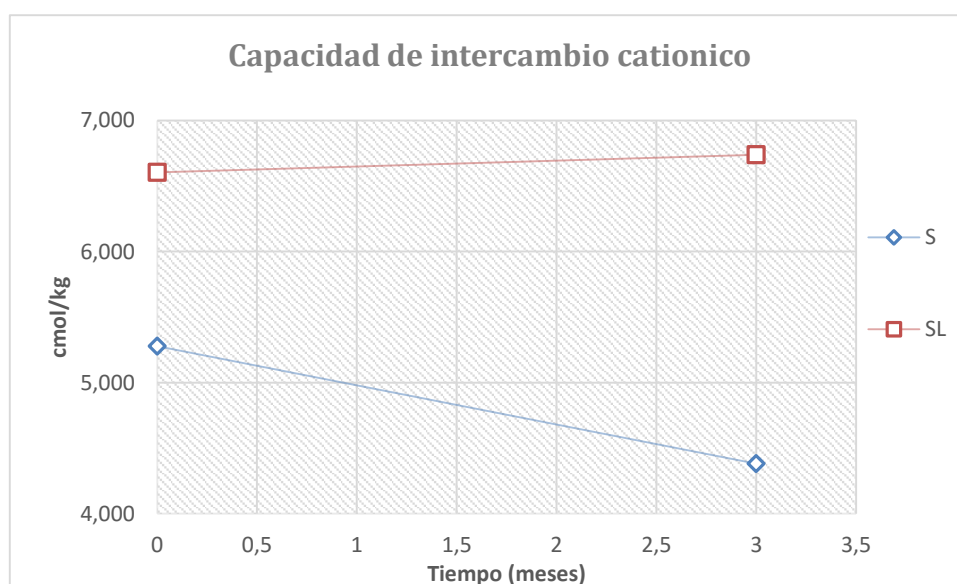


Gráfico 8. Variación de CIC para muestras de sustrato en el tiempo.

De acuerdo con Cáceres (2013) ya que todos los valores arrojados en los triplicados de las muestras de sustrato, en las medidas tanto de pH, como conductividad eléctrica y capacidad de intercambio catiónico presentan un coeficiente de variación (CV) que no supera el 20%, las mismas se consideran medidas precisas para una matriz sólida (apéndices D, E y F, respectivamente).

Análisis químico de las muestras

Para tener una medida cuantitativa de la variación en la retención de los nutrientes que se da en los suelos enmendados y entender el efecto que dicha enmienda tuvo sobre el desarrollo y supervivencia del vetiver en los diferentes ensayos se llevaron a cabo distintos análisis para determinar tres elementos nutrientes primarios N, P y K.

Nitrógeno

Para lograr la determinación del N en las muestras de sustrato, debido a que en las muestras sin aporte de fertilizante en estudios anteriores no se logró detectar dicho elemento (González, 2015), y ya que el aporte del fertilizante era más bajo (alrededor de 0,2%) de lo que se tenía estipulado (al tratarse de fertilizante N-P-K 15-15-15) se incrementó la masa de muestra a 4g.

Una vez realizado el análisis y como se puede observar en el gráfico 9, se obtuvo que las bajas concentraciones de nitrógeno presente en las muestras de suelo sin enmendar poseían la tendencia a disminuir con el tiempo. En el mismo se puede notar que el suelo ácido de sabana (S), presenta concentraciones traza que se mantuvieron constantes (tabla de datos en apéndice G), pero debido a su muy baja concentración al agregar la variable de la planta esta toma todo lo disponible en el suelo llevando la concentración de este elemento a cero.

Por otro lado las variantes de suelo sin enmienda con aplicación de fertilizante muestran también una tendencia a disminuir su concentración en el tiempo, siendo más marcada la pendiente de SFP debido a que la presencia de la planta absorbe el nutriente esencial que no haya sido lixiviado fijándolo a través de sus procesos en solución de la rizoma con el suelo, mientras que la variante SF muestra una tendencia de disminución debido al lixiviado que sufrió con el riego quedando en el suelo para el final de los tres meses, N retenido en la poca superficie que provee el suelo principalmente arenoso, siendo el mismo lixiviado con el tiempo.

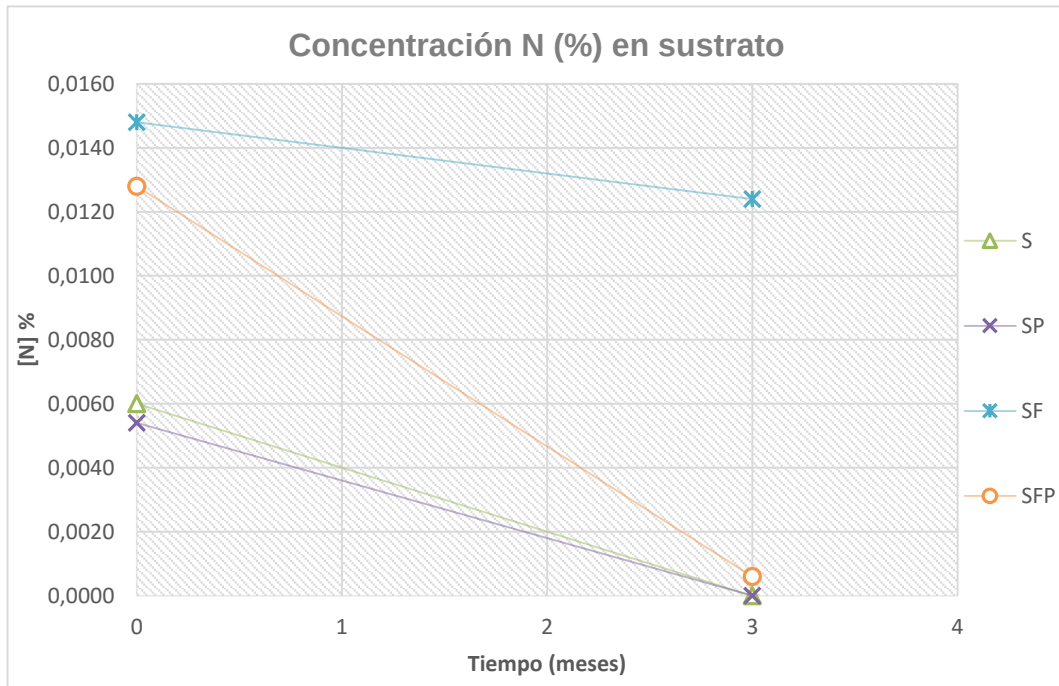


Gráfico 9. Variación en la concentración de N en muestras de suelo sin enmendar en el tiempo.

Con respecto a los ensayos de suelo enmendado, se puede observar en el gráfico 10, una tendencia general de los mismos a aumentar la retención del N en el tiempo. En el caso de los ensayos con aporte de fertilizante SLF y SLFP, se observa que al ser agregado fertilizante a lo largo del tiempo de experimento, el suelo va enriqueciéndose en el mismo reteniendo mayores cantidades, siendo la variante con planta SLFP la de menor concentración final debido a que parte de esta es absorbida por la planta para sus procesos metabólicos, pero siendo esta variante la que posee una mayor concentración inicial debido nuevamente a la presencia del vetiver, que fija por medio de su rizoma los nutrientes necesarios.

Por otro lado se observa que los suelos enmendados SL, se van enriqueciendo relativamente en N al pasar el tiempo, ya que no existe un aporte externo, si no la fijación del N que pudiera ya estar presente en el suelo. Fenómeno que se puede observar en la concentración inicial del ensayo SLP, cuya concentración una vez fijada por la enmienda, solo disminuye a lo largo del tiempo debido a la presencia de la planta que absorbe el elemento nutriente.

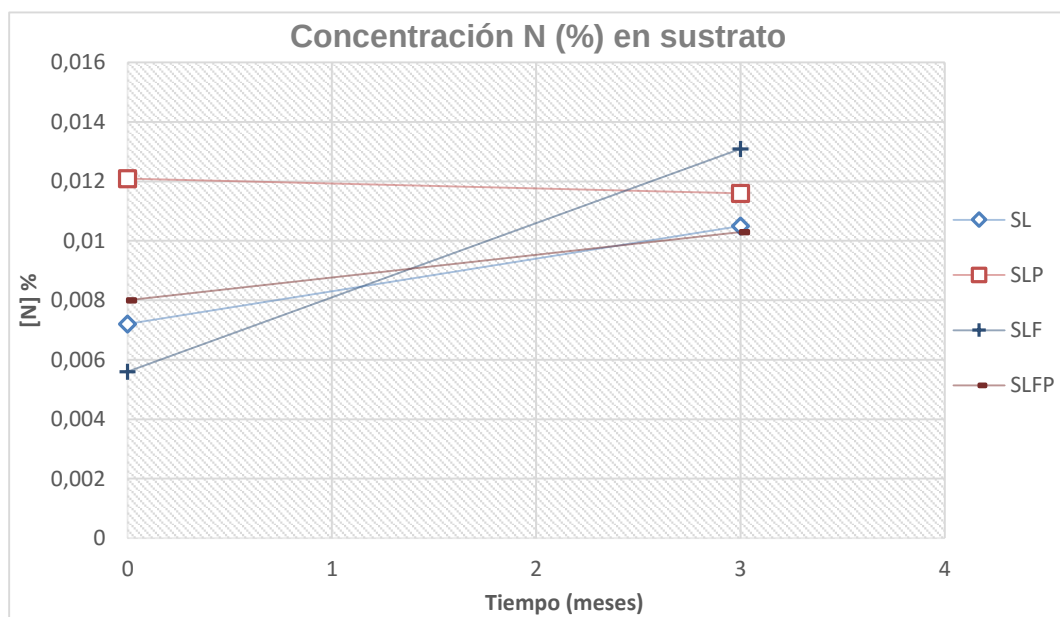


Gráfico 10. Variación de la concentración de N en muestras de suelo enmendado en el tiempo.

Por otro lado, en el gráfico 11 se puede notar también en la concentración de los lixiviados, cómo en los ensayos SF y SFP todo el aporte de N en el fertilizante es lixiviado desde el inicio del experimento, constatando de este modo que no existe retención efectiva de dicho nutriente en el suelo sin enmendar, para el final del experimento se observa el efecto de la planta que ha absorbido lo posible del suelo siendo el lixiviado de menor concentración que en SF. Mientras que en los ensayos enmendados SLF y SLFP se observa una menor concentración inicial en el lixiviado que en los ensayos sin enmienda SF y SFP, y que al evaluarlos al final del tercer mes, los ensayos enmendados tienen una concentración muy cercana o igual a cero (tabla de datos en apéndice G)

siendo evidencia del efecto de la enmienda en la retención del nitrógeno ya que para el término del experimento, el restante del mismo adsorbido en el sustrato no fue lixiviado.

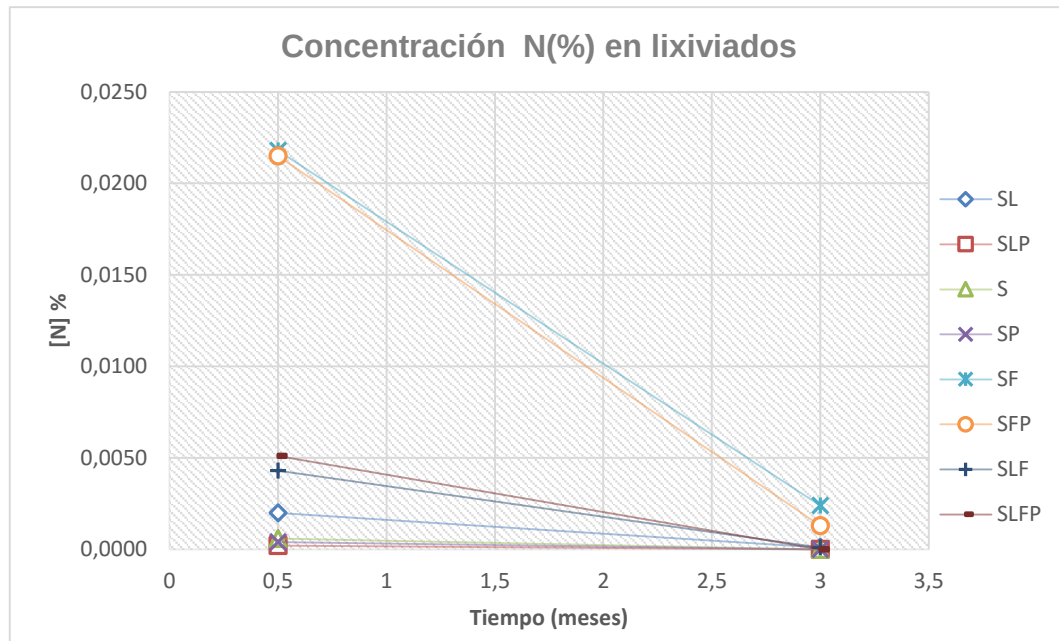


Gráfico 11. Variación en la concentración de N en muestras de lixiviado en el tiempo.

Viendo con detalle el comportamiento de los ensayos SL, S, SP y SLP, se denota el efecto de la planta y la enmienda en los suelos sin aporte del fertilizante, ya que la concentración inicial más baja en los lixiviados proviene del ensayo de suelo enmendado plantado con vetiver, por lo observado se puede inferir que lo poco lixiviado fue aquello que no logró ser fijado por la enmienda o absorbido por la planta, mientras que en su control sin planta se evidencia el impacto de la fijación de la planta por medio de su rizoma que impide la lixiviación de las mayores concentraciones observadas en SL.

Por su parte, en los ensayos sin enmienda también puede observarse el efecto que posee la planta, ya que SP posee una menor concentración inicial de N en el lixiviado que S, esto debido a que el vetiver absorbió el N en el suelo, razón por la cual este no llegó en la misma proporción que en los ensayos S, al lixiviado. El efecto de la planta

fue tal, que tanto en las muestras finales de SLP como de SP, la concentración de N no pudo ser detectada (tabla de datos en apéndice G).

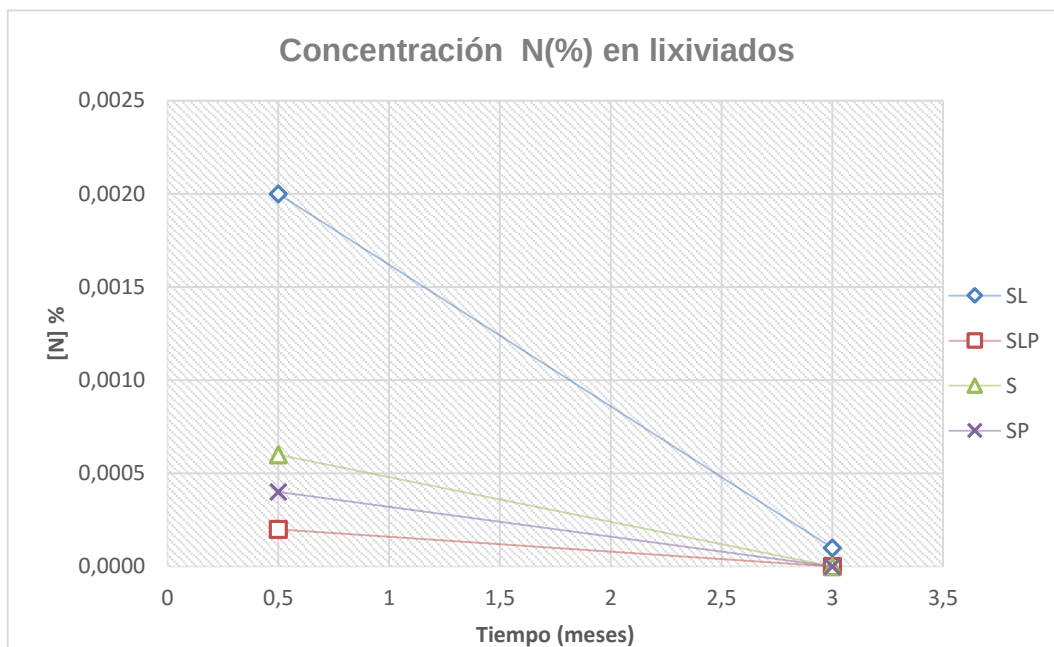


Gráfico 12. Variación de la concentración de N en muestras de lixiviado de muestras sin aplicación de fertilizante en el tiempo.

Fósforo

El comportamiento observado en las muestras de sustrato y lixiviado para el análisis de fósforo fue en gran medida similar al observado para N (tabla de datos en apéndice H). Como se observa en el gráfico 13, los ensayos de suelo enmendado con aplicación de fertilizante SLF y SLFP, incrementan su concentración en el tiempo, esto puede ser explicado por el aumento en la retención que propicia la adición de lodos rojos neutralizados, y en el caso del ensayo plantado con vetiver, la acción de la planta para fijar los nutrientes esenciales en el sustrato. Por su parte los ensayos de suelo sin enmienda con adición de fertilizante SF y SFP muestran menor retención a los enmendados.

Debido al aporte de P en el fertilizante, la concentración en el tiempo presenta un ligero aumento por acumulación de la dosis en el corto tiempo del experimento, mientras que se puede observar el efecto

de la planta en el ensayo SFP cuya tendencia de pendiente moderada al aumento en la retención es propiciada por la interacción de la rizosfera con el suelo.

Dicho efecto también se observa en el ensayo SLP el cual es el que presenta menor concentración de P retenido a lo largo del experimento, debido a que las bajas concentraciones inherentes en el suelo enmendado, son rápidamente capitalizadas por la planta y al transcurrir el tiempo la planta fija en el sustrato toda presencia disponible de P. La diferencia con el ensayo SP (siendo el segundo de mayor concentración de P en el sustrato) puede deberse a la heterogeneidad del sistema, ya que se trata de un sistema natural en el cual pueden haber variaciones en la presencia de los elementos nutrientes más aun tratándose de dos ensayos diferentes.

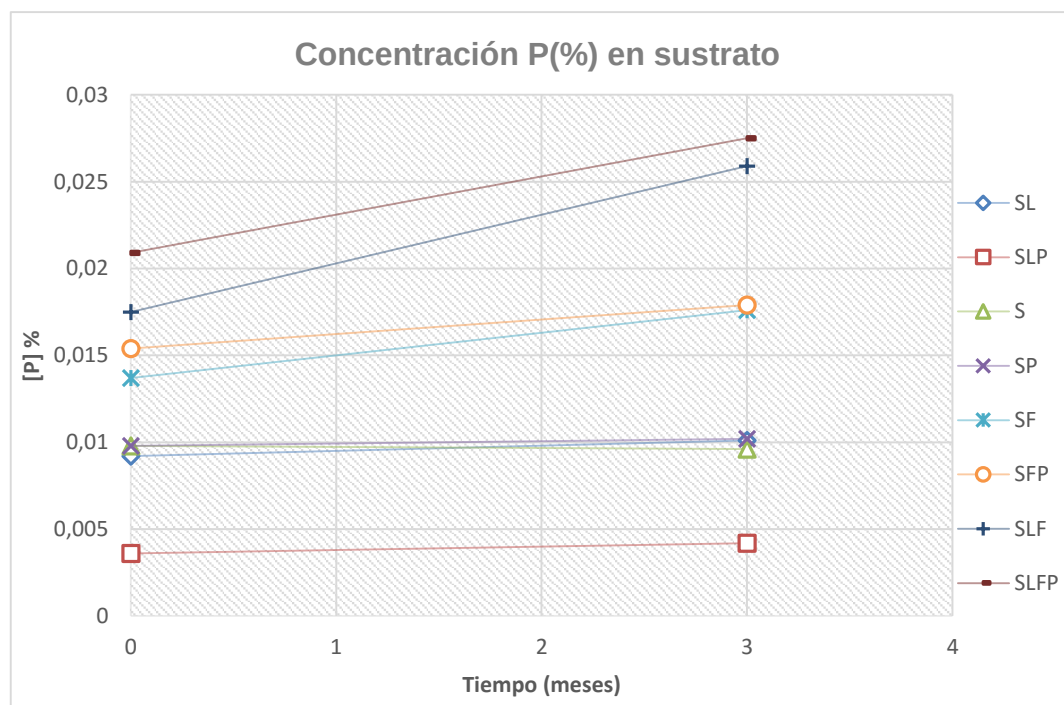


Gráfico 13. Variación en la concentración de P en muestras de sustrato en el tiempo.

En el gráfico 14 logra observarse que el solapamiento de las tendencias de los ensayos S, SL y SP observado en el gráfico 13, en realidad difiere, siendo marcada la tendencia al aumento en la concentración de P en el suelo enmendado (SL) y en el suelo bajo efecto de la fijación por la rizoma de la planta (SP), mientras que en el suelo sin enmendar y sin planta la tendencia es a disminuir la concentración en el tiempo debido al lixiviado del P. Mientras que en el suelo enmendado con planta (SLP) se puede observar un incremento en el tiempo, debido al efecto combinado de la enmienda y la fijación del rizoma; partiendo de una concentración baja debido a la absorción de la planta y la heterogeneidad del sistema, que se incrementa al morir la planta del ensayo (SLP1) ya que la misma deja de tomar el fósforo disponible.

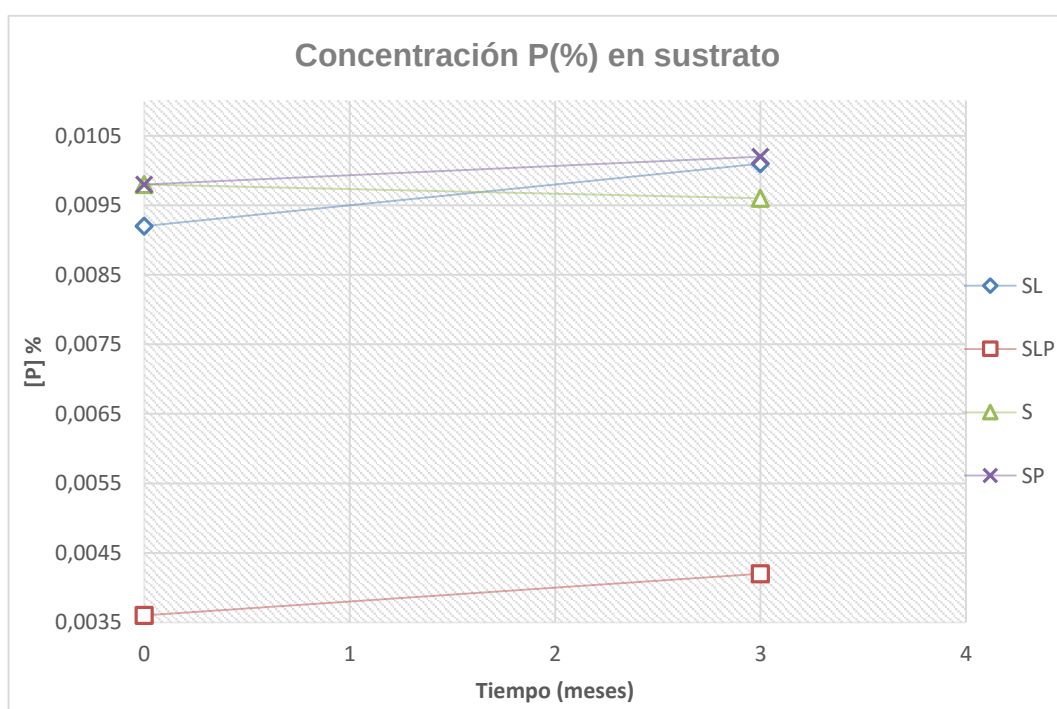


Gráfico 14. Variación en la concentración de P en muestras de sustrato sin aplicación de fertilizante en el tiempo.

Debido a que en los lixiviados de los ensayos sin aplicación de fertilizante S, SP, SL y SLP, no pudo detectarse la concentración del P por encontrarse por debajo del Límite de Detección del método (0,005mg/L) (tabla de datos en apéndice H) se presentan y discuten los

resultados obtenidos para los ensayos con adición de fertilizante SF, SFP, SLF y SLFP.

Por su parte en el gráfico 15 se puede observar el efecto de la enmienda sobre la lixiviación del P, ya que en la misma se denota que las concentraciones más bajas de P se encuentran en los lixiviados provenientes de sustratos enmendados, siendo dichas concentraciones no detectadas por el método por encontrarse por debajo del límite de detección, y que incrementan ligeramente cuando el exceso que no quedó retenido en el tiempo del experimento es lixiviado. En contraste, se observa que las concentraciones en los lixiviados de los ensayos de suelo sin enmienda SF y SFP son mayores desde el inicio del experimento e incrementaron durante el experimento por la adición de fertilizante y su lixiviado por el riego, siendo el ensayo con planta el que iniciaba con menor lixiviación del P pero con el tiempo y la saturación en la planta por el exceso de fertilizante, se fue lixivando para el final de los tres meses mayor concentración de P.

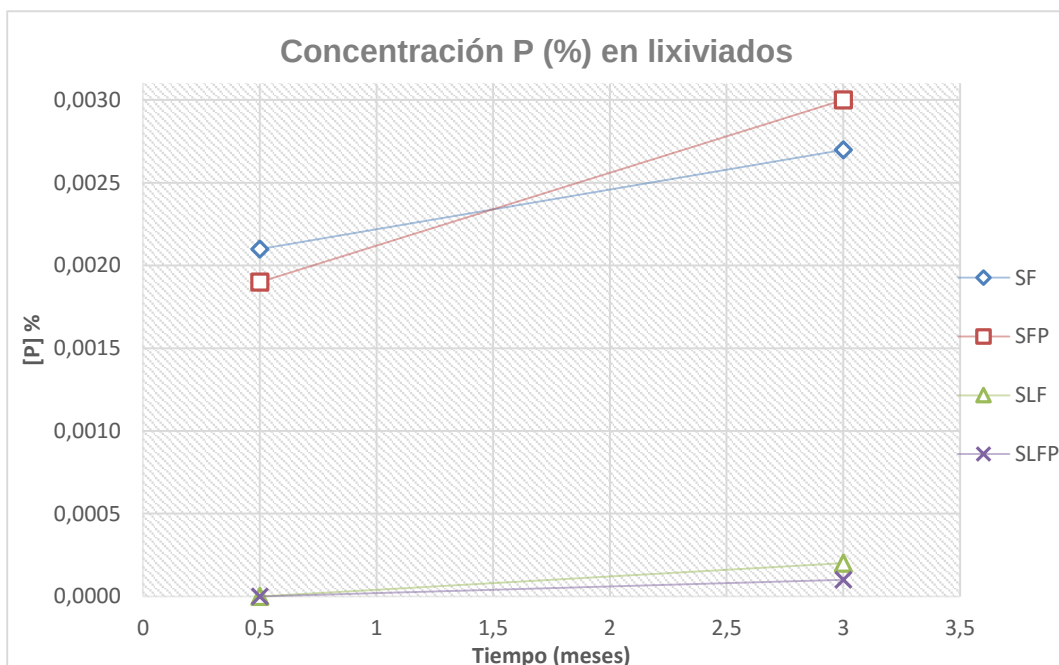


Gráfico 15. Variación de la concentración de P en muestras de lixiviado en el tiempo.

Potasio

Este elemento a diferencia de los dos tratados anteriormente, se encontraba presente en todos los ensayos de prueba en concentraciones detectables (tabla de datos en apéndice I), al igual que los elementos expuestos anteriormente, las muestras de suelo enmendado SL y la variante con planta SLP mostraron una tendencia a aumentar la concentración de K en el tiempo, siendo el ensayo plantado el de mayor concentración entre los dos.

Mientras que por el lado de los ensayos enmendados con aplicación de fertilizante SLF y SLFP se observa una ligera disminución en el tiempo, que es atenuada en el ensayo SLFP por la presencia de la planta y su interacción y fijación de elementos nutrientes, que mantienen casi constante la concentración de potasio en el suelo, mientras que en el ensayo SLF la enmienda de lodos retiene el K, pero debido a que no hay la posibilidad de absorción por una planta, el mismo comienza a ser lixiviado.

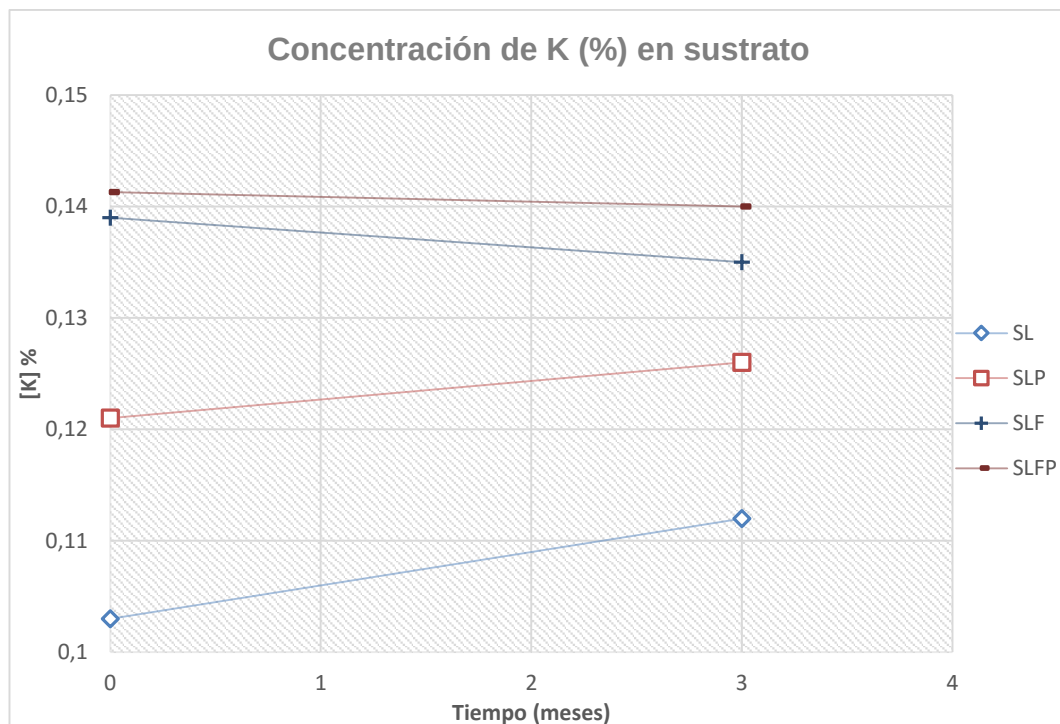
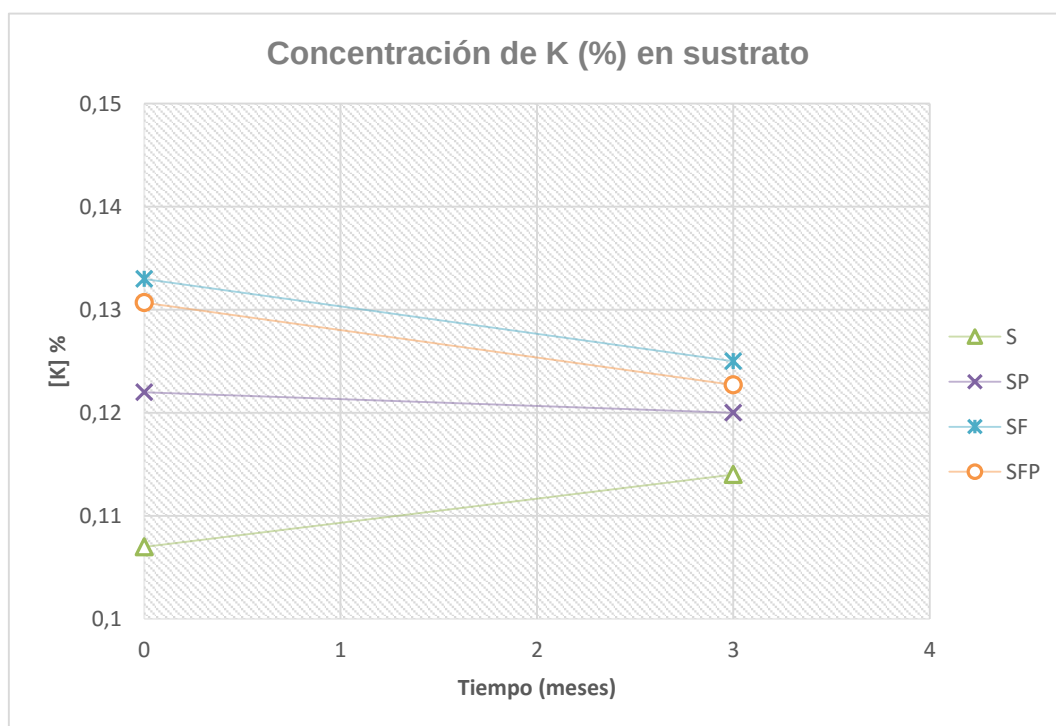


Gráfico 16. Variación en la concentración de K en muestras de suelo enmendado en el tiempo.

Por su parte los suelos sin enmienda mostraron en general la tendencia disminuir en el tiempo su concentración de K (gráfico 17), siendo aquellas con concentraciones más altas las que tuvieron aporte de fertilizante, y en comparación con las concentraciones de P en los mismos ensayos, las concentraciones de K fueron mayores, esto debido a que las sales en las que se encuentra en el fertilizante tienen una menor solubilidad que las de P, en adición a que la concentración final era la suma del fertilizante y el potasio existente en el suelo.

Con respecto a la diferencia entre la tendencia de los ensayos S y SP, la disminución observada en el segundo se puede atribuir a la absorción por parte de la planta de dicho elemento, mientras que en el ensayo sin planta al carecer de la planta que por interacción de la rizoma con el suelo hiciera biodisponible el K mineral, el mismo se enriqueció relativamente en el tiempo, enriquecimiento que podría también deberse a



la heterogeneidad del sistema en el cual se tomaron las muestras.

Gráfico 17. Variación de la concentración de K en muestras de suelo sin enmendar en el tiempo.

En las muestras de lixiviado, se observó en general la tendencia a disminuir la concentración de K en el transcurso del experimento (grafico 18), siendo en el tiempo 1 menores en los ensayos sin aporte externo de dicho nutriente por medio del fertilizante S y SP, los cuales permanecieron prácticamente constantes en el tiempo, siendo ligeramente menor SP por la presencia de la planta. Los ensayos de suelo sin enmienda con aplicación de fertilizante SF y SFP fueron los que para el tiempo 2, al finalizar el experimento presentaron las mayores concentraciones de K en los lixiviados, una vez más debido a las características texturales y composicionales de los suelos arenosos, y si bien los suelos enmendados con aplicación de fertilizante marcaron una más pronunciada pendiente entre el tiempo 1 y 2 esto se debió a que la concentración inicial además de poseer el aporte del fertilizante, también poseía aporte por parte de la salmuera marina utilizada en la neutralización de lodos rojos, dicha concentración en exceso, fue lixiviada en su mayoría al inicio del experimento ya que los espacios de intercambio catiónico se encontraban ocupados por los iones aportados por el fertilizante y los lodos rojos neutralizados, y para el tiempo 2 la concentración de K en el lixiviado es menor a la de suelos sin enmienda con fertilizante ya que parte del K se encuentra adsorbido en las superficies de intercambio dadas por los lodos.

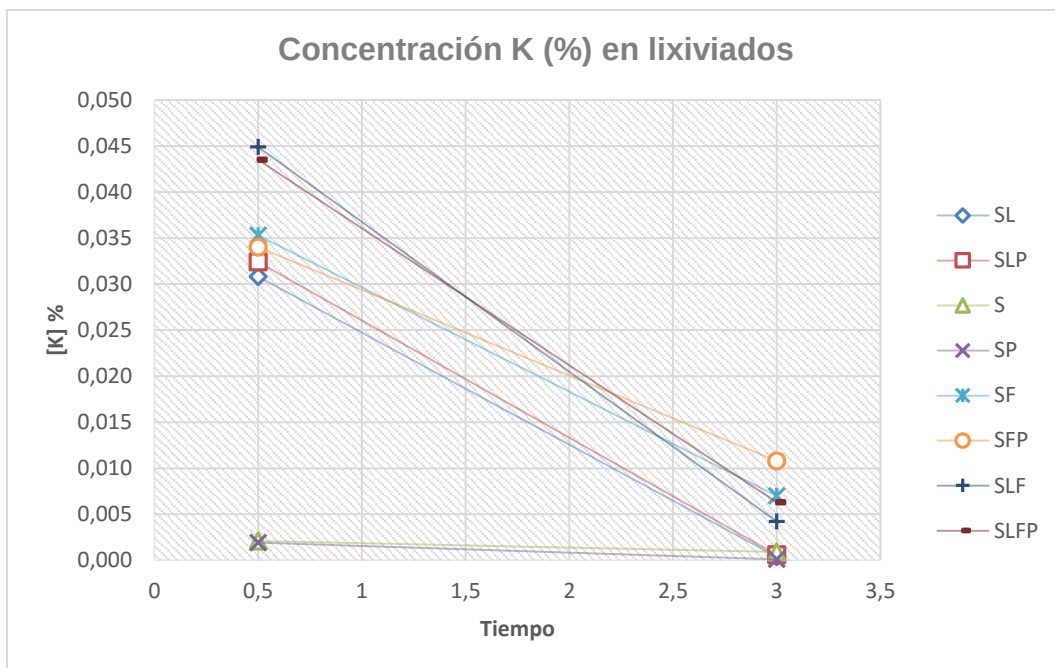


Gráfico 18. Variación de la concentración de K en muestras de lixiviado en el tiempo.

En general al estudiar el comportamiento de los elementos nutrientes esenciales N-P-K por los 3 meses (93 días) en que fue llevado a cabo el experimento, se pudo constatar que se da un incremento importante en la retención de los mismos, incremento que se magnifica en cierto modo por la presencia de una planta como el vetiver con características que permiten mejorar las condiciones de sustratos hostiles. Dicho incremento en la retención de los elementos N-P-K y una dosificación poco adecuada llevaron a la toxicidad del sustrato para las plantas de los ensayos SLFP en los cuales no hubo supervivencia de los esquejes debido a las concentraciones en el sistema.

Tratamiento estadístico de los datos

En cuanto a la evaluación de la calidad de los datos obtenidos del análisis de nitrógeno en las muestras de sustrato, como se puede observar en el apéndice G5, debido a que su coeficiente de variación (CV) se encuentra por debajo de 20% según Cáceres (2013) la precisión para el método es considerada buena para una muestra sólida. En cuanto a la

evaluación de la exactitud mediante el uso de un patrón certificado (Control LECO) se obtuvo un valor de %N ($0,2469 \pm 0,0139$) dentro del error reportado teóricamente ($0,233 \pm 0,013$), valores que pueden observarse en el apéndice G6, pudiendo considerarse que los datos obtenidos son exactos.

Por otro lado, en lo referente a la evaluación de la calidad de los datos obtenidos en el análisis de fósforo, y ya que al igual que en el caso del análisis de nitrógeno el CV no sobrepasa el 20% para matrices sólidas (Cáceres 2013) (apéndice H12) se considera que los datos obtenidos son precisos en reproducibilidad.

Mientras que en la evaluación de la exactitud, debido a que se contó únicamente con un patrón certificado para P y K, y debido a que el límite de confianza de la concentración teórica reportada para fósforo ($0,021 \pm 0,1$) es incluso de mayor magnitud que la misma concentración reportada, el valor de %P obtenido ($0,053$ y $0,057$), si bien cae dentro del límite teórico ($0,021 \pm 0,1$) posee un error asociado (apéndice I13) muy elevado debido a lo alejado del valor considerado real.

Por último, en la evaluación de la calidad de los datos obtenidos en el análisis de potasio, en cuanto a la precisión (apéndice I14) al igual que en los casos anteriores (nitrógeno y fósforo) al estar el CV por debajo del 20% para muestras de matriz sólida (Cáceres, 2013) por lo cual se considera que los datos poseen una buena precisión.

En cuanto a la exactitud, se obtuvieron dos determinaciones para el patrón MCAF lote7B-3, siendo el primero (apéndice I15) de $1,571 \pm 0,015$ en relación al valor teórico reportado para potasio ($1,59 \pm 0,04$), de acuerdo a lo cual se puede decir que el método usado posee una muy buena exactitud.

Conclusiones

1. Los pH generados tanto en sustrato enmendado (de 6,87 a 7,50 unidades) como en sus respectivos lixiviados (de 7,49 a 7,61 unidades) se encuentran dentro de los valores idóneos para suelos fértiles en los primeros, y dentro de los límites permitidos ambientalmente en los segundos.
2. De acuerdo a la sintomatología presentada por las plantas, y la supervivencia de las mismas en los ensayos de suelos enmendados con aplicación de fertilizante formula completa N-P-K (SLFP) la combinación de los factores de incremento en la retención de nutrientes y una dosis alta del fertilizante, conllevaron al pobre desarrollo y perecimiento de los esquejes.
3. El efecto de la enmienda de lodos rojos neutralizados, en lo suelos ácidos de sabana sobre la retención de nutrientes, se ve moderadamente incrementado por la presencia del vetiver debido a la interacción de la rizosfera con la solución del suelo, efecto que se observa en los análisis de los lixiviados, donde la concentración de los elementos nutrientes es menor en los ensayos con presencia de la planta.
4. La elevada dosis de fertilizante en los suelos enmendados condujo a su acumulación en los ensayos SLFP lo cual dio como resultado el pobre desarrollo y clorosis en las plántulas, conduciendo a los esquejes a la no supervivencia en un sistema en el cual la presencia de K interfirió con la absorción de los micronutrientes tales como Ca^{+2} y Mg^{+2} .
5. La capacidad de intercambio catiónico se incrementó desde el momento de la aplicación de la enmienda con lodos rojos

neutralizados, y continuó en incremento en el tiempo debido a que la enmienda promueve la formación de coloides en el suelo.

6. La conductividad eléctrica en los ensayos se encuentra controlada por las sales, principalmente las que derivan de la salmuera marina en los lodos rojos neutralizados, y en menor medida las aportadas por el fertilizante. Mientras que la disminución de la conductividad en el sustrato se debe al lixiviado en el tiempo.
7. En el presente estudio se pudo determinar que existe un incremento cuantificable en la retención de los elementos nutrientes N-P-K en los suelos con aplicación de la enmienda de lodos rojos neutralizados con salmuera marina, en contraste con la pobre retención de los suelos ácidos de sabana en estudio. Así como una mejora general en sus características físico-químicas.

Recomendaciones

Con la finalidad de determinar la concentración que se encontraba biodisponible en los ensayos enmendados con aplicación de fertilizante, y que fue efectivamente absorbida por la planta, es recomendable hacer un estudio a la biomasa de la misma.

En futuros estudios es recomendado variar las proporciones agregadas del fertilizante de formula completa N-P-K para determinar una dosis más acorde a las necesidades de la planta.

Sería recomendable la realización del estudio por un tiempo más prolongado para poder observar con un mayor contraste el impacto de la enmienda sobre las propiedades de suelo y la duración de la misma.

Referencias bibliográficas

- Adams, M. 1995. Fundamentos de química de suelos, Consejo de Desarrollo Científico y Humanístico, U.C.V., Caracas-Venezuela. 390 p.
- AgroEstrategias Consultores. (2007). *Nutrición mineral de las plantas*. [Documento en línea]. Disponible: <http://www.agroestrategias.com/index.php?acc=6> [Consulta 2017, Abril 17]
- Baldoncini, A. M. (2015). *Efectos de la aplicación de fertilizantes sobre el pH de suelos serie Oncativo*. Tesis de Licenciatura. Facultad de Ciencias Agropecuarias. Universidad Nacional de Córdoba. 22 p.
- Brady, N. C., 1984. *The nature and properties of soils*. 9th Ed. New York. USA. MacMillan Publishing Company. 750p.
- Casanova, E. (2005). *Introducción a la ciencia del suelo* (Segunda ed.). Caracas: Consejo de Desarrollo Científico y Humanístico.
- Caccamo, M.V., 2013. *Efecto de los lodos rojos neutralizados con salmueras marinas, sobre los parámetros fisicoquímicos de Río Orinoco*. Trabajo Especial de Grado. Escuela de Química. Facultad de Ciencias. Universidad Central de Venezuela. 97 p.
- Cáceres, L.F., 2013. Determinación de capacidad de intercambio catiónico (CIC) en suelos. Procedimiento operativo estándar. UMSA. México. 8p.
- European Aluminium Association, 2013. Bauxite Residue Management: Consulta: Mayo 2016

- FAO, 2016. Propiedades del suelo [Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura]. Disponible en: <http://www.fao.org/soils-portal/levantamiento-de-suelos/propiedades-del-suelo/es/> Consultado en Marzo 2017.
- Fernandes, M., 2012. *Estudio de enmiendas sobre lodos rojos. Trabajo de grado de maestría*. Universidad central de Venezuela, Facultad de Ciencias Escuela de Química, Caracas.
- Foth, H. D., 1990. *Fundamentals of soil science*. 8th ed. Wiley. New York. USA. 360p.
- González, D. 2015. *Estudio de las propiedades químicas en mezclas de lodos rojos con suelos ácidos de sabana, y su efecto sobre el crecimiento de la especie Chrysopogon zizanioides (Vetiver)*. Trabajo Especial de Grado. Escuela de Química. Facultad de Ciencias. Universidad Central de Venezuela. 143p.
- Jaramillo, D., 2002. *Introducción a la ciencia del suelo*. Universidad nacional de Colombia. Facultad de Ciencias. Medellín. 613p.
- Johnston, M. Clark, M. McMahon, P y Ward, N., 2010. Alkalinity conversion of bauxite refinery residues by neutralization. *Journal of Hazardous Materials*, 182, 710–715.
- Klauber, C., Gräfe, M., y Power, G., 2009. Review of bauxite residue “re-use” options. CSIRO Document DMR-3609, May 2009. 66 p.
- Kwon-Rae Kim, G. O. (2008). Influence of Vetiver Grass (*Vetiveria zizanioides*) on Rhizosphere Chemistry in Long-term Contaminated Soils. *Korean J. Soil Sci. Fert*, 41(1), 55-64.
- Laboratorio de Estudios Ambientales, 1993. Laboratorio Ciencias del Suelo. Instituto de Zoología Tropical. Facultad de Ciencias. Universidad Central de Venezuela. 56 p.

- Marcano, J.C., 2013. *Estudio sobre la neutralización de la fracción seca de lodos rojos, derivadas de la Bauxita de Los Pijiguaos utilizando salmueras marinas*. Trabajo Especial de Grado. Escuela de Química. Facultad de Ciencias. Universidad Central de Venezuela. 100p.
- Orihuela, J.A., 2007. Manual sobre el uso y manejo del pasto Vetiver (*Chrysopogon Zizanioides*). Organización Panamericana de la Salud. Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento. Lima-Perú. 37p.
- Osman, K. T., 2013. *Soils, Principles, Properties and Management*. Springer Science, Netherlands. 295p.
- Osman, K. T., 2014. *Soil Degradation, Conservation and Remediation*. Springer Science, Netherlands. 248p.
- Rubinos, D., 2008. *Utilización de los lodos rojos de bauxitas en la contención e inactivación de residuos tóxicos y peligrosos*. Tese de Doutoramento. Faculdade de Farmacia. Universidade de Santiago de Compostela. 789 p.
- Sarmiento, N. N., 2013. *Evaluación de la efectividad de las salmueras marinas en la neutralización de los residuos producidos por la refinería de bauxita de Los Pijiguaos, Edo. Bolívar- Venezuela*. Trabajo Especial de Grado. Escuela de Química. Facultad de Ciencias. Universidad Central de Venezuela. 60p.
- Singer, M. J., and Munns, D. N. 1999. *Soils an introduction*. 4th ed. Upper Saddle River. Prentice-Hall. 527p.
- Snars, K., Gilkes, R. and Hughes, J., 2003. Effect of soil amendment with bauxite Bayer process residue (red mud) on the availability of phosphorus in very sandy soils *Australian Journal Soil Research*, 41(6), p.1229.

- Snars, K., Gilkes, R. and Wong, M., 2004. The liming effect of bauxite processing residue (red mud) on sandy soils. *Australian Journal Soil Research*, 42(3), 321p.
- Summers, R., Guise, N. and Smirk, D., 1993. Bauxite residue (red mud) increases phosphorus retention in sandy soil catchments in Western Australia. *Fertilizer Research*, 34(1), pp.85-94.
- Summers, R., Smirk, D. and Karafilis, D., 1996. Phosphorus retention and leachates from sandy soil amended with bauxite residue (red mud). *Australian Journal Soil Research*, 34(4), p.555.
- Summers, R.N., Bolland, M. D. y Clark, M.F., 2001. Effect of application of bauxite residue (red mud) to very sandy soils on subterranean clover yield and P response. *Australian Journal Soil Research*, 39, 979-990.
- Truong, P., Tan Van, T. y Pinners, E., 2009. Vetiver System Applications. Technical Reference Manual. *The Vetiver Network International*. 126 p.
- US EPA (United States Environmental Protection Agency), 2000. SW-846 Method 9040 (liquid) and SW-846 Method 9045 (soil). pH in liquid and soil. 3 p.
- Valera, N., 2009. *Efecto de las emulsiones asfálticas y la roca fosfórica sobre la adsorción de P en suelos ácidos de sabana de pedogénesis contrastantes*. Trabajo Especial de Grado. Escuela de Química. Facultad de Ciencias. Universidad Central de Venezuela. 174p.
- Vlahos, S., Summers, K., Bell, D. and Gilkes, R. (1989). Reducing phosphorus leaching from sandy soils with red mud bauxite processing residues. *Australian Journal Soil Research*, 27(4), p.651.

Ward, S. and Summers, R. (1993). Modifying sandy soils with the fine residue from bauxite refining to retain phosphorus and increase plant yield. *Fertilizer Research*, 36(2), pp.151-156.

Yu, T. R. 1997. *Introduction in: Chemistry of Variable Charge Soils*. Yu T. R. Oxford University Press Inc. New York. pp: 3-16

Apéndice A- Neutralización de lodos rojos provenientes de la bomba GEHO con salmuera marina en proporción 4:1 masa (g)/volumen (mL).

Tabla A.1 Masa y pH de la neutralización de lodos rojos.

Muestra	Masa ($\pm 0,1g$)	Volumen ($\pm 1mL$)	pH
Lodos rojos de la bomba GEHO	2019,6	*	13,00
Salmuera marina	*	500	*
Lodos rojos neutralizados	*	*	8,13

Apéndice B- Cantidad de muestra por ensayo y dosificación de fertilizante N-P-K.

Tabla B.1 Masa de suelos y lodos rojos tomada para la elaboración de las mezclas.

Mezcla	Suelo $\pm 0,1g$	Lodos rojos neutralizados $\pm 0,1g$	Masa final de ensayo $\pm 0,1g$
SL1	1960,1	40,0	2000,1
SL2	1960,0	40,0	2000,0
SL3	1960,0	40,0	2000,0
SLP1	1960,0	40,0	2000,0
SLP2	1960,1	39,9	2000,0
SLP3	1960,1	39,9	2000,0
S1	2000,3	-	2000,3
S2	2000,1	-	2000,1
S3	2000,2	-	2000,2
SP1	2000,1	-	2000,1
SP2	2000,2	-	2000,2
SP3	2000,2	-	2000,2
SF1	2000,1	-	2000,1
SF2	2000,1	-	2000,1
SF3	2000,8	-	2000,8
SFP1	2000,1	-	2000,1
SFP2	2000,0	-	2000,0
SFP3	2000,0	-	2000,0
SLF1	1960,0	40,0	2000,0
SLF2	1960,0	40,1	2000,1

Mezcla	Suelo $\pm 0,1g$	Lodos rojos neutralizados $\pm 0,1g$	Masa final de ensayo $\pm 0,1g$
SLF3	1960,0	40,0	2000,0
SLFP1	1960,0	40,0	2000,0
SLFP2	1960,0	40,0	2000,0
SLFP3	1960,0	40,0	2000,0

SL: Mezcla de suelos ácidos de sabana con lodos rojos neutralizados, **SLP:** Mezcla de suelos ácidos de sabana con lodos rojos neutralizados plantados con vetiver, **S:** Suelo ácido de sabana, **SP:** suelo ácido de sabana plantado con vetiver, **SF:** suelo ácido de sabana con fertilizante, **SFP:** Suelo ácido de sabana con fertilizante plantado con vetiver, **SLF:** Mezcla de suelos ácidos de sabana con lodos rojos neutralizados, con fertilizante, **SLFP:** Mezcla de suelos ácidos de sabana con lodos rojos neutralizados, con fertilizante plantado con vetiver.

Tabla B2. Masa de fertilizante aplicada a los ensayos.

Masa de fertilizante ($\pm 0,0001g$)					
Ensayo	Semana 1	Semana 2	Semana 3	Semana 4	Semana 8
SLF1	1,0123	1,0641	1,0009	1,0120	0,2520
SLF2	1,0117	1,0501	1,0129	1,0030	0,2537
SLF3	1,0383	1,0138	1,0374	1,0108	0,2506
SF1	1,0200	1,0069	1,0003	1,0106	0,2509
SF2	1,0054	1,0057	1,0100	1,0070	0,2501
SF3	0,9999	1,0610	1,0140	1,0138	0,2591
SFP1	1,0101	1,0015	1,0151	1,0076	0,2505
SFP2	1,0204	1,0125	1,0055	1,0120	0,2588
SFP3	1,0082	1,0070	1,0084	1,0002	0,2505
SLFP1	1,0493	1,0142	1,0098	0,9731	0,2564
SLFP2	1,0388	1,0024	1,0003	0,9983	0,2561
SLFP3	1,0002	1,0015	1,0179	1,0091	0,2517

La dosis aplicada el primer mes de experimento fue la sugerida por profesores de la Facultad de Agronomía de la Universidad Central de Venezuela, al notar un efecto negativo se suspendió durante el segundo mes y al final del mismo se aplicó una dosis menor para no suprimir del todo la aplicación de fertilizante para el último mes.

Apéndice C- Parámetros de crecimiento evaluados en el vetiver.

Tabla C1. Masa de los esquejes al inicio y final del experimento

Ensayo	Masa inicial ($\pm 0,1g$)	Masa final ($\pm 0,1g$)	Diferencial de masa	Propagación de error
SP1***	21,4	18,7	-2,7	0,1

SP2	25	23,7	-1,3	0,1
SP3	23,9	31,5	7,6	0,1
SLPF1*	34,7	23,1	-11,6	0,1
SLPF2**	37,6	31,9	-5,7	0,1
SLPF3***	35	20,7	-14,3	0,1
SFP1	22,4	21,2	-1,2	0,1
SFP2**	24,3	16,7	-7,6	0,1
SFP3	26,9	23,8	-3,1	0,1
SLP1***	29,3	18,8	-10,5	0,1
SLP2	30,4	25,9	-4,5	0,1
SLP3	23,6	18,9	-4,7	0,1

* Muerte en el primer mes

** Muerte al segundo mes

***Muerte en la última semana

Tabla C.2 Longitud de tallos de las plantas al inicio y final del experimento.

Ensayo	Longitud inicial ($\pm 0,1$ cm)	Longitud final ($\pm 0,1$ cm)	Diferencia en longitud (cm)	Propagación de error
SP1	11,0	56,0	45,00	0,14
SP2	15,0	77,4	62,40	0,14
SP3	13,0	79,0	66,00	0,14
SLPF1	12,5	18,0	5,50	0,14
SLPF2	12,0	24,0	12,00	0,14
SLPF3	11,0	55,8	44,80	0,14
SPF1	15,0	61,0	46,00	0,14
SPF2	14,0	24,0	10,00	0,14
SPF3	14,7	23,8	9,10	0,14
SLP1	11,5	34,6	23,10	0,14
SLP2	12,0	51,0	39,00	0,14
SLP3	12,1	67,0	54,90	0,14

Tabla C.3 Longitud de raíces de las plantas al inicio y final del experimento.

Ensayo	Longitud inicial ($\pm 0,1$ cm)	Longitud final ($\pm 0,1$ cm)	Diferencia en longitud (cm)	Propagación de error
SP1	5,0	9,5	4,50	0,14
SP2	5,5	18,0	12,50	0,14
SP3	5,0	12,0	7,00	0,14
SLPF1	6,0	19,5	13,50	0,14
SLPF2	5,0	18,5	13,50	0,14
SLPF3	5,2	16,7	11,50	0,14
SPF1	5,6	10,0	4,40	0,14
SPF2	4,7	9,0	4,30	0,14
SPF3	6,2	16,0	9,80	0,14
SLP1	5,1	12,3	7,20	0,14
SLP2	5,3	20,0	14,70	0,14
SLP3	6,0	10,0	4,00	0,14

Apéndice D- Mediciones de pH en muestras de sustrato y sus lixiviados.

Tabla D.1 Mediciones de pH en las muestras de sustrato en los distintos ensayos a través del tiempo.

Muestra	INICIAL					FINAL				
	pH	Promedio	Desviación estándar	Coefficiente de variación (%)	Error Absoluto (±)	pH	Promedio	Desviación estándar	Coefficiente de variación (%)	Error Absoluto (±)
SL1	6,69				0,08	7,27				0,14
SL2	6,84	6,78	0,08	1,17	0,08	7,16	7,29	0,14	1,94	0,14
SL3	6,81				0,08	7,44				0,14
SLP1	6,69				0,13	7,52				0,04
SLP2	6,66	6,75	0,13	1,94	0,13	7,52	7,50	0,04	0,54	0,04
SLP3	6,90				0,13	7,45				0,04
S1	6,18				0,22	5,69				0,08
S2	6,44	6,21	0,22	3,56	0,23	5,53	5,62	0,08	1,46	0,08
S3	6,00				0,21	5,64				0,08
SP1	5,74				0,12	5,19				0,15
SP2	5,80	5,84	0,12	2,14	0,12	5,43	5,37	0,16	2,89	0,16
SP3	5,98				0,13	5,48				0,16
SF1	5,33				0,13	5,79				0,15
SF2	5,42	5,45	0,13	2,42	0,13	5,62	5,64	0,15	2,59	0,15
SF3	5,59				0,14	5,50				0,14
SFP1	4,96				0,12	4,34				0,16
SFP2	5,21	5,08	0,13	2,48	0,13	4,35	4,25	0,16	3,73	0,16
SFP3	5,06				0,13	4,07				0,15

Muestra	INICIAL					FINAL				
	pH	Promedio	Desviación estándar	Coefficiente de variación (%)	Error Absoluto (±)	pH	Promedio	Desviación estándar	Coefficiente de variación (%)	Error Absoluto (±)
SLF1	6,47				0,03	7,12				0,25
SLF2	6,42	6,46	0,03	0,50	0,03	6,65	6,87	0,24	3,44	0,23
SLF3	6,48				0,03	6,84				0,24
SLFP1	6,77				0,06	6,98				0,09
SLFP2	6,69	6,70	0,06	0,91	0,06	7,05	7,07	0,10	1,36	0,10
SLFP3	6,65				0,06	7,17				0,10

Tabla D.2 Mediciones de pH en las muestras de lixiviado de los distintos ensayos a través del tiempo.

Muestra	INICIAL					FINAL				
	pH	Promedio	Desviación estándar	Coefficiente de variación (%)	Error Absoluto (±)	pH	Promedio	Desviación estándar	Coefficiente de variación (%)	Error Absoluto (±)
SL1	7,72				0,19	7,74				0,12
SL2	7,46	7,51	0,19	2,47	0,18	7,50	7,61	0,12	1,59	0,12
SL3	7,36				0,18	7,59				0,12
SLP1	7,45				0,04	7,47				0,04
SLP2	7,52	7,49	0,04	0,48	0,04	7,54	7,52	0,04	0,58	0,04
SLP3	7,50				0,04	7,55				0,04

INICIAL						FINAL				
Muestra	pH	Promedio	Desviación estándar	Coefficiente de variación (%)	Error Absoluto (±)	pH	Promedio	Desviación estándar	Coefficiente de variación (%)	Error Absoluto (±)
S1	5,32	5,33	0,03	0,60	0,03	5,37	5,39	0,03	0,54	0,03
S2	5,37				0,03	5,42				0,03
S3	5,31				0,03	5,37				0,03
SP1	5,95	5,84	0,17	2,93	0,17	5,98	5,86	0,17	2,84	0,17
SP2	5,64				0,17	5,67				0,16
SP3	5,92				0,17	5,93				0,17
SF1	5,53	5,42	0,12	2,13	0,12	5,58	5,46	0,12	2,20	0,12
SF2	5,43				0,12	5,47				0,12
SF3	5,30				0,11	5,34				0,12
SFP1	5,74	5,54	0,19	3,43	0,20	5,73	5,54	0,18	3,25	0,19
SFP2	5,53				0,19	5,53				0,18
SFP3	5,36				0,18	5,37				0,17
SLF1	7,62	7,45	0,15	2,00	0,15	7,66	7,50	0,14	1,87	0,14
SLF2	7,39				0,15	7,44				0,14
SLF3	7,34				0,15	7,40				0,14
SLFP1	7,54	7,47	0,06	0,82	0,06	7,55	7,49	0,06	0,74	0,06
SLFP2	7,46				0,06	7,48				0,06
SLFP3	7,42				0,06	7,44				0,06

Apéndice E- Mediciones de conductividad eléctrica en muestras de sustrato y sus lixiviados.

Tabla E.1 Mediciones de conductividad eléctrica en las muestras de sustrato de los distintos ensayos a través del tiempo.

INICIAL						FINAL				
Muestra	Conductividad eléctrica (mS/cm)	Promedio	Desviación estándar	Coficiente de variación (%)	Error Absoluto (±)	Conductividad eléctrica (mS/cm)	Promedio	Desviación estándar	Coficiente de variación (%)	Error Absoluto (±)
SL1	2,247	2,187	0,130	5,952	0,134	2,013	1,973	0,061	3,095	0,062
SL2	2,038				0,121	2,004				0,062
SL3	2,277				0,136	1,903				0,059
SLP1	1,322	1,266	0,052	4,086	0,054	1,043	1,021	0,019	1,876	0,020
SLP2	1,256				0,051	1,012				0,019
SLP3	1,220				0,050	1,008				0,019
S1	0,022	0,019	0,002	11,658	0,003	0,017	0,014	0,003	19,207	0,003
S2	0,018				0,002	0,012				0,002
S3	0,018				0,002	0,012				0,002
SP1	0,019	0,020	0,001	5,048	0,001	0,010	0,010	0,000	2,002	0,0002
SP2	0,019				0,001	0,009				0,0002
SP3	0,021				0,001	0,010				0,0002
SF1	0,021	0,018	0,002	11,337	0,002	0,017	0,014	0,002	14,552	0,002
SF2	0,017				0,002	0,013				0,002
SF3	0,017				0,002	0,013				0,002

Muestra	INICIAL					FINAL				
	Conductividad eléctrica (mS/cm)	Promedio	Desviación estándar	Coefficiente de variación (%)	Error Absoluto (±)	Conductividad eléctrica (mS/cm)	Promedio	Desviación estándar	Coefficiente de variación (%)	Error Absoluto (±)
SFP1	0,020				0,001	0,010				0,0005
SFP2	0,018	0,019	0,001	4,578	0,001	0,009	0,010	0,0004	4,625	0,0004
SFP3	0,019				0,001	0,010				0,0005
SLF1	1,091				0,107	1,103				0,097
SLF2	1,154	1,187	0,116	9,779	0,113	1,150	1,185	0,104	8,778	0,101
SLF3	1,316				0,129	1,302				0,114
SLFP1	1,207				0,035	1,108				0,004
SLFP2	1,205	1,227	0,036	2,919	0,035	1,101	1,103	0,004	0,395	0,004
SLFP3	1,268				0,037	1,100				0,004

Tabla E2. Mediciones de conductividad eléctrica en las muestras de lixiviados de los distintos ensayos a través del tiempo.

Muestra	INICIAL					FINAL				
	Conductividad eléctrica (mS/cm)	Promedio	Desviación estándar	Coefficiente de variación (%)	Error Absoluto (±)	Conductividad eléctrica (mS/cm)	Promedio	Desviación estándar	Coefficiente de variación (%)	Error Absoluto (±)
SL1	2,247				0,134	2,013				0,062
SL2	2,038	2,187	0,130	5,952	0,121	2,004	1,973	0,061	3,095	0,062
SL3	2,277				0,136	1,903				0,059
Muestra	Conductividad eléctrica	Promedio	Desviación estándar	Coefficiente de	Error Absoluto	Conductividad eléctrica	Promedio	Desviación estándar	Coefficiente de	Error Absoluto

	(mS/cm)			variación (%)	(±)		(mS/cm)			variación (%)	(±)
SLP1	1,322				0,054		1,043				0,020
SLP2	1,256	1,266	0,052	4,086	0,051		1,012	1,021	0,019	1,876	0,019
SLP3	1,220				0,050		1,008				0,019
S1	0,022				0,003		0,017				0,003
S2	0,018	0,019	0,002	11,658	0,002		0,012	0,014	0,003	19,207	0,002
S3	0,018				0,002		0,012				0,002
SP1	0,019				0,001		0,010				0,0002
SP2	0,019	0,020	0,001	5,048	0,001		0,009	0,010	0,000	2,002	0,0002
SP3	0,021				0,001		0,010				0,0002
SF1	0,021				0,002		0,017				0,00246
SF2	0,017	0,018	0,002	11,337	0,002		0,013	0,014	0,002	14,552	0,00191
SF3	0,017				0,002		0,013				0,00195
SFP1	0,020				0,001		0,010				0,00045
SFP2	0,018	0,019	0,001	4,578	0,001		0,009	0,010	0,0004	4,625	0,00042
SFP3	0,019				0,001		0,010				0,00046
SLF1	1,091				0,107		1,103				0,09682
SLF2	1,154	1,187	0,116	9,779	0,113		1,150	1,185	0,104	8,778	0,10094
SLF3	1,316				0,129		1,302				0,11428
SLFP1	1,207				0,035		1,108				0,00438
SLFP2	1,205	1,227	0,036	2,919	0,035		1,101	1,103	0,004	0,395	0,00435
SLFP3	1,268				0,037		1,100				0,00435

Tabla E.3 Ecuaciones utilizadas para el tratamiento de errores (Skoog et al., 2015)

Parámetro	Ecuación
Media de la muestra (x)	$x = \frac{\sum_{i=1}^N xi}{N}$ Donde: Xi: medida individual. N: número de medidas en la muestra
Desviación estándar de la muestra (s)	$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (xi - x)^2}{N - 1}}$
Parámetro	Ecuación
Coeficiente de variación (CV) Desviación porcentual relativa (DPR)	$CV = \frac{s}{x} \times 100$
Error absoluto (EA)	$EA = \frac{xi \times CV}{100}$

Apéndice F- Determinación de la capacidad de intercambio catiónico en muestras de sustrato.

	Muestra	Masa ($\pm 0,0001\text{g}$)	Volumen solución (mL)	FD	Concentración equipo (ppm)	Concentración real (ppm)	CIC (cmol/kg)	Promedio	Desviación estándar	Coficiente de variación	Error Abs.
Inicial	S1	1,5072	50	10	3,283	32,830	4,737	5,278	0,472	8,947	0,424
	S2	1,5072	50	10	3,800	38,000	5,483				0,491
	S3	1,5196	50	10	3,921	39,210	5,612				0,502
Final	S1	1,5200	50	10	3,118	31,180	4,461	4,383	0,136	3,108	0,139
	S2	1,5106	50	10	2,935	29,350	4,226				0,131
	S3	1,5096	50	10	3,097	30,970	4,462				0,139
Inicial	SL1	1,5038	50	10	4,342	43,420	6,280	6,604	0,425	6,431	0,404
	SL2	1,5160	50	10	4,495	44,950	6,449				0,415
	SL3	1,5029	50	10	4,896	48,960	7,085				0,456
Final	SL1	1,5004	50	10	4,881	48,810	7,075	6,739	0,336	4,990	0,353
	SL2	1,5014	50	10	4,420	44,200	6,403				0,319
	SL3	1,5091	50	10	4,676	46,760	6,739				0,336

Apéndice G- Determinación de N_T en las muestras de sustrato y sus lixiviados.

Tabla G1. Determinación de N_T en muestras de sustrato.

Muestra	Peso de muestra ($\pm 0,0001g$)	Volumen de HCl titulación ($\pm 0,02mL$)	Concentración N%
Blanco	-	0,02	-
Blanco	-	0,02	-
Blanco	-	0,02	-
S2 (f)	4,0056	0,00	ND
S2 (i)	4,0050	1,40	0,0060
SP3 (f)	4,0051	0,00	ND
SP3 (i)	4,0056	1,26	0,0054
SL3 (f)	4,0056	2,42	0,0105
SL3 (i)	4,0058	1,66	0,0072
SLP1 (f)	4,0054	2,68	0,0116
SLP1 (i)	4,0050	2,80	0,0121
SLF2 (f)	4,0051	3,02	0,0131
SLF2 (i)	4,0052	1,30	0,0056
SF1 (f)	4,0054	2,86	0,0124
SF1 (i)	4,0052	3,40	0,0148
SLFP1 (f)	4,0053	2,42	0,0105
SLFP1 (i)	4,0056	2,08	0,0090
SLFP2 (f)	4,0051	2,06	0,0089
SLFP2 (i)	4,0051	1,36	0,0059
SLFP3 (f)	4,0065	2,64	0,0114
SLFP3 (i)	4,0053	2,10	0,0091
SFP1 (f)	4,0055	0,00	ND
SFP1 (i)	4,0052	3,42	0,0149
SFP2 (f)	4,0050	0,26	0,0010
SFP2 (i)	4,0055	2,48	0,0107
SFP3 (f)	4,0059	0,2	0,0008
SFP3 (i)	4,0059	2,98	0,0129

Concentración de HCl 0,0125M

ND: no detectado

(f): muestra al final del experimento

(i): muestra al inicio del experimento

Tabla G2. Determinación de N_T en muestras de lixiviado.

Muestra	Volumen de HCl titulación (±0,02mL)	Concentración N (mol/L)	Concentración N (ppm)	Concentración N%
Blanco	0,20	-	-	-
Blanco	0,20	-	-	-
Blanco	0,20	-	-	-
S2 (f)	0,20	0,0000	0,0000	0,0000
S2 (i)	1,00	0,0004	5,6004	0,0006
SP3 (f)	0,10	ND	ND	ND
SP3 (i)	0,70	0,0003	3,5003	0,0004
SL3 (f)	0,30	0,0001	0,7001	0,0001
SL3 (i)	3,00	0,0014	19,6014	0,0020
SLP1 (f)	0,10	ND	ND	ND
SLP1 (i)	0,50	0,0002	2,1002	0,0002
SLF2 (f)	0,30	0,0001	0,7001	0,0001
SLF2 (i)	6,40	0,0031	43,4031	0,0043
SF1 (f)	3,60	0,0017	23,8017	0,0024
SF1 (i)	31,40	0,0156	218,4156	0,0218
SLFP1 (f)	0,20	0,0000	0,0000	0,0000
SLFP1 (i)	7,50	0,0037	51,1037	0,0051
SLFP2 (f)	0,20	0,0000	0,0000	0,0000
SLFP2 (i)	7,60	0,0037	51,8037	0,0052
SLFP3 (f)	0,20	0,0000	0,0000	0,0000
SLFP3 (i)	7,50	0,0037	51,1037	0,0051
SFP1 (f)	1,90	0,0009	11,9009	0,0012
SFP1 (i)	21,90	0,0109	151,9109	0,0152
SFP2 (f)	2,10	0,0010	13,3010	0,0013
SFP2 (i)	32,00	0,0159	222,6159	0,0223
SFP3 (f)	2,00	0,0009	12,6009	0,0013
SFP3 (i)	38,80	0,0193	270,2193	0,0270

Tabla G3. Determinación de N_T en un patrón certificado control LECO y fertilizante N-P-K.

Muestra	Peso de muestra (±0,0001g)	Volumen HCl titulación (±0,02mL)	Concentración N%
Fertilizante5	0,5360	8,00	0,2605
Fertilizante6	0,5370	8,30	0,2698
Control LECO	0,5061	7,16	0,2469

Valor teórico %N Control LECO: 0,233±0,013

Valor teórico %N Fertilizante: ~15%

Tabla G4. Evaluación de la repetitividad del método.

Muestra	Volumen HCl (±0,02mL)	Peso de muestra (±0,0001g)	%N
SLF2 (f)	3,02	4,0051	0,0131
	3,00	4,0051	0,0130
	3,04	4,0051	0,0132
Promedio			0,0131
Desviación estándar			0,0001

Tabla G5. Evaluación de la reproducibilidad del método.

Muestra	Volumen HCl (±0,02mL)	Peso de muestra (±0,0001g)	%N
SLFP1 f	2,42	4,0053	0,0105
SLFP2 f	2,06	4,0051	0,0089
SLFP3 f	2,64	4,0065	0,0114
Promedio			0,0103
Desviación estándar			0,0013
CV			12,6214%

Tabla G6. Evaluación de la exactitud del método.

Patrón LECO %N	Valor obtenido	Error Absoluto	Error Relativo	Error Porcentual
0,233 ±0,013	0,2469	0,0139	0,0597	5,9657

Tabla G7. Ecuaciones empleadas para los cálculos de %N.

Análisis químico	Ecuación
Determinación de N total mediante el método Kjeldahl.	$\%N = (V_{HCl} - V_{B_{HCl}}) \times C_{HCl} \times \frac{1,4}{P_m}$ Donde: %N: porcentaje de nitrógeno en la muestra. V_{HCl}: Volumen de ácido usado en la titulación. V_{B_{HCl}}: Volumen de ácido usado en la titulación del blanco. C_{HCl}: concentración del ácido. P_m: peso de la muestra.

Análisis químico	Ecuación
Determinación de N total en solución por destilación y titulación ácido-base	$M_b \times V_b = M_a \times V_a$ Donde: M_b: concentración molar de la base V_b: volumen de la base a titular M_a: concentración molar del ácido V_a: volumen usado de ácido como titulante

Tabla G8. Ecuaciones empleadas en la evaluación de calidad del método.

Parámetro	Ecuación
Media de la muestra (x)	$x = \frac{\sum_{i=1}^N xi}{N}$ Donde: Xi: medida individual. N: número de medidas en la muestra
Desviación estándar de la muestra (s)	$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (xi - x)^2}{N - 1}}$
Coeficiente de Variación (CV)	$CV = \frac{s}{x} \times 100$
Error absoluto (EA)	$EA = V_{real} - V_{experimental}$ Donde: V: valor real o experimental
Error relativo (ER)	$ER = \frac{(V_{real} - V_{experimental})}{V_{real}}$
Error porcentual (%E)	$\%E = ER \times 100$

Apéndice H. Determinación de P_T en muestras de sustrato y sus lixiviados.

Tabla H1. Datos para la elaboración de la curva de calibración N°1 de P_T .

Patrón	P (mg/L)	Absorbancia
Blanco	0	-0,002
1	0,1	0,058
2	0,2	0,156
3	0,4	0,238
4	0,6	0,402
5	0,8	0,621
6	1	0,757

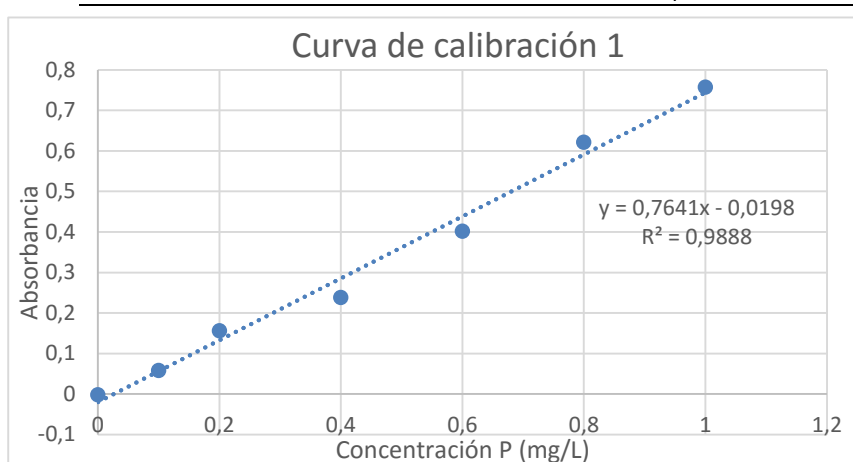


Gráfico H1. Curva de calibración N°1

Sensibilidad de calibrado (S)	Mínima señal analítica distinguible (S_m)	Concentración mínima detectable (C_m) (mg/L)	Límite de detección (LD) (mg/L)	Límite de cuantificación (LC) (mg/L)
0,8	0,001	0	0	0,06

Tabla H2. Parámetros de calidad del método para la curva N°1.

Tabla H3. Datos para la elaboración de la curva de calibración N° 2.

Patrón	P (mg/L)	Absorbancia
Blanco	0	-0,002
1	0,1	0,080
2	0,2	0,148
3	0,4	0,265
4	0,6	0,407
5	0,8	0,552

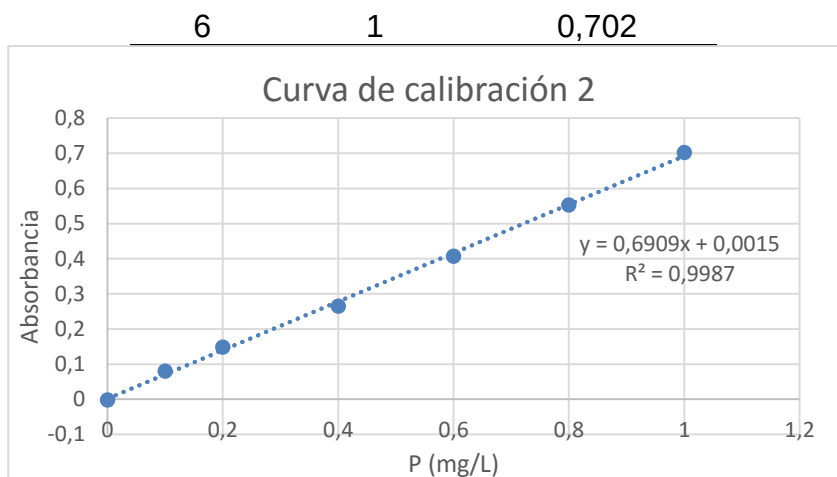


Gráfico H2. Curva de calibración N°2

Tabla H4. Parámetros de calidad del método para la curva N°2.

Sensibilidad de calibrado (S)	Mínima señal analítica distinguible (Sm)	Concentración mínima detectable (Cm) (mg/L)	Límite de detección (LD) (mg/L)	Límite de cuantificación (LC) (mg/L)
0,7	0,08	0,1	0,1	0,05

Tabla H5. Datos para la elaboración de la curva de calibración N°3

Patrón	P (mg/L)	Absorbancia
Blanco	0	-0,002
1	0,1	0,059
2	0,2	0,142
3	0,4	0,283
4	0,6	0,445
5	0,8	0,581
6	1	0,758

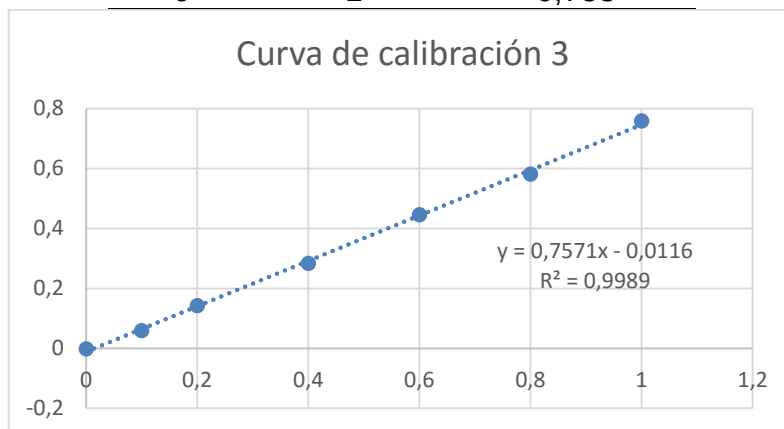


Gráfico H3. Curva de calibración N°3.

Tabla H6. Parámetros de calidad del método para la curva N°3.

Sensibilidad de calibrado (S)	Mínima señal analítica distinguible (Sm)	Concentración mínima detectable(Cm) (mg/L)	Límite de detección (LD) (mg/L)	Límite de cuantificación (LC) (mg/L)
0,8	0,01	0,005	0,005	0,1

Tabla H7. Ecuaciones utilizadas para evaluar la calidad del método. Skoog

Parámetro	Ecuación
Sensibilidad de calibrado (S)	$S = m$ Donde: m: pendiente de la curva de calibración
Mínima señal analítica distinguible (Sm)	$S_m = \overline{Sbl} + k sbl$ Donde: $\overline{Sbl}$: señal media del blanco sbl: desviación estándar de la señal del blanco k: constante
Concentración mínima distinguible (Cm)	$C_m = \frac{S_m - \overline{Sbl}}{m}$ Donde: C_m= LD (límite de detección)
Límite de cuantificación (LC)	$LC = \overline{bl} \times 10(s[bl])$ Donde: $\overline{bl}$: promedio de la concentración del blanco $s[bl]$: desviación estándar de la concentración

et al., 2001

Tabla H8. Determinación de P_T en muestras de sustrato.

Muestra	Peso de muestra ($\pm 0,001g$)	Volumen (mL)	FD	Absorbancia	Concentración diluida (ppm)	Concentración real (ppm)	Concentración P en la muestra (% m/m)	Ecuación de la recta curva de calibración
Blanco	*	250	2	0,010	0,029	0,057	-	$y = 0,7571x - 0,0116$
Blanco	*	250	2	0,008	0,026	0,052	-	$y = 0,7571x - 0,0116$
Blanco	*	250	2	0,008	0,026	0,052	-	$y = 0,7571x - 0,0116$
S2 (f)	0,536	200	2	0,079	0,129	0,259	0,0096	$y = 0,7641x - 0,0198$
S2 (i)	0,539	200	2	0,081	0,132	0,264	0,0098	$y = 0,7641x - 0,0198$
SP3 (f)	0,532	200	2	0,084	0,136	0,272	0,0102	$y = 0,7641x - 0,0198$
SP3 (i)	0,535	200	2	0,080	0,131	0,261	0,0098	$y = 0,7641x - 0,0198$
SL3 (f)	0,538	200	2	0,084	0,136	0,272	0,0101	$y = 0,7641x - 0,0198$
SL3 (i)	0,535	200	2	0,074	0,123	0,246	0,0092	$y = 0,7641x - 0,0198$
SLP1 (f)	0,534	200	2	0,023	0,056	0,112	0,0042	$y = 0,7641x - 0,0198$
SLP1 (i)	0,534	200	2	0,017	0,048	0,096	0,0036	$y = 0,7641x - 0,0198$
SLF2 (f)	0,531	200	2	0,243	0,344	0,688	0,0259	$y = 0,7641x - 0,0198$
SLF2 (i)	0,536	200	2	0,159	0,234	0,468	0,0175	$y = 0,7641x - 0,0198$
SF1 (f)	0,538	200	2	0,161	0,237	0,473	0,0176	$y = 0,7641x - 0,0198$
SF1 (i)	0,530	200	2	0,119	0,182	0,363	0,0137	$y = 0,7641x - 0,0198$
SLFP1 (f)	0,533	200	2	0,272	0,382	0,764	0,0287	$y = 0,7641x - 0,0198$
SLFP1 (i)	0,533	200	2	0,203	0,292	0,583	0,0219	$y = 0,7641x - 0,0198$
SLFP2 (f)	0,538	200	2	0,261	0,367	0,735	0,0273	$y = 0,7641x - 0,0198$
SLFP2 (i)	0,534	200	2	0,101	0,158	0,316	0,0118	$y = 0,7641x - 0,0198$

Muestra	Peso de muestra ($\pm 0,001\text{g}$)	Volumen (mL)	FD	Absorbancia	Concentración diluida (ppm)	Concentración real (ppm)	Concentración P en la muestra (% m/m)	Ecuación de la recta curva de calibración
SLFP3 (f)	0,532	200	2	0,249	0,352	0,704	0,0265	$y = 0,7641x - 0,0198$
SLFP3 (i)	0,531	200	2	0,274	0,385	0,769	0,0290	$y = 0,7641x - 0,0198$
SFP1 (f)	0,535	200	2	0,180	0,261	0,523	0,0196	$y = 0,7641x - 0,0198$
SFP1 (i)	0,532	200	2	0,122	0,186	0,371	0,0140	$y = 0,7641x - 0,0198$
SFP2 (f)	0,536	200	2	0,153	0,226	0,452	0,0169	$y = 0,7641x - 0,0198$
SFP2 (i)	0,537	200	2	0,143	0,213	0,426	0,0159	$y = 0,7641x - 0,0198$
SFP3 (f)	0,534	200	2	0,155	0,229	0,458	0,0171	$y = 0,7641x - 0,0198$
SFP3 (i)	0,532	200	2	0,150	0,222	0,444	0,0167	$y = 0,7641x - 0,0198$

(f): muestra al finalizar el experimento

(i): muestra al inicio del experimento

Tabla H9. Determinación de P_T en muestras de lixiviados.

Muestra	FD	Absorbancia	Concentración diluida (ppm) corregida	Concentración real (ppm)	Concentración %P	Ecuación de la recta curva de calibración
Blanco	2	0,002	0,018	0,036	0,000004	$y = 0,6909x + 0,0015$
Blanco	2	0,001	0,017	0,033	0,000003	$y = 0,6909x + 0,0015$
S2 (f)	1,67	-	-	-	-	$y = 0,7571x - 0,0116$
S2 (i)	1,67	-	-	-	-	$y = 0,7571x - 0,0116$
SP3 (f)	1,67	-	-	-	-	$y = 0,7571x - 0,0116$
SP3 (i)	1,67	-	-	-	-	$y = 0,7571x - 0,0116$
SL3 (f)	1,67	-	-	-	-	$y = 0,7571x - 0,0116$
SL3 (i)	1,67	-	-	-	-	$y = 0,7571x - 0,0116$
SLP1 (f)	1,67	-	-	-	-	$y = 0,7571x - 0,0116$
SLP1 (i)	1,67	-	-	-	-	$y = 0,7571x - 0,0116$
SLF2 (f)	4,76	0,274	0,377	1,796	0,0002	$y = 0,6909x + 0,0015$
SLF2 (i)	1,67	-	-	-	-	$y = 0,7571x - 0,0116$
SF1 (f)	25,00	0,807	1,081	27,031	0,0027	$y = 0,7571x - 0,0116$
SF1 (i)	25	0,629	0,8461	21,153	0,0021	$y = 0,7571x - 0,0116$
SLFP1 (f)	2,5	0,198	0,284	0,711	0,0001	$y = 0,6909x + 0,0015$
SLFP1 (i)	1,67	-	-	-	-	$y = 0,7571x - 0,0116$
SLFP2 (f)	2,44	0,174	0,250	1,189	0,0001	$y = 0,6909x + 0,0015$
SLFP2 (i)	1,67	-	-	-	-	$y = 0,7571x - 0,0116$

Muestra	FD	Absorbancia	Concentración diluida (ppm) corregida	Concentración real (ppm)	Concentración %P	Ecuación de la recta curva de calibración
SLFP3 (f)	2,44	0,105	0,150	0,365	0,00004	$y = 0,6909x + 0,0015$
SLFP3 (i)	1,67	**	*	*	*	$y = 0,7571x - 0,0116$
SFP1 (f)	50	0,503	0,680	33,985	0,0034	$y = 0,7571x - 0,0116$
SFP1 (i)	10	0,480	0,649	6,493	0,0006	$y = 0,7571x - 0,0116$
SFP2 (f)	25	0,820	1,098	27,460	0,0027	$y = 0,7571x - 0,0116$
SFP2 (i)	25	0,373	0,508	12,700	0,0013	$y = 0,7571x - 0,0116$
SFP3 (f)	25	0,895	1,197	29,937	0,0030	$y = 0,7571x - 0,0116$
SFP3 (i)	50	0,571	0,770	38,476	0,0038	$y = 0,7571x - 0,0116$

Tabla H10.Determinación de P_T en un patrón certificado MCAF lote7b-3 y fertilizante N-P-K.

Muestra	Peso de muestra ($\pm 0,001g$)	Volumen (mL)	FD	Absorbancia	Concentración diluida (ppm)	Concentración real (ppm)	Concentración P en la muestra (% m/m)	Ecuación de la recta curva de calibración
MCAF lote7b-3	0,535	250	2	0,417	0,566	1,132	0,0529	$y = 0,7571x - 0,0116$
Fertilizante	0,536	1000	100	0,651	0,878	87,790	16,3786	$y = 0,7641x - 0,0198$
Fertilizante	0,537	1000	100	0,687	0,925	92,501	17,2255	$y = 0,7641x - 0,0198$
MCAF lote7b-3	0,533	250	2	0,447	0,611	1,222	0,0573	$y = 0,7641x - 0,0198$

Valor teórico %P MCAF: $0,021 \pm 0,1$ *único patrón disponible al momento de realizar los análisis*

Valor teórico %P fertilizante: aprox. 15%

Tabla H11. Evaluación de la repetitividad del método.

Muestra	Concentración P(ppm)	Masa muestra ($\pm 0,001$)	Concentración %P
SLF2 f	0,688	0,531	0,0259
	0,690	0,531	0,0260
	0,688	0,531	0,0259
Promedio			0,0259
Desviación estándar			0,00004

Tabla H12. Evaluación de la reproducibilidad del método.

Muestra	Concentración P(ppm)	Masa muestra ($\pm 0,001$)	Concentración %P
SLFP1 f	0,764	0,533	0,0287
SLFP2 f	0,735	0,538	0,0273
SLFP3 f	0,704	0,532	0,0265
Promedio			0,0275
Desviación estándar			0,0011
CV			4,0000%

Tabla H13. Evaluación de la exactitud del método.

Patrón MCAF lote7b-3 %P		Valor obtenido	Error Absoluto	Error Relativo	Error Porcentual
0,021	$\pm 0,1$	0,053	0,032	1,560	156,039*
		0,057	0,036	1,754	175,362*

*los valores se deben a que el valor real posee un límite de confianza de mayor magnitud al mismo.

Tabla H14. Ecuaciones empleadas en la evaluación de calidad del método.

Parámetro	Ecuación	
Media de la muestra ($\bar{x}$)	$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^N x_i}{N}$	
	Donde: Xi: medida individual. N: número de medidas en la muestra	
Desviación estándar de la muestra (s)	$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2}{N - 1}}$	
Coeficiente de variación (CV)	$CV = \frac{s}{\bar{x}} \times 100$	
Error absoluto (EA)	$EA = V_{real} - V_{experimental}$	
	Donde: V: valor real o experimental	
Error relativo (ER)	$ER = \frac{(V_{real} - V_{experimental})}{V_{real}}$	
Error porcentual (%E)	$\%E = ER \times 100$	Tabl a

H15. Ecuaciones empleadas para los cálculos de %P. Skoog et al. (2001).

Análisis	Ecuación
Determinación de P_T mediante la absorción molecular en el espectro UV y visible	$y = mx + b$ Donde: y: absorbancia m: pendiente de la curva de calibración x: concentración del analito en la dilución b: punto de intersección con el eje de coordenadas

Análisis	Ecuación
Determinación de P_T mediante la absorción molecular en el espectro UV y visible	$C_x = \frac{C_{xD} \times V_D}{V_A}$ Donde: C_x: concentración del analito en la solución original (mg/L) C_{xD}: concentración del analito en la dilución (mg/L) V_D/V_A: Vol de dilución/ Vol alícuota (factor de dilución (FD))
	$\%P = \frac{C_X \times V}{\frac{M_m}{10000}}$ Donde: C_x: concentración del analito en la solución original. V: volumen de la solución M_m: masa de la muestra.

Apéndice I. Determinación de K_T en muestras de sustrato y sus lixiviados.

Tabla I1. Datos para la elaboración de la curva de calibración N°1 de K_T .

Patrón	K (mg/L)	Intensidad
1	0,5	5331
2	1	8641
3	2	14897
4	4	26820
5	5	32011

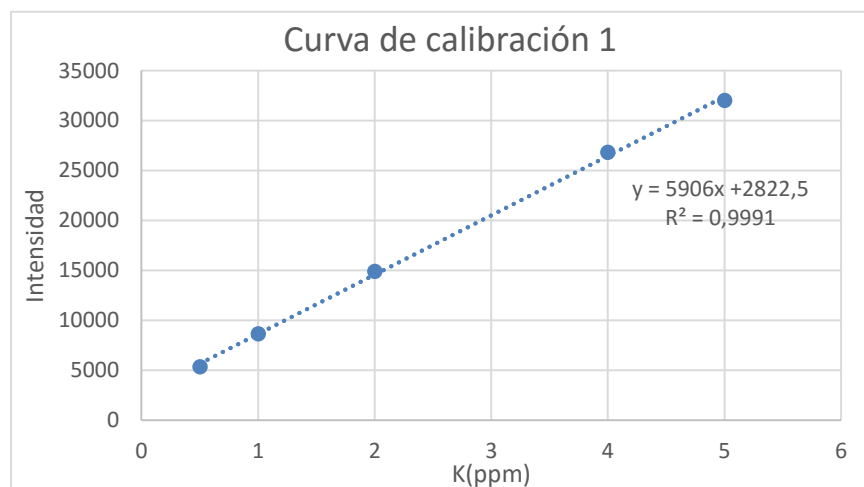


Gráfico I1. Curva de calibración N°1

Tabla I2. Parámetros de calidad del método para la curva N°1

Sensibilidad de calibrado (S)	Mínima señal analítica distinguible (Sm)	Concentración mínima detectable(Cm) (mg/L)	Límite de detección (LD) (mg/L)	Límite de cuantificación (LC) (mg/L)
5906	2463	0,11	0,11	0,2

Tabla I3. Datos para la elaboración de la curva de calibración N°2 de K_T

Patrón	K (mg/L)	Intensidad
1	0,5	5482
2	1	8760
3	2	15010
4	4	26820
5	5	32011

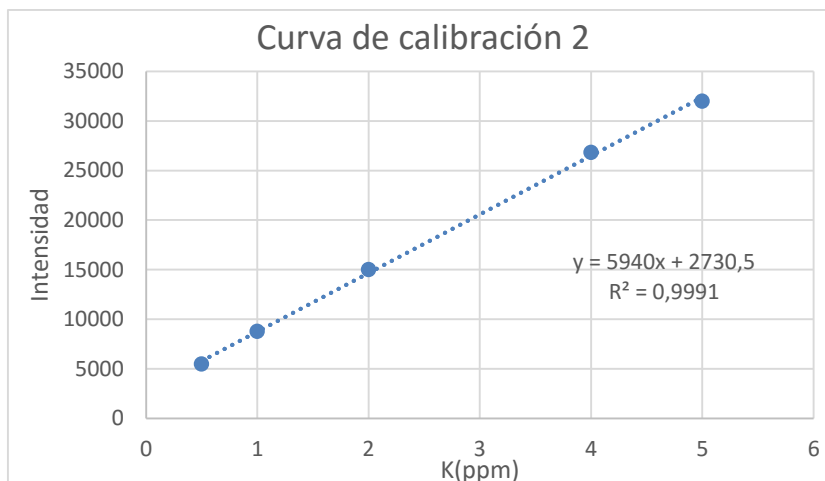


Gráfico I2. Curva de calibración N°2.

Tabla I4. Parámetros de calidad del método para la curva N°2.

Sensibilidad de calibrado (S)	Mínima señal analítica distinguible (Sm)	Concentración mínima detectable(Cm) (mg/L)	Límite de detección (LD) (mg/L)	Límite de cuantificación (LC) (mg/L)
5940	2631	0,20	0,2	0,4

Tabla I5. Datos para la elaboración de la curva de calibración N°3 de K_T

Patrón	K (mg/L)	Intensidad
1	0,5	3732
2	1	6415
3	2	12137
4	4	24811
5	5	30939

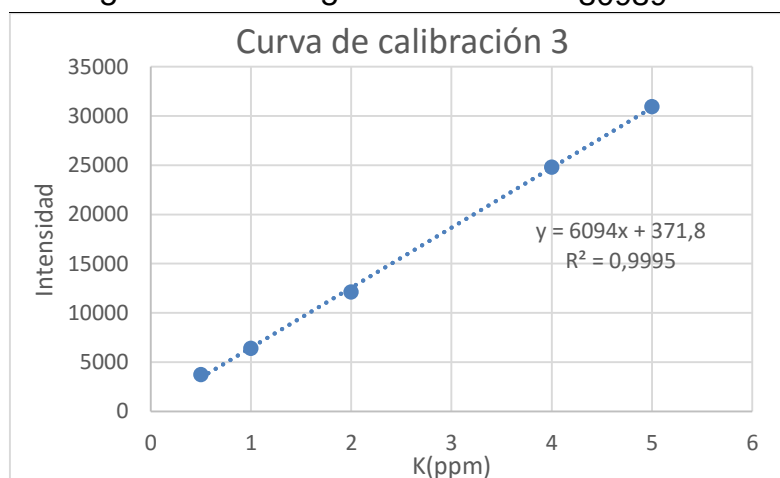


Gráfico I3. Curva de calibración N°3

Tabla I6. Parámetros de calidad del método para la curva N°3.

Sensibilidad de calibrado (S)	Mínima señal analítica distinguible (Sm)	Concentración mínima detectable(Cm) (mg/L)	Límite de detección (LD) (mg/L)	Límite de cuantificación (LC) (mg/L)
6094	-202	0	0	0

Tabla I7. Datos para la elaboración de la curva de calibración N°4 de K_T

Patrón	K (mg/L)	Intensidad
1	0,5	3917
2	1	6968
3	2	12850
4	4	25592
5	5	32162

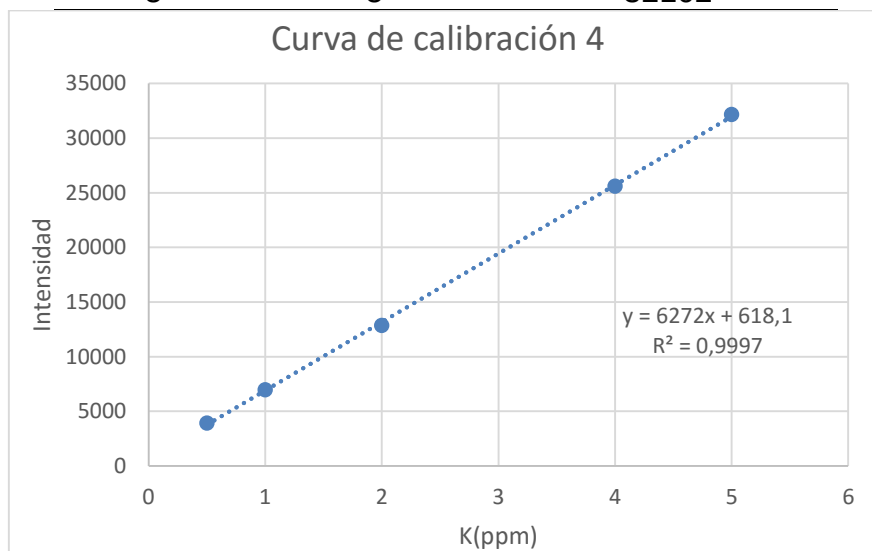


Gráfico I4. Curva de calibración N°4

Tabla I8. Parámetros de calidad del método para la curva N°4.

Sensibilidad de calibrado (S)	Mínima señal analítica distinguible (Sm)	Concentración mínima detectable(Cm) (mg/L)	Límite de detección (LD) (mg/L)	Límite de cuantificación (LC) (mg/L)
6272	-107	0	0	0

Tabla I9. Ecuaciones utilizadas para evaluar la calidad del método. Skoog et

Parámetro	Ecuación
Sensibilidad de calibrado (S)	$S = m$ Donde: m: pendiente de la curva de calibración
Mínima señal analítica distinguible (Sm)	$S_m = \overline{Sbl} + k sbl$ Donde: $\overline{Sbl}$: señal media del blanco sbl: desviación estándar de la señal del blanco k: constante
Concentración mínima distinguible (Cm)	$C_m = \frac{S_m - \overline{Sbl}}{m}$ Donde: C_m= LD (límite de detección)
Límite de cuantificación (LC)	$LC = [\overline{bl}] \times 10(s[bl])$ Donde: $[\overline{bl}]$: promedio de la concentración del blanco $s[bl]$: desviación estándar de la concentración

al., 2001

Tabla I10. Determinación de K_T en muestras de sustrato.

Muestra	Peso de muestra ($\pm 0,001g$)	Volumen (mL)	FD	Concentración diluida (ppm) equipo	Concentración real (ppm)	Concentración K en la muestra (% m/m)	Ecuación de la recta del equipo
Blanco	-	250	1	-0,197	-0,197	-	$y=5906x+2822,5$
Blanco	-	250	1	-0,173	-0,173	-	$y=5906x+2822,5$
Blanco	-	250	1	-0,128	-0,128	-	$y=5906x+2822,5$
S2 (f)	0,536	200	1	3,067	3,067	0,114	$y=5906x+2822,5$
S2 (i)	0,539	200	1	2,897	2,897	0,107	$y=5906x+2822,5$
SP3 (f)	0,532	200	1	3,203	3,203	0,120	$y=5906x+2822,5$
SP3 (i)	0,535	200	1	3,263	3,263	0,122	$y=5906x+2822,5$
SL3 (f)	0,538	200	1	3,011	3,011	0,112	$y=5906x+2822,5$
SL3 (i)	0,535	200	1	2,751	2,751	0,103	$y=5906x+2822,5$
SLP1 (f)	0,534	200	1	3,375	3,375	0,126	$y=5906x+2822,5$
SLP1 (i)	0,534	200	1	3,234	3,234	0,121	$y=5906x+2822,5$
SLF2 (f)	0,531	200	1	3,575	3,575	0,135	$y=5906x+2822,5$
SLF2 (i)	0,536	200	1	3,728	3,728	0,139	$y=5906x+2822,5$
SF1 (f)	0,538	200	1	3,362	3,362	0,125	$y=5906x+2822,5$
SF1 (i)	0,530	200	1	3,514	3,514	0,133	$y=5906x+2822,5$
SLFP1 (f)	0,533	200	1	3,598	3,598	0,135	$y=5906x+2822,5$
SLFP1 (i)	0,533	200	1	3,851	3,851	0,145	$y=5906x+2822,5$
SLFP2 (f)	0,538	200	1	3,844	3,844	0,143	$y=5906x+2822,5$
SLFP2 (i)	0,534	200	1	3,574	3,574	0,134	$y=5906x+2822,5$
SLFP3 (f)	0,532	200	1	3,768	3,768	0,142	$y=5906x+2822,5$
SLFP3 (i)	0,531	200	1	3,846	3,846	0,145	$y=5906x+2822,5$

Muestra	Peso de muestra ($\pm 0,001\text{g}$)	Volumen (mL)	FD	Concentración diluida (ppm) equipo	Concentración real (ppm)	Concentración K en la muestra (% m/m)	Ecuación de la recta del equipo
SFP1 (f)	0,535	200	1	3,370	3,370	0,126	$y=5906x+2822,5$
SFP1 (i)	0,532	200	1	3,513	3,513	0,132	$y=5906x+2822,5$
SFP2 (f)	0,536	200	1	3,221	3,221	0,120	$y=5906x+2822,5$
SFP2 (i)	0,537	200	1	3,51	3,510	0,131	$y=5906x+2822,5$
SFP3 (f)	0,534	200	1	3,246	3,246	0,122	$y=5906x+2822,5$
SFP3 (i)	0,532	200	1	3,42	3,420	0,129	$y=5906x+2822,5$
Blanco	-	200	1	-0,284	-0,284	-	$y=5940x+2730,5$
Blanco	-	200	1	-0,188	-0,188	-	$y=5940x+2730,5$

(f): muestras tomadas al final del experimento

(i): muestras tomadas al inicio del experimento

Tabla I11. Determinación de K_T en muestras de lixiviados.

Muestra	FD	Concentración diluida (ppm) equipo	Concentración real (ppm)	Concentración %K	Ecuación de la recta del equipo
Blanco	1	-0,112	-0,112	0,0000	$y=6094x+371,8$
Blanco	1	-0,123	-0,123	0,0000	$y=6094x+371,8$
S2 (f)	2	4,652	9,304	0,0009	$y=5940x+2730,5$
S2 (i)	10	2,083	20,830	0,0021	$y=5940x+2730,5$
SP3 (f)	1	0,697	0,697	0,0001	$y=5906x+2822,5$
SP3 (i)	10	1,870	18,700	0,0019	$y=5940x+2730,5$
SL3 (f)	2	1,789	3,578	0,0004	$y=5940x+2730,5$
SL3 (i)	100	3,079	307,900	0,0308	$y=6272x+618,1$
SLP1 (f)	2	2,971	5,942	0,0006	$y=5940x+2730,5$
SLP1 (i)	100	3,237	323,700	0,0324	$y=6272x+618,1$
SLF2 (f)	20	2,105	42,100	0,0042	$y=6094x+371,8$
SLF2 (i)	100	4,490	449,000	0,0449	$y=6272x+618,1$
SF1 (f)	20	3,513	70,260	0,0070	$y=6094x+371,8$
SF1 (i)	100	3,525	352,500	0,0353	$y=6272x+618,1$
SLFP1 (f)	20	3,342	66,840	0,0067	$y=6094x+371,8$
SLFP1 (i)	100	4,576	457,600	0,0458	$y=6272x+618,1$
SLFP2 (f)	20	2,882	57,640	0,0058	$y=6094x+371,8$
SLFP2 (i)	100	4,07	407,000	0,0407	$y=6272x+618,1$
SLFP3 (f)	20	3,143	62,860	0,0063	$y=6094x+371,8$
SLFP3 (i)	100	4,397	439,700	0,0440	$y=6272x+618,1$
SFP1 (f)	20	4,543	90,860	0,0091	$y=6094x+371,8$
SFP1 (i)	50	5,045	252,250	0,0252	$y=6094x+371,8$
SFP2 (f)	20	4,552	91,040	0,0091	$y=6094x+371,8$
SFP2 (i)	100	3,441	344,100	0,0344	$y=6272x+618,1$
SFP3 (f)	40	3,557	142,280	0,0142	$y=6272x+618,1$
SFP3 (i)	100	4,249	424,900	0,0425	$y=6272x+618,1$
Blanco	1	-0,127	-0,127	0,0000	$y=6272x+618,1$
Blanco	1	-0,134	-0,134	0,0000	$y=6272x+618,1$

(f) muestras tomadas al final del experimento

(i) muestras tomadas al inicio del experimento

Tabla I12. Determinación de K_T en un patrón certificado MCAF lote7b-3 y fertilizante N-P-K.

Muestra	Peso de muestra ($\pm 0,001g$)	Volumen (mL)	FD	Intensidad	Concentración diluida (ppm)	Concentración real (ppm)	Concentración P en la muestra (% m/m)	Ecuación de la recta curva de calibración
MCAF lote7b-3	0,535	250	10	22713	3,364	33,640	1,572	$y=5940x+2730,5$
Fertilizante	0,536	1000	20	27143	4,393	87,860	16,392	$y=6094x+371,8$
Fertilizante	0,537	1000	20	28776	4,661	93,220	17,359	$y=6094x+371,8$
MCAF lote7b-3	0,533	250	10	22089	3,259	32,590	1,529	$y=5940x+2730,5$

Valor teórico %K MCAF: $1,586 \pm 0,04$

Valor teórico %P fertilizante: aprox. 15%

Tabla I13. Evaluación de la repetitividad del método.

Muestra	Concentración K(mg/L)	Masa muestra ($\pm 0,001$)	Concentración %K
SLF2 f	3,555	0,531	0,134
	3,494	0,531	0,132
	3,526	0,531	0,133
Promedio			0,133
Desviación estándar			0,001

Tabla I14. Evaluación de la reproducibilidad del método.

Muestra	Concentración K(mg/L)	Masa muestra (±0,001)	Concentración %K
SLFP1 f	3,598	0,533	0,135
SLFP2 f	3,844	0,538	0,143
SLFP3 f	3,768	0,532	0,142
Promedio			0,140
Desviación estándar			0,004
CV			2,8571%

Tabla I15. Evaluación de la exactitud del método.

Patrón MCAF lote7b-3 %K	Valor obtenido	Error Absoluto	Error Relativo	Error Porcentual
1,59	±0,04	1,571	0,015	0,009
		1,528	0,058	0,037

Tabla I16. Ecuaciones empleadas en la evaluación de calidad del método.

Parámetro	Ecuación
Media de la muestra (x)	$x = \frac{\sum_{i=1}^N xi}{N}$ Donde: Xi: medida individual. N: número de medidas en la muestra
Desviación estándar de la muestra (s)	$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (xi - x)^2}{N - 1}}$
Coeficiente de Variación (CV)	$CV = \frac{s}{x} \times 100$
Error absoluto (EA)	$EA = V_{real} - V_{experimental}$ Donde: V: valor real o experimental

Parámetro	Ecuación
Error relativo (ER)	$ER = \frac{(V_{real} - V_{experimental})}{V_{real}}$
Error porcentual (%E)	$\%E = ER \times 100$

Tabla H17. Ecuaciones empleadas para los cálculos de %P. Skoog et al. (2001).

Análisis	Ecuación
Determinación de K_T mediante la técnica de emisión atómica	$y = mx + b$ Donde: y: absorbancia m: pendiente de la curva de calibración x: concentración del analito en la dilución b: punto de intersección con el eje de coordenadas
	$C_x = \frac{C_{xD} \times V_D}{V_A}$ Donde: C_x: concentración del analito en la solución original (mg/L) C_{xD}: concentración del analito en la dilución (mg/L) V_D/V_A: Vol de dilución/ Vol alícuota (factor de dilución (FD))
	$\%K = \frac{C_x \times V}{M_m} / 10000$ Donde: C_x: concentración del analito en la solución original (mg/L) V: volumen de la solución M_m: masa de la muestra.

