

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



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 presentado ante la Ilustre Universidad Central de Venezuela por la **Br. Dubraska Patricia González Comunian** como requisito para aprobar la asignatura Proyecto Geoquímico II y optar al título de Licenciada en Geoquímica.

Caracas, Octubre de 2015

ACTA

Los abajo firmantes, designados por la Universidad Central de Venezuela, como integrantes del Jurado examinador del Trabajo Especial de Grado titulado: “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)” presentado por la Br. Dubraska Patricia González Comunian, 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. Salvador Lo Mónaco

Jurado

DEDICATORIA

*Al más más de todos los hombres,
más lindo, más amoroso, más
valiente, más dedicado, más
trabajador, más inteligente.
Mi Papá, mi héroe, mi amigo y
ahora mi ángel guardián que
desde el cielo me cuida.*

AGRADECIMIENTOS

Con Dios de mi lado todo lo puedo, sin Él nada. Te doy las gracias Diosito por cada día de vida que me has regalado, por los lugares que he conocido y por cada una de las personas que han formado parte de este inesperado pero hermoso camino.

No existen suficientes palabras para agradecer a mi mamá: mi cómplice, mejor amiga, valiente, hermosa, paciente, sin pelos en la lengua, de voluntad inquebrantable, y mi papá: mi compañero de aventuras, arregla todo, calmado, metódico; siempre dispuesto a ayudar; les doy las gracias a los dos por regalarme su amor incondicional y sincero, por ser mis fans número uno, apoyándome en todo momento y haciendo todo lo que estaba en sus manos para hacerme feliz, son las personas de corazón más noble que conozco y agradezco sobre todo el ejemplo que me han dado y los valores que me inculcaron. Gracias por el mejor regalo de todos, Alonso, Andrés y Adrián, mis hermanos, con ustedes aprendí el significado de la palabra compartir, también que fastidiar a alguien es una manera de demostrar cariño, han llenado mi vida de alegría y diversión con sus ocurrencias. Los amo a los cinco, son mi punto de apoyo, mi hogar, a donde voy siempre los llevo en mi corazón.

Quiero dar las gracias a mi abuela, mi nonna, mi tía Sandra, mi tía Rosa, María Elena y la Sra. Ligia, por estar siempre pendientes de mi familia y de mí, brindándonos su cariño y cuidados. Las quiero muchísimo.

Gracias a mis hermanas del alma, mis mejores amigas en el mundo: María Gabriela y María José, las incondicionales, que me han acompañado en cada etapa de mi vida, y sé que será así siempre hasta que seamos unas viejitas.

A Lisset, Gabriela, Katerine, Kris, Yulimar y Oriana, se convirtieron en mi familia en todos estos años que estuve lejos de mi casa, gracias a ustedes no me sentí sola.

A mis amigos, compañeros de la carrera, de risas, de locuras: Joysse, Mariana, Rebeca, Mariajosé, Luz María, Luis Omaña, Luis Arreaza, Carla, Robert, Andrés, Yelismar, Jesús

Guerra, Raúl, Ninoska, Rossina, Orlando, Juan, Lismar, Javier, Francis Martínez, Francis Nuñez, Janswill, Edgar, Eduard, Luis Mujica, gracias por su amistad y apoyo, cada uno de ustedes es único e inolvidable.

Gracias al profe Santiago, mi tutor, por estar involucrado en cada paso de esta tesis, por su paciencia, comprensión, incondicionalidad, ética, gracias porque más que un profesor es un papá para mi.

Gracias al profe José Vicente por ser mi tutor, por su valioso aporte durante la realización de la tesis y durante mi formación académica. También agradezco a los profesores Manuel Martínez, Katya Reátegui, Carlos Barrios, Raiza Fernández, Karla Quintero por el amor y vocación que tienen a su trabajo, por su calidad humana, por ser una fuente de motivación y por toda su ayuda.

Gracias a los profesores Salvador Lo Mónaco y Liliana López por la dedicación que tuvieron con mis compañeros y conmigo en las clases de Proyecto Geoquímico I, impulsándonos a llevar a cabo un excelente trabajo. Y al profesor Williams Meléndez que también aportó su conocimiento y experiencia en la elaboración de este trabajo.

Gracias a Chaveli, Anny, el Sr. Fernando y la Sra. Marisol por su don de amabilidad y la ayuda que me brindaron durante la realización del proyecto.

Gracias a la Universidad Central de Venezuela, mi segunda casa, que me brindó la oportunidad de formarme como persona y profesional.

Agradecimientos especiales

Al Centro Nacional de Tecnología Química (CNTQ) por el financiamiento del presente trabajo de investigación y a la Facultad de Agronomía de la Universidad Central de Venezuela, por suministrar los esquejes de vetiver, en especial al Prof. Oscar Rodríguez por la asesoría brindada en cuanto a las características de la planta y su tratamiento.

RESUMEN

Los lodos rojos son un material residual formado durante el proceso de extracción de alúmina de la bauxita, en Venezuela la empresa CVG Bauxilum genera alrededor de 1 millón de toneladas anualmente, estos son acumulados en lagunas de almacenamiento; debido a su alcalinidad (pH 10-13), salinidad y contenido de metales trazas, representan un riesgo para el medio ambiente, es por ello que en la presente investigación es propuesto emplear los lodos rojos provenientes de CVG Bauxilum para neutralizar suelos ácidos de sabana y determinar su influencia en las propiedades químicas del suelo y su efecto sobre el crecimiento de la especie *Chrysopogin zizanioides* (vetiver). Para llevar a cabo este estudio fueron realizados 9 ensayos con plantas, los cuales comprendían tres controles: suelos ácidos de sabana (SAS), lodo rojo neutralizado con salmueras marinas (LRN) y lodo rojo sin neutralizar (LR), y seis mezclas en tres proporciones distintas, las cuales fueron 2%, 5% y 10% de lodos rojos (neutralizados y sin neutralizar) aplicados a los suelos; obteniendo que las proporciones de mezcla con mayor éxito, basándose en el desarrollo del vetiver, fueron para lodos rojos neutralizados la de 2% (SLRN 3) y para lodos rojos sin neutralizar también la de 2% (SLR 3). Los análisis químicos fueron realizados a las submuestras colectadas de los ensayos SAS, LR, LRN, SLRN 3 y SLR 3 al inicio del experimento, 48 días después y al finalizar; determinando que la proporción óptima de mezcla es la SLRN 3, debido a que de las mezclas fue la única que tuvo 100% de supervivencia de la planta durante los 104 días en que se llevo el experimento, los parámetros de crecimiento indican que tuvo mayor desarrollo en comparación a los otros ensayos, gracias al aporte de los lodos rojos neutralizados, aumentó la retención de agua del suelo de 6 a 13%, el pH incrementó de 5,01 a 7,41 (valor típico en los suelos fértiles), además añadió al suelo elementos como Fe, Mg, K y P nutrientes esenciales para las plantas, el Al añadido al sistema, elemento tóxico permanece retenido en el sustrato como una fase no biodisponible y el Na también tóxico tiene la tendencia de disminuir con del tiempo.

Palabras clave: Lodos rojos, neutralización, salmueras marinas, enmiendas, revegetación, vetiver, fitorremediación.

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN	1
OBJETIVO GENERAL	3
OBJETIVOS ESPECÍFICOS	3
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	4
ALUMINIO	4
BAUXITA	4
OBTENCIÓN DE LA ALÚMINA	9
LODOS ROJOS	12
ENMIENDA DE SUELOS ÁCIDOS ARENOSOS CON LODOS ROJOS	18
LODOS ROJOS EN PLANES DE REVEGETACIÓN	20
PLANTA VETIVER (<i>Chrysopogon zizanioides</i>)	23
METODOLOGÍA	27
ETAPA DE OFICINA	27
ETAPA DE CAMPO Y TRATAMIENTO DE MUESTRAS	27
• Lodos rojos	27
• Salmueras marinas	28
• Suelos ácidos de sabana	28
• Planta vetiver (<i>Chrysopogon zizanioides</i>)	29
• Preparación de los ensayos	30
ANÁLISIS QUÍMICO DE LAS MUESTRAS	34
• pH y conductividad	34
• Determinación de Al, Fe, K, Mg y Na mediante la técnica de espectroscopia de absorción atómica (AA) y emisión atómica (EA)	34
• Determinación de N total mediante el método Kjeldahl	35
• Determinación de P total mediante absorción molecular en el espectro UV y visible	39
• Determinación S total mediante analizador elemental LECO C-144	40
• Determinación de la mineralogía mediante difracción de rayos X (DRX)	40
	VI

• Determinación de humedad (%H ₂ O)	41
• Crecimiento del vetiver	42
TRATAMIENTO DE DATOS Y ERRORES	42
RESULTADOS Y DISCUSIÓN	43
PROPORCIÓN ÓPTIMA DE MEZCLA DE SUELOS Y LODOS ROJOS	43
CRECIMIENTO DE LA PLANTA <i>Chrysopogon zizanioides</i> (vetiver)	44
HUMEDAD EN LAS MUESTRAS	49
MINERALOGÍA DE LAS MEZCLAS DE SUELOS Y LODOS ROJOS	50
DETERMINACIÓN DE pH Y CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA	56
• Variaciones de pH	56
• Variaciones de conductividad eléctrica	58
COMPOSICIÓN ELEMENTAL DE LAS MEZCLAS DE SUELOS Y LODOS	
ROJOS	62
• Carbono	63
• Nitrógeno	64
• Fósforo	64
• Aluminio	65
• Hierro	69
• Magnesio	72
• Potasio	74
• Sodio	76
CONCLUSIONES	80
RECOMENDACIONES	82
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	83
APÉNDICES	94

INTRODUCCIÓN

Los lodos rojos son un material residual formado durante el proceso de extracción de alúmina de la bauxita (Lin et al., 2003). Más del 95% de la bauxita del mundo es refinada mediante el proceso Bayer, usando hidróxido de sodio (NaOH) concentrado para disolver los minerales presentes en la mena, mientras que el material insoluble que contiene los lodos rojos, es filtrado y extraído de la solución alcalina obtenida, y a su vez son removidos del circuito en el proceso hidrometalúrgico. Las refineras de alúmina generan volúmenes significativos de residuos (alrededor de 1 a 2 toneladas de lodos rojos por tonelada de alúmina producida) extremadamente alcalinos (pH 10-13), salinos y que contienen metales traza, por lo que su almacenamiento inadecuado podría generar serios problemas ambientales (Gupta y Ali, 2004; Lottermoser, 2010; Alshaal et al., 2013). Es por ésta razón que se han propuesto diversos usos para los lodos rojos, tales como aplicaciones en construcciones civiles y edificaciones, en la industria química como catalizadores, materia prima para la elaboración de cerámica, recubrimientos, pigmentos, aplicaciones metalúrgicas en la recuperación de metales mayoritarios y minoritarios, aplicaciones ambientales y agronómicas en la enmienda de suelos contaminados, ácidos y neutralización de drenajes mineros ácidos (Klauber et al., 2009).

Los lodos rojos por su alcalinidad hacen posible la enmienda de suelos ácidos arenosos, incrementando el pH y reduciendo la disponibilidad de metales tóxicos para las plantas como cadmio y níquel, lo que mejora la fertilidad del suelo. El contenido de óxidos de hierro y aluminio en los lodos rojos promueve la retención de fósforo, y su textura fina la retención de agua en los suelos ácidos arenosos infértiles, su aplicación puede reducir potencialmente la eutrofización de cuerpos de agua cercanos por retención de nutrientes (Ho et al., 1989; Summers et al., 1996; Snars et al., 2003; Feigl et al., 2012). El empleo de lodos rojos en planes de revegetación de suelos infértiles y contaminados ha sido amplio en el mundo, utilizándose en Australia, Canadá, China, Irlanda, Hungría, U.S.A. y Venezuela, mostrando resultados positivos en el crecimiento de distintas plantas, reduciendo la movilidad de metales como cadmio, níquel, cromo, cobalto, hierro y zinc, y aumentando el

contenido de nutrientes como fósforo y potasio en los suelos, especialmente en proporciones de mezclas comprendidas entre 2 a 10% en peso de lodos rojos.

Una de las plantas utilizadas en planes de revegetación con lodos rojos ha sido la especie *Chrysopogon zizanioides*, comúnmente conocida como vetiver, que es una *Gramínea* de tallos firmes y erguidos, de rápido crecimiento y que ha demostrado ser apropiada para la conservación de suelos y aguas debido a que contribuye al control de erosión, fitorremediación y absorción de metales pesados. El vetiver posee un alto rango de adaptabilidad a condiciones extremas de temperatura (-15°C a 55°C), pH (3,3 a 9,5); resiste condiciones de alta salinidad, concentraciones de elementos como: aluminio, manganeso, arsénico, cadmio, níquel, cromo, plomo, mercurio, selenio y zinc en los suelos. Además es muy eficiente para absorber nutrientes (nitrógeno y fósforo) y metales pesados. La plantación de vetiver es una solución natural y amigable con el medio ambiente, práctica, simple y eficiente en costos. Adicionalmente, las hojas y raíces que han acumulado contaminantes y metales pesados pueden ser utilizadas en la fabricación de cerámica, artesanías, techos, coberturas y como reemplazo o aditivo para el cemento (Orihuela, 2007; Truong et al., 2009).

En Venezuela la empresa CVG Bauxilum, C.A. produce un millón de toneladas anuales de lodos rojos que son acumulados en lagunas de almacenamiento. En los últimos años los investigadores han estado en la búsqueda de opciones para el reciclaje y reutilización de este pasivo ambiental. En el presente trabajo es propuesto, emplear los lodos rojos provenientes de la empresa CVG Bauxilum para neutralizar suelos ácidos de sabana y mejorar la retención de agua y nutrientes en estos. La fertilidad de las mezclas va a ser evaluada mediante el crecimiento de la especie *Chrysopogon zizanioides*. En tal sentido fueron planteados los siguientes objetivos:

OBJETIVO GENERAL

Determinar la influencia de los lodos rojos sobre las variables pH, conductividad, concentración de Al, C, Fe, K, Mg, N, Na y P en los suelos ácidos de sabana y su efecto sobre el crecimiento de la especie *Chrysopogon zizanioides* (vetiver).

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Determinar las proporciones óptimas para la neutralización de mezclas de lodos rojos con suelos ácidos de sabana.
2. Determinar pH, conductividad, concentraciones de nutrientes (C, N, P, K, Mg y Fe) y contaminantes (Na y Al) en los suelos antes y luego de realizar las mezclas, y posterior a tres meses de la plantación de la especie vetiver.
3. Evaluar la influencia del suelo ácido y las mezclas en el crecimiento de la especie vetiver, posterior a 104 días de su plantación.

REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

En el siguiente apartado están incluidos algunos conceptos básicos e investigaciones previas relacionadas con la bauxita, los procesos de obtención de alúmina y sus productos, el uso de los lodos rojos, remediación de suelos y fitorremediación, que son necesarios para el desarrollo teórico y metodológico del presente trabajo de investigación.

ALUMINIO

El aluminio, es el tercer elemento más abundante en la corteza terrestre. Actualmente, este elemento posee un amplio rango de aplicaciones, debido a su baja densidad, maleabilidad, conductividad eléctrica, propiedades térmicas y resistencia a la corrosión, haciendo de este uno de los materiales más útiles para la elaboración de piezas de automóviles, aviones, construcción, herramientas, electrodomésticos, embalaje, sistemas eléctricos y refrigeración, y en incontables componentes de la vida cotidiana. Los usos del aluminio superan a los de cualquier otro metal, excepto el hierro (Fe), y es importante prácticamente en todos los aspectos de la economía mundial (Plunkert, 2000; OECD, 2010).

La producción primaria del aluminio comienza con la extracción de bauxita, a través del proceso Bayer para obtener alúmina (Al_2O_3) y producir el metal aluminio (OECD, 2010). La bauxita es la mena principal de alúmina, siendo aproximadamente el 85% usado para producir aluminio metálico, 10% para productos no metálicos y el 5% restante asociado a aplicaciones no metalúrgicas como: producción de corindón sintético y refractarios de alúmina (Meyer, 2004; MEC, 2014; USGS, 2014).

BAUXITA

La bauxita es un depósito residual, formado en condiciones climáticas subtropicales o tropicales, por la meteorización prolongada de rocas alumínicas, en condiciones tectónicas favorables (Dana et al., 1997; Meyer, 2004; MEC, 2014). La bauxita está

compuesta principalmente de uno o más minerales de hidróxido de aluminio, más una mezcla de cuarzo (SiO_2), óxidos de hierro como hematita (Fe_2O_3), óxidos de titanio (TiO_2) y aluminosilicatos como caolinita ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$). Los principales minerales de hidróxido de aluminio encontrados en variadas proporciones en la bauxita son: gibbsita ($\text{Al}(\text{OH})_3$), y los polimorfos boehmita ($\gamma\text{AlO}(\text{OH})$) y diáspora ($\alpha\text{AlO}(\text{OH})$) (MEC, 2014; USGS, 2014). Según Sverdlin (2003), un depósito típico de bauxita contiene más de 45% de Al_2O_3 , menos de 12% de Fe_2O_3 y menos de 8% de sílice combinada.

Los depósitos de bauxita son clasificados genéticamente en tres tipos, de acuerdo a su mineralogía, composición química y roca parental. De todos los depósitos de bauxitas conocidos, cerca del 88% corresponden al tipo laterítico, el 11,5% al tipo kárstico y el 0,5% restante a las bauxitas tipo tikhvin (Bárdossy y Aleva, 1990). Las bauxitas lateríticas son derivadas de rocas alumínicas subyacentes al depósito, que están genéticamente asociadas a mesetas y superficies planas de escala continental, expuesta en zonas tropicales húmedas, de altas temperaturas y alta tasa de precipitación, que permiten que ocurra una meteorización química intensa, gracias a condiciones de drenaje y lixiviación favorables siendo estos factores necesarios en el proceso de bauxitización y laterización (Bárdossy y Aleva, 1990).

Los depósitos de bauxitas lateríticas en Venezuela están asociados con niveles de laterización de rocas graníticas, gabros y diabasas. Las principales zonas de ubicación de bauxitas en Venezuela son: Área de Upata, Serranía de Los Guicas, Gran Sabana y Los Pijiguaos en el estado Bolívar (Meléndez, 2006).

Venezuela está entre los primeros 15 países en producción de bauxita (tabla 1) (Bray, 2013). El principal y único yacimiento que es explotado en el país (Meléndez, 2006), está ubicado en la región de Los Pijiguaos, en el estado Bolívar (figura 1).

Tabla1. Producción y reservas mundiales de bauxita. Tomado de Bray (2013).

Producción y reservas mundiales de bauxita (Tm)			
	Producción minera		Reservas
	2011	2012	
Estados Unidos	ND	ND	20.000
Australia	70.000	73.000	6.000.000
Brasil	31.800	34.000	2.600.000
China	45.000	48.000	830.000
Grecia	2.100	2.000	600.000
Guinea	17.600	19.000	7.400.000
Guyana	1.820	1.850	850.000
India	19.000	20.000	900.000
Indonesia	37.100	30.000	1.000.000
Jamaica	10.200	10.300	2.000.000
Kazakhstan	5.500	5.300	160.000
Rusia	5.890	6.100	200.000
Sierra Leona	1.460	1.200	180.000
Suriname	4.000	4.200	580.000
Venezuela	4.500	4.500	320.000
Vietnam	600	300	2.100.000
Otros países	2.850	3.100	2.100.000
Total mundial	259.420	262.850	27.840.000

ND: información no disponible.

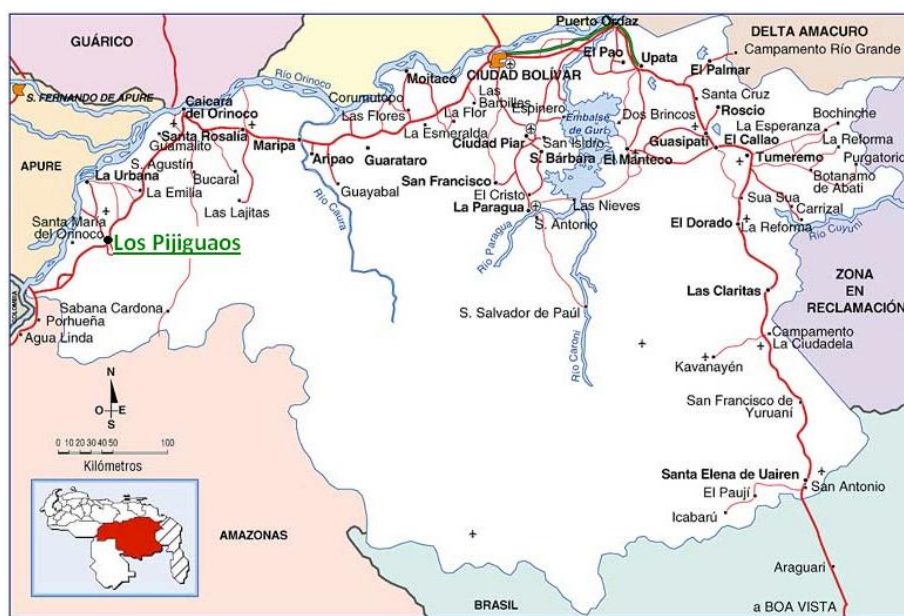


Figura 1. Ubicación geográfica de Los Pijiguaos. Tomado de Rodríguez (2006).

La bauxita de Los Pijiguaos, es producto de la meteorización intensa del granito de Parguaza, que según Mendoza (1972), es un granito biotítico de grano grueso a muy grueso, masivo, con textura rapakivi, rico en feldespato potásico ($KAlSi_3O_8$) y hornblenda $((Na,Ca)_{2-3}(Mg,Fe,Al)_5(Al,Si)_8O_{22}(OH)_2)$. El depósito de bauxita tiene una superficie de 16 km², su composición química es mostrada en la tabla 2. El espesor rico en bauxita que es posible explotar, pertenece a los primeros 8 m de profundidad del perfil laterítico (Lo Mónaco, 1984; Meléndez, 2006).

Tabla 2. Intervalo y promedio de los principales componentes químicos de la bauxita de Los Pijiguaos. Tomado de Bárdossy y Aleva (1990).

Principales componentes químicos de la bauxita de Los Pijiguaos (% en peso)																	
Al₂O₃			SiO₂			SiO₂ reactiva			Fe₂O₃			TiO₂			L.O.I.		
Promedio	Mínimo	Máximo	Promedio	Mínimo	Máximo	Promedio	Mínimo	Máximo	Promedio	Mínimo	Máximo	Promedio	Mínimo	Máximo	Promedio	Mínimo	Máximo
49	40	55	9	5	30	2	0,5	5	13	7	20	1,2	1	3	27	20	31
L.O.I.: pérdida por ignición. Agua y componentes volátiles como CO ₂ y SO ₃ .																	

La bauxita de Los Pijiguaos es explotada a cielo abierto por la empresa CVG Bauxilum, C.A. Los procesos de extracción, almacenamiento, carga y transporte de la bauxita, son desarrolladas en tres áreas básicas: mina, área de homogeneización (Pie de cerro) y área de almacenamiento y embarque (El Jobal) (CVG Bauxilum, 2014).

En el área de mina es removida la capa vegetal, para luego proceder al escarificado mediante el cual es rota la capa de laterita dura, la bauxita es extraída directamente de los diferentes bloques de la mina (figura 2), y es llevada por camiones roqueros a la estación de molienda, siendo transportada por placas hasta el molino, donde es reducida hasta una granulometría menor a 100 mm.



Figura 2. Mina de bauxita. Tomado de CVG Bauxilum (2014).

Transcurrido el paso anterior en el área de homogenización el material es apilado a pie de cerro (figura 3).



Figura 3. Pie de Cerro. Tomado de CVG Bauxilum (2014).

En cuanto al área de almacenamiento y embarque, la bauxita es transferida por ferrocarril desde el área de homogenización hasta el puerto El Jobal, finalmente el material es transportado por medio fluvial, desde éste puerto hasta la planta de alúmina, en Puerto Ordaz, en un recorrido de 650 Km a través del río Orinoco.



Figura 4. Gabarras cargadas de bauxita. Tomada de CVG Bauxilum (2014).

OBTENCIÓN DE ALÚMINA

La mayoría de la producción mundial de bauxita, aproximadamente el 85%, (incluyendo a Venezuela) es usada como materia prima para la obtención de alúmina, a través de un método químico de extracción húmeda, comúnmente conocido como proceso Bayer (USGS, 2014).

Karl Joseph Bayer patentó dos procesos para la extracción de alúmina de la bauxita, el primero en 1888 que hoy en día representa una menor contribución a la industria global, su uso es limitado debido a que el proceso está basado en altas temperaturas, lo cual implica un alto consumo energético. El segundo fue patentado en 1892, el cual se convirtió en el conocido “Proceso Bayer” y fue en gran parte el responsable de la expansión de la industria del aluminio en el siglo XX (figura 5) (Klauber et al., 2009).

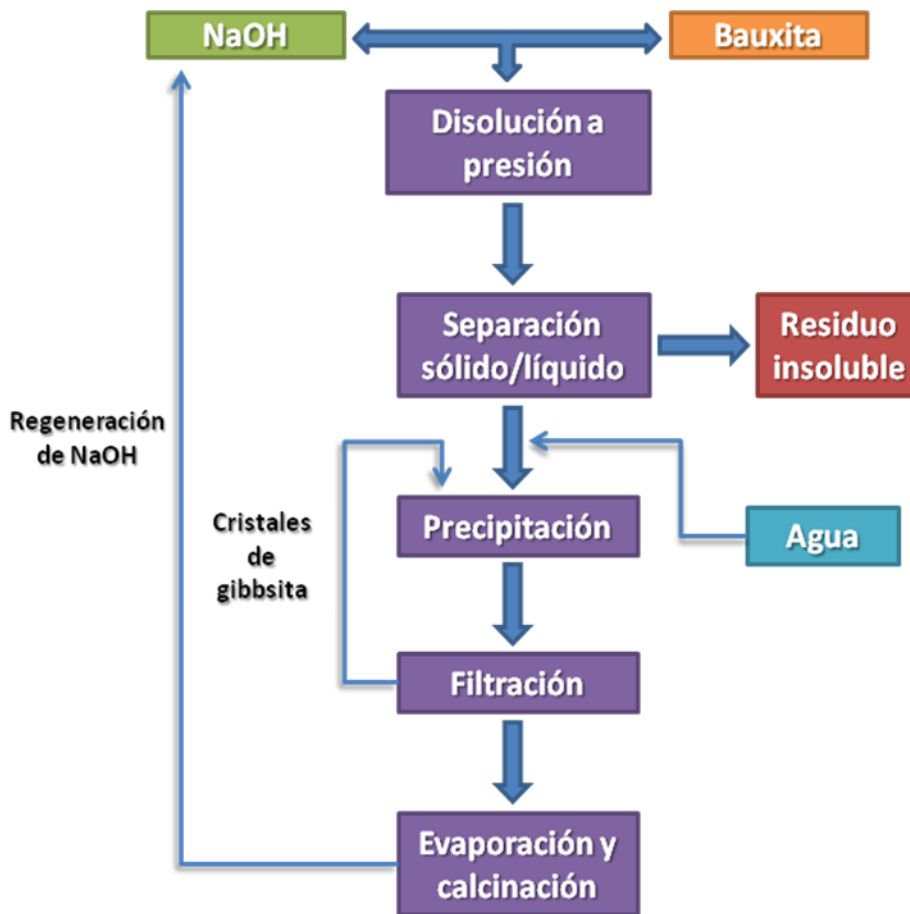
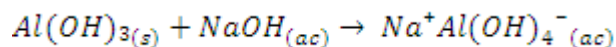
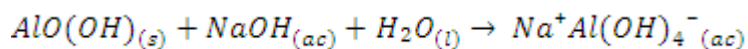


Figura 5. Proceso Bayer. Tomado y modificado de Klauber et al. (2009).

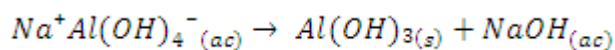
El proceso Bayer consiste en un proceso químico cíclico de cuatro etapas: digestión, clarificación, precipitación y calcinación (Pontikes, 2005a; Rubinos, 2008; Balomenos et al., 2011).

1. La primera etapa es la digestión, en la que la alúmina es extraída de la mena de bauxita utilizando una solución de hidróxido de sodio (NaOH), a condiciones de alta presión (30 atm) y a una temperatura comprendida entre 140 y 300 °C. En esta etapa el hidróxido de sodio reacciona con los minerales de aluminio de la bauxita, para formar una solución saturada de aluminato de sodio (NaAl(OH)₄).

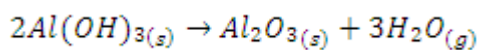




2. La segunda etapa es la de clarificación de la solución saturada en aluminato, durante ésta etapa la mezcla es pasada a través de una serie de tanques que reducen la presión. Posteriormente, es separado el material sólido insoluble en NaOH, material conocido como lodos rojos. Estos residuos son lavados, combinados y extraídos del ciclo hidrometalúrgico.
3. La tercera etapa es la de precipitación, la solución obtenida es enfriada a 60°C, a la cual es añadida una cantidad considerable de cristales de gibbsita, para lograr la precipitación de alúmina trihidratada, que luego es filtrada y lavada para remover el licor caustico remanente.



4. La cuarta etapa es la de calcinación, en la que la alúmina trihidratada es calcinada a 1100°C en hornos rotatorios, para producir alúmina en polvo de alto grado metalúrgico; mientras simultáneamente ocurre la evaporación del licor caustico para su regeneración y reutilización del hidróxido de sodio. En promedio el proceso Bayer requiere de 2,65 kg de bauxita para producir 1 kg de alúmina.



El proceso Bayer fue tan exitoso que se convirtió en la base de una nueva gran industria de aluminio, que desde 1892 ha ido creciendo exponencialmente (Klauber et al., 2009). Sin embargo, este proceso trae consigo una consecuencia inevitable, que es la producción y acumulación de los residuos insolubles presentes en NaOH, los lodos rojos.

LODOS ROJOS

Los lodos rojos según Klebercz et al. (2010), son un subproducto obtenido del proceso de extracción de alúmina de la bauxita, en el que es usado hidróxido de sodio (NaOH) para la digestión de la mena. El residuo de la bauxita, está compuesto principalmente de óxido de hierro (Fe_2O_3), óxido de titanio (TiO_2), sílice (SiO_2) y alúmina insoluble (Al_2O_3), junto con un amplio rango de otros óxidos, que varían según la composición de la bauxita de la que provengan. Las altas concentraciones de óxidos de hierro, le proporcionan al residuo su característico color rojo, siendo ésta razón por la que son comúnmente conocidos como “lodos rojos” (European Aluminium Association, 2013). La composición química y mineralógica típica de los lodos rojos es mostrada en las tablas 3 y 4.

Tabla 3. Composición química de los lodos rojos para los componentes principales. Tomado de European Aluminium 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

Tabla 4. Composición mineralógica de los lodos rojos. Tomado de European Aluminium Association (2013). Continuación en la siguiente página.

Mineral	Intervalo de concentración (%)
Sodalita ($3\text{Na}_2\text{O}\cdot 3\text{Al}_2\text{O}_3\cdot 6\text{SiO}_2\cdot \text{Na}_2\text{SO}_4$)	4-40
Goethita (FeOOH)	10-30
Hematita (Fe_2O_3)	10-30
Magnetita (Fe_3O_4)	0-8
Sílice (SiO_2) cristalina y amorfa	3-20
Aluminato de calcio ($3\text{CaO}\cdot \text{Al}_2\text{O}_3\cdot 6\text{H}_2\text{O}$)	2-20
Boehmita (γAlOOH)	2-15
Anatasa y rutilo (TiO_2)	2-15
Muscovita ($\text{K}_2\text{O}\cdot 3\text{Al}_2\text{O}_3\cdot 6\text{SiO}_2\cdot 2\text{H}_2\text{O}$)	0-15
Calcita (CaCO_3)	2-20

Mineral	Intervalo de concentración (%)
Caolinita ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$)	0-5
Gibbsita ($\text{Al}(\text{OH})_3$)	0-5
Perovskita (CaTiO_3)	0-12
Cancrinita ($\text{Na}_6[\text{Al}_6\text{Si}_6\text{O}_{24}] \cdot 2\text{CaCO}_3$)	0-50
Diáspora (αAlOOH)	0-5

Las refineras de alúmina generan volúmenes significativos, de 1 a 2 toneladas de lodos rojos por tonelada de alúmina producida, que son extremadamente alcalinos (pH 10-13), salinos y que contienen metales traza, lo que ha generado serios problemas ambientales, como movilización y transporte de los lodos rojos por acción del viento, contaminación de los cuerpos de agua y suelos cercanos a los diques de almacenamiento (Gupta y Ali, 2004; Lottermoser, 2010; Alshaal et al., 2013; Xue et al., 2015).

El manejo y almacenado de los lodos rojos es determinado por factores como: antigüedad de la planta de tratamiento, espacio disponible, proximidad al mar, presencia de minas locales, clima, logística, naturaleza del residuo y regulaciones (European Aluminium Association, 2013). En el pasado los lodos rojos eran dispuestos en el mar, o almacenados en lagunas contenedoras o diques, estas áreas convencionales de disposición eran simples y económicas, pero tenían un potencial impacto negativo sobre las aguas subterráneas y el medio ambiente, lo que llevó a la construcción de diques doblemente recubiertos con membranas hechas de polímeros, y a la incorporación de un sistema de drenaje a lagunas artificiales; los sistemas de drenaje han disminuido la amenaza del residuo al medio ambiente, y al mismo tiempo aumentan la capacidad de almacenamiento como resultado de la mejor consolidación del residuo. Hoy en día, los lodos rojos todavía son dispuestos de estas maneras y mientras estos residuos son acumulados, los investigadores han estado en la búsqueda de mejores opciones para el reciclaje y reutilización de los lodos rojos (Pontikes, 2006).

En la empresa CVG Bauxilum, C.A. ubicada en Puerto Ordaz-Edo. Bolívar, cuando la alúmina es separada del material insoluble en NaOH (los lodos rojos), estos son diluidos con agua y bombeados a través de la bomba GEHO diferentes lagunas de almacenamiento

bordeadas con diques. En la bomba GEHO coexisten el licor cáustico (fracción líquida) con los lodos rojos (fracción sólida), la bomba traslada una suspensión de lodos rojos (licor más sólidos) a la laguna 3C y estos a su vez drenan por gravedad a la laguna 3B, el licor caustico remanente en los lodos rojos es drenado a las lagunas 3A y 2 (figura 6). Los lodos rojos presentes en la laguna 3C, son residuos secos debido a que el licor cáustico presente en estos son movilizados a las otras lagunas, para disminuir los riesgos ambientales y reducir los costos de tratamientos para su neutralización (Pontikes, 2006; Caccamo, 2013; Marcano, 2013).



Figura 6. CVG Bauxilum, Puerto Ordaz, Edo. Bolívar. Tomado y modificado de Google Earth.

Con el progreso de la industria de alúmina, han sido ideadas estrategias para el manejo, control y monitoreo de los lodos rojos con el fin de minimizar los riesgos de contaminación a las afueras de las empresas y facilitar la restauración del lugar, una vez culminada la vida productiva de la mina. Una de estas estrategias es la neutralización parcial o completa de los residuos, que puede ser llevada a cabo con ácidos (sulfúrico y clorhídrico), dióxido de carbono (CO_2), dióxido de azufre (SO_2), agua de mar o salmueras marinas. La neutralización parcial de los lodos rojos reduce su toxicidad, al disminuir la

alcalinidad y permite entre otros usos, emplearlos en planes de revegetación de suelos (European Aluminium Association, 2013).

Las refinерías de alúmina han implementado la neutralización de lodos rojos con el agua de mar y salmueras marinas, puesto que disminuyen la alcalinidad y la concentración de metales disueltos en el residuo, mediante la precipitación de óxidos, hidróxidos y carbonatos de aluminio, magnesio y calcio (Paradis et al., 2007; Palmer y Frost, 2009).

Khaitan et al. (2009) realizaron un modelo que simulaba la titulación ácida a largo plazo de lodos rojos, mediante el cual demostraron que la capacidad de neutralización ácida de los lodos rojos está controlada por la disolución de carbonatos (rango de pH 4,5 a 6), aluminosilicatos de sodio (NaAlSiO_4) (rango de pH 6,7 a 8,7) y la neutralización de las especies $\text{Al}(\text{OH})_4^-$, NaOH y NaCO_3^- , contenidas en el agua residual de los poros (rango de pH 12 a 12,5), que genera la precipitación de fases minerales como la hidrotalcita ($[\text{Mg}_6\text{Al}_2(\text{OH})_{16}](\text{CO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$), brucita ($\text{Mg}(\text{OH})_2$), boehmita ($\text{AlO}(\text{OH})$), hematita (Fe_2O_3), tenorita (CuO), alumohidrocalcita ($\text{CaAl}_2(\text{CO}_3)_2(\text{OH})_4 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$), calcita (CaCO_3) y magnesita (MgCO_3).

Dilmore et al. (2008) investigaron la posibilidad de emplear lodos rojos neutralizados con salmueras (que poseen una salinidad superior a 37 ‰) como agente secuestrante de CO_2 generado en fuentes industriales puntuales; la mezcla lodos rojos/salmueras en volumen (90/10) exhibe una gran capacidad de secuestro de CO_2 mayor a 9,5 g/L, cuando es expuesto a el gas puro, a condiciones de 20°C y 6,8 atm. La captura es llevada a cabo por la mineralización y solubilización del CO_2 , mientras que los lodos rojos permanecen neutralizados gracias a la reacción con las salmueras y el CO_2 .

Por otro lado, Sarmiento (2013) plantea en su estudio la neutralización de lodos rojos de CVG Bauxilum provenientes de la bomba GEHO con salmueras marinas, para obtener un material con características más adecuadas para su almacenamiento y potencial uso, en el trabajo fueron llevadas a cabo distintas proporciones de mezcla de lodos rojos

con salmueras marinas, obteniendo como proporción óptima de mezcla la de 5/25 lodo rojo (g):salmueras marinas (mL), el pH de los lodos rojos disminuyó de 12,5 a 8 aproximadamente, después de la neutralización. Caccamo (2013) también neutralizó lodos provenientes de la bomba GEHO con salmueras en distintas proporciones, estudiando el efecto de estas neutralizaciones sobre los parámetros fisicoquímicos del río Orinoco; fue determinado que la mezcla 5/25 y 100/25 de g de lodos rojos/mL de salmueras marinas eran las más efectivas, cambiando el pH inicial de los lodos rojos de 14,03 a 6,81 y 8,10 respectivamente después de la neutralización, siendo estos valores permitidos ambientalmente de acuerdo al Decreto 883 Gaceta oficial 5021, 1995 de la normativa ambiental venezolana que establece que los valores límite de pH están comprendidos entre 6-9. La relación 100/25 es la óptima desde el punto de vista de costos y transporte de salmueras marinas a la empresa CVG Bauxilum, debido a que es requerida menor cantidad, facilitando su adquisición y traslado de las mismas.

Los resultados anteriores coinciden con Marcano (2013), que en su estudio lleva a cabo la neutralización en diferentes proporciones de la fracción seca de los lodos rojos provenientes de la laguna 3B y la laguna 3C de la empresa CVG Bauxilum con salmueras marinas, determinando que la proporción óptima de neutralización de lodos rojos con salmueras marinas es 5/25 (g lodos rojos/mL salmueras), obteniendo que para los lodos rojos de la laguna 3B de pH inicial 10,91 disminuye a 6,68 después de la neutralización, y para los lodos rojos de la laguna 3C de pH 10,83 disminuyó a 6,67 posterior a la neutralización.

Las salmueras también son empleadas para neutralizar lodos rojos, con la finalidad de disminuir la acidez de los residuos mineros, puesto a que las salmueras proporcionan un efecto de neutralización a largo plazo, en comparación a las mezclas de lodos rojos sin neutralizar con los residuos mineros ácidos. Paradis et al. (2007) aumento el pH inicial de 3,94 de los residuos mineros ácidos a un pH cercano a 8 con la adición de 10% en peso de lodos rojos neutralizados con salmueras.

La utilización de los lodos rojos ha sido un tema importante de investigación científica. Un sorprendente número de potenciales usos han sido reportados en la literatura o patentados (Pontikes, 2005b). En la figura 7 son mostradas algunas patentes y su categoría de usos.

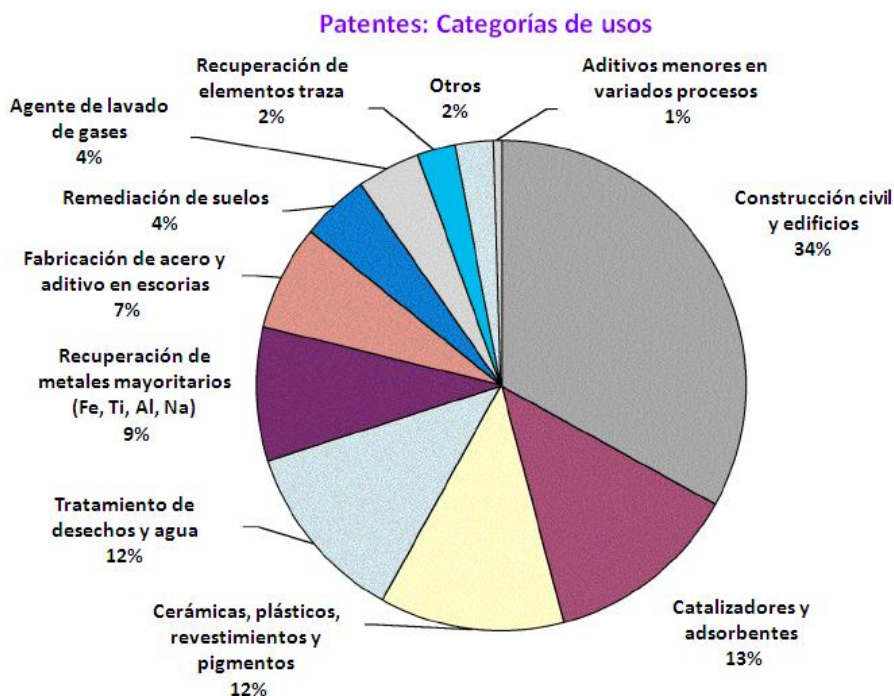


Figura 7. Porcentaje de patentes en cada categoría de uso, para un total de 734 patentes registradas en el período 1964-2008. Tomado de Klauber et al. (2009).

Entre las variadas áreas de aplicación de los lodos rojos se tiene (Pontikes, 2005b; Klauber et al., 2009; Liu et al., 2009):

- ∞ Construcción civil: los lodos rojos son utilizados para la producción de materiales de construcción como cemento, ladrillos, tejas, refractarios y cerámica de vidrio. Los materiales de construcción son destacados debido a que consumen un volumen significativo del residuo.
- ∞ Industria química: los lodos rojos son aplicados como catalizador para hidrogenación, hidrodechloración, purificación de gases, entre otros; aunque su utilización sin tratamiento previo del residuo genera baja eficiencia en los procesos.

Otros usos para los lodos en la industria química es en la producción de tinta, pigmentos, revestimientos, ollas, macetas y artículos de cerámica para el hogar.

- ∞ Metalurgia: el residuo es usado en la recuperación de metales mayoritarios (Fe, Ti, Al, Na) y metales traza (Sc, elementos de tierras raras, Pb, V, Cd, Zn), este uso todavía no es económicamente rentable, y en la mayoría de los casos el problema radica en la eliminación de los lodos rojos que quedan remanentes después de la recuperación de los metales. También es utilizado en la industria metalúrgica para la fabricación de acero.
- ∞ Aplicaciones ambientales y agronómicas: los lodos rojos a pesar de su alta alcalinidad, usualmente tienen una gran área superficial específica y una alta capacidad de intercambio catiónico, por lo que han sido ampliamente utilizados con propósitos ambientales y agronómicos, como adsorbentes para la remoción de metales pesados tóxicos, iones metálicos, aniones inorgánicos y compuestos orgánicos, en el tratamiento de aguas, suelos contaminados y residuos ácidos mineros; así como también son utilizados para enmendar suelos ácidos arenosos con poca retención de nutrientes.

ENMIENDA DE SUELOS ÁCIDOS ARENOSOS CON LODOS ROJOS

Los atributos de los residuos de la bauxita para descontaminar efluentes, drenajes mineros ácidos y suelos contaminados, también puede tener aplicaciones agronómicas. En particular para suelos arenosos, pobres en nutrientes (N, P, K, Ca, Mg, S, entre otros) y con poca retención de agua (Klauber et al. 2009). La adición de lodos rojos a suelos ácidos arenosos puede ser favorable en muchos sentidos, debido a que por su alcalinidad, alto contenido de óxidos de hierro y aluminio, conjuntamente gracias a su textura fina, es mejorada la retención de fósforo y promovida la retención de agua en estos suelos. La retención de fósforo, añade otro beneficio ambiental, puesto que evita la lixiviación de este elemento y con ello la eutrofización de los cuerpos de agua adyacentes (Summers et al., 1996; European Aluminium Association, 2013).

La alcalinidad de los lodos rojos incrementa el pH de los suelos ácidos y reduce la disponibilidad de metales tóxicos para las plantas como el Cd y Ni, lo que mejora la fertilidad del suelo y proporciona una aplicación a gran escala del residuo alcalino (Ho et al., 1989; Snars et al., 2003).

Summers et al. (1996), emplearon lodos rojos para enmendar suelos ácidos arenosos del Oeste de Australia, realizando dos ensayos de mezclas de lodos rojos con suelos ácidos, en diferentes relaciones de mezcla, en un área de 700 ha para cada uno; unos ensayos fueron realizados con lodos rojos neutralizados con fosfoyeso (para promover la lixiviación de las sales y disminuir su pH), y otros con lodos rojos sin neutralizar. Adicionalmente fue cultivado pasto de dos especies, aplicando fertilizantes a las mezclas, con la finalidad de evaluar el efecto de estas mezclas sobre el crecimiento de las plantas. Los resultados obtenidos arrojaron que la producción de pasto 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 fosfoyeso no aporta ningún beneficio para el suelo.

En otro estudio realizado por Summers et al. (2001) 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. En este estudio fueron realizadas mezclas de lodos rojos con suelos ácidos, en un área de 735 ha para cada mezcla, a partir de proporciones de 2 t/ha hasta 40 t/ha, a estas mezcla se le añadió superfosfato como fertilizante.

Por otra parte en Venezuela, Fernandes (2012) realizó un estudio sobre enmiendas de suelos ácidos de sabana con lodos rojos provenientes de CVG Bauxilum, neutralizados con diferentes materiales, las muestras consistieron en mezclas mecánicas de relación 4:1 masa-masa de suelos: lodos rojos (neutralizados y sin neutralizar), que estaban contenidas en columnas de PVC de 15 cm, con orificios en el fondo que permitieron la percolación del

agua, representando así los primeros 15 cm de suelo. Las neutralizaciones de lodos rojos fueron realizadas con fosfoyeso, yeso comercial y agua de mar en distintas proporciones, demostrando que los lodos rojos neutralizados con agua de mar en una proporción 5/25 (g/mL) y yeso comercial a 10% m/m, fueron las más efectivas, donde el pH del suelo cambió de 5,69 a 8,58 y 8,48 respectivamente, siendo estos los pH más cercanos a 7 de las mezclas. Para evaluar la toxicidad de estas mezclas, fueron sembradas semillas de maíz, con los cuales se obtuvieron mayores porcentajes de germinación en los suelos mezclados con lodos rojos neutralizados con agua de mar, sin embargo, presentaban bajos índices de germinación, lo que indicó que las condiciones del suelo no eran aptas para la revegetación, por lo que fue recomendado evaluar la neutralización de los lodos rojos con salmueras, debido a que estas poseen mayores concentraciones de Mg y Ca que son nutrientes esenciales para las plantas, y menor concentración Na, elemento no esencial para las plantas, para la mayoría de ellas es tóxico, por lo que el empleo de las salmueras marinas para la neutralización de lodos rojos favorecería futuros planes de revegetación.

LODOS ROJOS EN PLANES DE REVEGETACIÓN

Establecer vegetación en los lugares que son dispuestos los lodos rojos, es el camino más prometedor y beneficioso para su gestión ambiental, a pesar de que sus propiedades físicas y químicas pueden limitar el crecimiento de las plantas, debido a su pH elevado y salinidad, baja conductividad hidráulica, contenido de metales traza (Al y Fe principalmente) y la deficiencia de materia orgánica y elementos nutritivos (Courtney y Timpson, 2005; Xue et al., 2015). Las investigaciones han estado orientadas hacia dos enfoques: la mitigación de la toxicidad de los lodos rojos y la evaluación de plantas y microorganismos tolerantes a estas condiciones extremas (Xue et al., 2015). Los tratamientos de enmiendas con lodos rojos y establecimiento de vegetación, tienden a tener mayor éxito en frente a las que no se establece vegetación, puesto a que la cobertura vegetal favorece la disminución de la concentración de sodio intercambiable en el sustrato e incrementa la concentración de cationes como Ca, Mg y K, nutrientes esenciales para las plantas (Courtney et al., 2013).

En el 2010, al oeste de Hungría, en la planta de manufactura de aluminio del lugar, colapsó el contenedor de lodos rojos, esto ocasionó que fluyeran alrededor de 600.000-700.000 m³ de lodos rojos y afectara siete áreas residenciales cercanas a la planta de extracción. Debido a la alcalinidad y al contenido de metales traza tóxicos, los lodos rojos contaminaron los suelos de las adyacencias e inhibieron el crecimiento de las plantas. Es por ello que Alshaal et al. (2013) propone la posibilidad de fitorremediar estos suelos afectados, empleando la planta *Arundo Donax* L. (Familia *Gramínea*), que es bien conocida por su alta tolerancia a condiciones extremas y a su habilidad de enmendar suelos contaminados. Para ello realizó cuatro ensayos por triplicado, uno con una muestra de suelo control (no contaminada), otro que contenía sólo lodos rojos, una muestra del suelo contaminada y por último una mezcla del suelo control y los lodos rojos en una proporción 1:1, en cada uno sembró dos plántulas del mismo tamaño (aproximadamente 10 cm), después de 5 días agregó 10 mL de fertilizante, el experimento finalizó 3 meses después de la plantación, obteniendo mejoras en la conductividad que disminuyó entre 6% y 25%, también se redujo la disponibilidad de Cd, Cr, Co, Fe y Ni, aumento el contenido de nutrientes como fósforo (P) y potasio (K) en el suelo e incrementó en el crecimiento de la planta en las muestras de suelos contaminados y la mezcla de lodos rojos/suelos de un 40,2% y 47,2%, respectivamente. El crecimiento de la planta fue evaluado mediante la medida de su peso fresco, el número de brotes nuevos y la elongación del tallo y sus raíces.

En la investigación de Courtney y Mullen (2009) también evaluaron el crecimiento de las plantas utilizadas mediante los parámetros anteriormente nombrados, en su trabajo realizaron bioensayos de germinación con lodos rojos provenientes de la refinera Aughinish Alumina Ltd. en Irlanda, para determinar que propiedades inhiben la germinación de semillas y plántulas en desarrollo; obteniendo que para los lodos rojos sin enmienda, el pH elevado, la alta concentración de sodio, salinidad y contenido de aluminio, causaron un efecto negativo sobre la germinación de las semillas. En los lodos rojos que recibieron tratamientos de enmienda con yeso, aumentó el rendimiento de crecimiento en las plantas, especialmente en las especies *Lolium perenne* y *Trifolium pratense*, y disminuyó el contenido de sodio en el sustrato.

Feigl et al. (2012) empleó lodos rojos que tenían largo tiempo depositados en Almásfüzitő, Hungría, con un pH 9,0. Las muestras incluían los controles de residuos mineros y suelos contaminados, además de las mezclas de cada uno con 2% y 5% en peso de lodos rojos. A estas muestras le realizaron pruebas de toxicidad plantando la especie *Sinapis alba*. La adición de 5% de lodos rojos redujo la movilidad de Cd y Zn, y no incremento la toxicidad de los residuos mineros y el suelo, también disminuyó la absorción de Cd y Zn en la planta. Indicando que la aplicación de lodos rojos a los suelos, no tiene efectos negativos sobre la planta y microorganismos del suelo, y es favorable su utilización para remediación de suelos.

Numerosos trabajos de investigación han demostrado que las proporciones comprendidas en 2% y 10% en peso de lodos rojos son las mejores para la enmienda de residuos ácidos mineros y suelos. Doye y Duchesne (2002) en Canadá emplearon lodos rojos para neutralizar drenajes mineros ácidos, las proporciones 2%, 5% y 10 % fueron insuficientes para mantener el pH neutro, pero los experimentos mostraron buenos resultados retardando la oxidación de la pirita presente en los residuos mineros. Yi et al. (2006) en China determinaron que las concentraciones de Ni y Cd móviles disminuían notablemente en suelos contaminados por cenizas y aguas residuales de empresas de fundición, con la adición de 2% en peso de lodos rojos. En U.S.A. Udeigwe et al. (2009), realizaron un estudio del potencial de los lodos rojos para reducir la liberación al medio ambiente de: fósforo (P), carbono orgánico (OC), cobre (Cu) y zinc (Zn) de suelos afectados por estiércol, emplearon cinco muestras distintas de residuos de bauxita: lodos rojos secos, dos muestras lodos rojos frescos y los lodos rojos frescos por poseer mayor alcalinidad también fueron neutralizados con agua de mar (1kg/13 L de agua de mar), los resultados arrojaron que la aplicación de los lodos rojos neutralizados en una relación de 2% en peso (equivalente a 40t/ha) a los suelos afectados por estiércol, podría aumentar la inmovilización del fósforo, carbono orgánico, cobre y zinc.

Lin et al. (2003) trató suelos de pH 2,76, contaminados con sulfato ácido de la mina Guangdong Dabaoshan en China, con diferentes tipos de sorbentes y agentes de neutralización como: cal hidratada, lodos rojos, biosólidos, fertilizantes y zeolitas. En este

trabajo fueron llevados a cabo ensayos en macetas para investigar el efecto de los diferentes tratamientos en el suelo y en el crecimiento de la planta vetiver (*Chrysopogon zizanioides*). Los resultados arrojaron que el vetiver tenía un buen crecimiento en los suelos tratados con lodos rojos en una relación de 2,5% en peso y 0,5% en peso de cal hidratada, manteniendo un pH entre 8,6-7,5 durante 50 días de experimento. En cambio los suelos tratados con fertilizantes y polvo de zeolitas mostraron resultados negativos en el crecimiento de la planta.

En Venezuela Lisena et al. (2006), realizó ensayos cultivando 30 plántulas de vetiver en una superficie de 5 m², que contenían muestras de lodos procedentes de la empresa CVG Bauxilum, con la finalidad de determinar la factibilidad de usar ésta planta para la recuperación de los depósitos de lodos rojos. Los ensayos fueron llevados a cabo por 33 meses, durante el desarrollo del experimento no se realizó la aplicación de abono en el área de siembra, debido a que tenían por objetivo determinar la adaptación y resistencia de la planta a las condiciones extremas que poseen los lodos rojos. Los resultados indicaron que el vetiver posee tolerancia a pH de 9,5, al final del estudio el porcentaje de supervivencia de la especie fue del 64%, además el pH del suelo descendió de 9,5 a 8,5. En el estudio recomiendan para mejorar los porcentajes de supervivencia la aplicación de enmiendas a los lodos rojos, para disminuir su toxicidad y mejorar la textura del sustrato.

PLANTA VETIVER (*Chrysopogon zizanioides*)

La especie *Chrysopogon zizanioides* pertenece a la familia de las *Gramíneas*, subfamilia *Panicoindae*, tribu *Andropogonae* y subtribu *Sorghina*. Es comúnmente conocida como vetiver, puede ser encontrada a lo largo de regiones tropicales y subtropicales de África, Asia, Australia, América y Europa Mediterránea, es común en llanuras de inundación o vegas de los ríos (Danh et al, 2012). El vetiver ha demostrado ser apropiado para la conservación del suelo y del agua, la humedad de los suelos, estabilización de taludes, control de erosión, fitorremediación, absorción de metales

pesados, bioingeniería, forraje, agroforestería, medicina, artesanía, fuente de energía, entre otros (Orihuela, 2007).

La planta vetiver posee un sistema de raíces finas y compactas de rápido crecimiento, tallos firmes y erguidos, es muy resistente a plagas, enfermedades y fuego. Tiene una alta tolerancia a variaciones climáticas extremas como sequía prolongada, inundaciones, sumersión y temperaturas de -15°C a 55°C, adicionalmente tiene la habilidad de rebrotar rápidamente después de ser afectada por sequías, heladas, salinidad y otras condiciones adversas, y es muy eficiente para absorber nutrientes N y P, y metales pesados en aguas contaminadas. Es una planta tolerante a herbicidas y plaguicidas, y a un amplio rango de pH de 3,3 a 9,5 sin enmiendas de suelo, además resiste altas condiciones de salinidad, concentraciones de elementos como: Al, Mn, As, Cd, Ni, Cr, Pb, Hg, Se y Zn en los suelos (Truong et al., 2009). Adicionalmente el vetiver acumula metales tóxicos principalmente en las raíces y en menor cantidad en el tallo, la selectividad para la traslocación de los metales de la raíz al tallo, puede ser una de los mecanismos de tolerancia a los metales tóxicos (Srivastava et al., 2008). En la tabla 5 es presentado un resumen de las características de adaptabilidad de la planta.

Tabla 5. Rango de adaptabilidad de la planta vetiver en Australia. Tomada y modificada de: Truong et al. (2009).

Característica	Australia
Condiciones de suelo adversas	
pH	3,3-9,5
Salinidad	17,5-4755 mS/cm
Nivel de saturación con Al	68-87%
Nivel de Mn	>578 mg/kg
Sodicidad (Na)	48% (Na ⁺ intercambiable)
Magnesicidad (Mg)	2400 mg/Kg
Fertilizante	
El vetiver puede ser establecido en suelos de baja fertilidad debido a su fuerte asociación con micorrizas.	N y P (300 kg/ha)
Metales pesados	
Arsénico (As)	100-250 mg/kg
Cadmio (Cd)	20 mg/kg
Cobre (Cu)	35-50 mg/kg

Característica	Australia
Metales pesados	
Cromo (Cr)	200-600 mg/kg
Níquel (Ni)	50-100 mg/kg
Mercurio (Hg)	>6 mg/kg
Plomo (Pb)	>1500 mg/kg
Selenio (Se)	>74 mg/kg
Zinc (Zn)	>750 mg/kg
Clima	
Precipitación anual	450- 4000 mm
Heladas (T del suelo)	-11°C
Olas de calor	45°C
Sequía (precipitación no efectiva)	15 meses

La planta vetiver como pasto tropical es muy intolerante a la sombra, reduciendo su crecimiento y en algunos casos puede ser eliminada a largo plazo, es por esto que tiene un mejor crecimiento en espacios abiertos y libres de malezas, siendo necesario el control de malezas para cultivarla. En terrenos erosionables e inestables el vetiver reduce la erosión, los estabiliza y ayuda en la conservación de nutrientes y humedad, mejora el microambiente y permite que se establezcan otras especies en el suelo.

Debido a las características morfológicas y fisiológicas el vetiver ha sido utilizado para rehabilitar desechos mineros, fitorremediar escombreras de minas, y suelos contaminados y tóxicos (Truong et al., 2009). Luque et al. (2005) utilizó el pasto vetiver para recuperar las áreas de la mina de bauxita de Los Pijiguaos, en la que la vegetación fue removida para proceder a la escarificación y extracción de la bauxita, pudiendo establecer el vetiver en el suelo carente de materia orgánica, con pocos nutrientes, fácilmente erosionable y de pH comprendido entre 4-5; con este estudio se logró controlar la erosión de los taludes, cárcavas, fallas de borde e interfaz suelo-concreto, con lo que fue posible disminuir el aporte de sedimentos a los cursos naturales de agua y propiciar el establecimiento de otras especies vegetales autóctonas de la zona.

Chen et al. (2004) realizó un estudio con la planta vetiver debido a su potencial en la fitorremediación de suelos contaminados con metales pesados, técnica que es

ambientalmente amigable y de bajo costo. Para los experimentos tomaron muestras de los primeros 30 cm de suelo de un jardín del área suburbana de Nanjing, China, a estas le determinaron la concentración total de metales mediante ICP-EEA después de una digestión fuertemente ácida (1:4 HNO₃ y HClO₄ concentrado en relación de volumen). Las muestras de suelos fueron artificialmente contaminadas con Pb, Zn, Cd y Cu en cuatro proporciones distintas. Las muestras eran de 5 kg cada una, y estaban contenidas en recipientes plásticos de 15 cm de diámetro por 25 cm de altura, donde fue plantada la especie vetiver, cada una tenía una longitud de 8 cm en la raíz y 20 cm de longitud en las hojas, durante 15 días fueron aplicados a los experimentos soluciones de EDTA para promover la absorción y traslocación de los metales de la raíz a las hojas de la planta. La relación entre la concentración de metales en las hojas y la concentración total de metales en el suelo, reflejan parcialmente la habilidad de la planta de absorber metales pesados del suelo y transportarlos hasta las hojas, sin embargo en comparación con los metales retenidos en la columna del suelo la cantidad de metales pesados absorbidos por las raíces y hojas del vetiver es baja. Fue determinado que alrededor del 99,7% de Pb, 93,8% de Cu, 95,6% de Zn y 98,2% de Cd en soluciones del lixiviado fueron adsorbidas por el suelo bajo la influencia del crecimiento de la planta vetiver en la columna de suelo.

Chiu et al. (2006), investigaron la posibilidad de utilizar la especie *Chrysopogon zizanioides* (vetiver) y *Phragmites australis* (caña común) para absorber Pb, Zn y Cu de residuos mineros provenientes de la mina de Pb/Zn Lechang y la mina de Cu de Guangdong Dabaoshan en China, también estudió el efecto de la aplicación de enmiendas orgánicas con fertilizantes y lodos de alcantarilla en los residuos revegetados, este fue un estudio invernadero realizado por 4 meses. Los resultados arrojaron que el vetiver mostró mayor crecimiento en comparación a la caña común, bajo los mismos tratamientos.

METODOLOGÍA

En este apartado es expuesta la metodología utilizada para cumplir con los objetivos trazados en el presente proyecto, ésta consta de una etapa de oficina, etapa de campo, análisis químico de las muestras, tratamiento de datos y errores.

ETAPA DE OFICINA

La etapa de oficina comprendió la revisión bibliográfica que fue realizada a lo largo de todo el desarrollo del proyecto, consultando constantemente las fuentes bibliográficas ya recopiladas y nuevo material de información. También incluyó la búsqueda de información, mapas de ubicación de la empresa CVG Bauxilum, C.A., de la Empresa Nacional Salinera (Enasal) y de la zona donde fueron colectadas las muestras de suelo, además de la preparación del material de muestreo de suelo, como son sacos para almacenar arena, palas para coleccionar las muestras de suelo y los envases en que fueron colocadas las plantas.

ETAPA DE CAMPO Y TRATAMIENTO DE MUESTRAS

Lodos rojos

Los lodos rojos correspondieron a dos muestras de 15 kg cada una aproximadamente, éstas fueron tomadas por el personal de CVG Bauxilum de la bomba GEHO, en la que coexiste el licor caustico (fracción líquida) y los lodos rojos (fracción sólida), y de la laguna 3C que es la laguna en la que los lodos rojos se encuentran secos (figura 8).

Los lodos rojos provenientes de la bomba GEHO, fueron neutralizados con salmueras marinas en una proporción 4:1 masa (g)/volumen (mL) (residuos: salmueras) (Apéndice A), con la finalidad de disminuir su toxicidad antes de ser mezclados con los suelos. Posterior a la neutralización, la fracción líquida de la muestra fue separada por gravedad, conservando la fracción sólida que posteriormente fue colocada a secar en bandejas plásticas a temperatura ambiente.

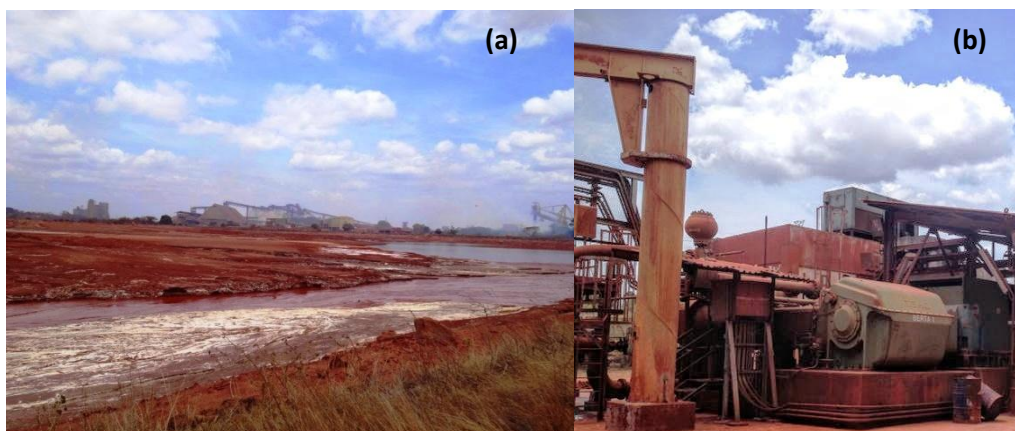


Figura 8. (a) Empresa CVG Bauxilum, (b) Bomba GEHO.

Salmueras marinas

Las salmueras marinas fueron colectadas en la Península de Araya, Edo. Sucre en la Empresa Nacional Salinera (Enasal), por el personal de esta empresa. Fueron necesarios 8,3 L de salmueras para la neutralización de los lodos rojos provenientes de la bomba GEHO.

Suelos ácidos de sabana

La muestra comprendió los primeros 15 cm de un suelo ácido de sabana que posee una textura arenosa y pH ácido (5-5,2). Fueron colectados aproximadamente 170 kg de suelo, en una zona aledaña a la empresa CVG Bauxilum, ubicada al norte del Edo. Bolívar, en la localidad de Palital, Edo. Anzoátegui (coordenadas: N509180, E920371) (figura 9), debido a que la logística de traslado de los lodos rojos a ésta área donde están localizados los suelos sería más sencilla. Antes de realizar el montaje de los ensayos la muestra de suelo fue homogeneizada por cuarteo.



Figura 9. Recolección de muestras de suelos en la localidad de Palital, Edo. Anzoátegui.

Planta vetiver (*Chrysopogon zizanioides*)

Las plantas fueron suministradas por el Prof. Oscar Rodríguez de la Facultad de Agronomía de la Universidad Central de Venezuela en Maracay, Edo. Aragua (figura 10). Fueron necesarias 27 plántulas (o esquejes) de la especie para la elaboración de los ensayos. Un mes antes de sembrar la planta en cada ensayo, fue realizado un previo enraizamiento de la especie en un sustrato arenoso (que es removido con facilidad al realizar la trasplantación) (figura 11), debido a que el primer mes de crecimiento de la planta es lento y no son observados cambios notables en su crecimiento, condición que fue necesaria para evaluar su progreso en los experimentos.



Figura 10. Búsqueda de las plantas en la Facultad de Agronomía de la UCV.



Figura 11. Etapa de enraizamiento.

Preparación de los ensayos

La investigación comprendió nueve ensayos de 3,7 kg cada uno aproximadamente (figura 12), que fueron realizados por triplicado más un control sin planta, estos estuvieron contenidos en recipientes plásticos de alrededor 4500 cm³, tenían agujeros en el fondo para permitir la salida de agua. Los ensayos incluyeron los controles de suelo ácido de sabana, lodos rojos proveniente de la bomba GEHO neutralizados con salmueras marinas y lodos

rojos provenientes de la laguna 3C sin neutralizar, además de las mezclas de suelos con lodos rojos neutralizados y con lodos rojos sin neutralizar en las proporciones de 2%, 5% y 10% en peso (Apéndice B), en cada uno fue sembrado una plántula de vetiver (figura 13), estos fueron regados diariamente de lunes a viernes con aproximadamente 78 mL de agua destilada desde el 30/07/2014 hasta el 11/11/2014, para dar un total 104 días de duración del experimento. La cantidad de agua destilada que le fue agregada a cada ensayo fue calculada de acuerdo al área del recipiente plástico que lo contenía (168 cm²) y a la precipitación promedio anual del Edo. Bolívar que varía entre 1026 mm en la zona norte y deltaica, y 2340 mm en el resto del estado según Rodríguez et al. (2011).

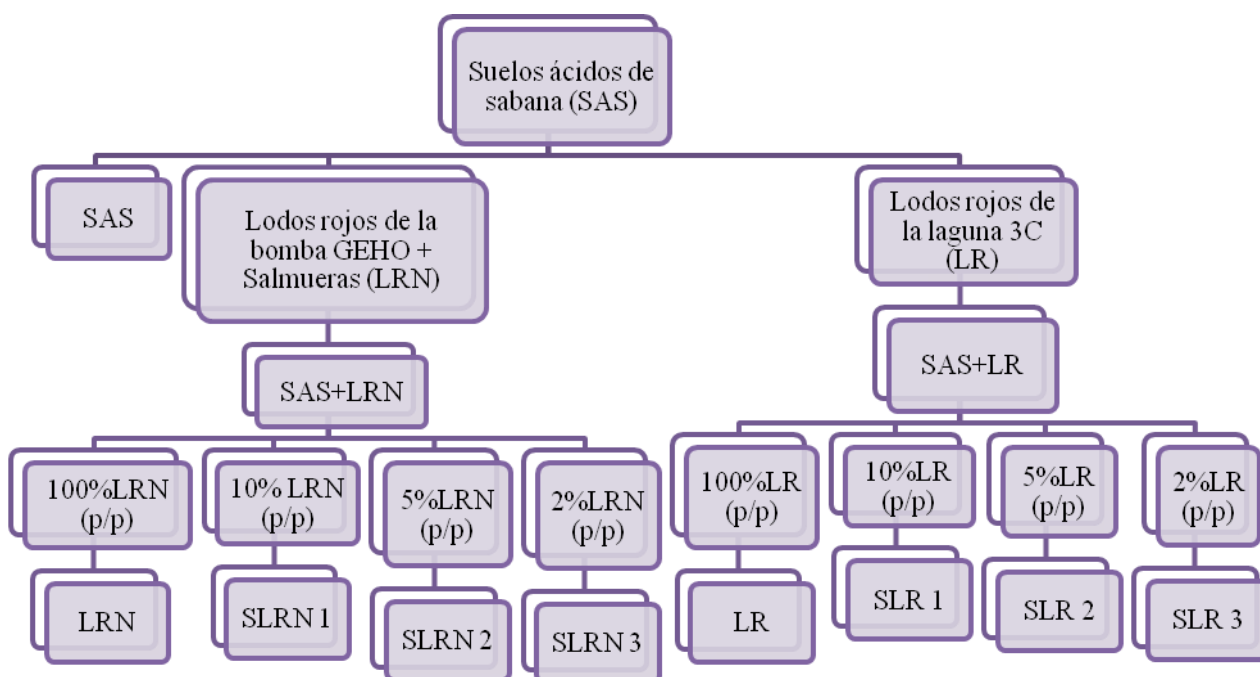


Figura 12. Esquema de los ensayos experimentales.



Figura 13. Ensayos experimentales.

Los primeros 12 días del experimento los ensayos estuvieron bajo condiciones de semi-sombra, esta condición es importante los primeros días luego de que es realizada la trasplatación, para que la planta pueda adaptarse al nuevo sustrato. Posterior a estos días debido a la intolerancia de la planta a la sombra, los ensayos fueron colocados al sol en una especie de invernadero que los protegía de la lluvia y otros factores externos hasta que culminó la experiencia (figura 14).



Figura 14. Montaje final del experimento.

Para analizar los sustratos a través del tiempo fueron colectadas 6 submuestras de cada ensayo en tres tiempos diferentes, antes de sembrar las plantas (tiempo 1), a los 48 días de sembrada la planta (tiempo 2) y a los 104 días (tiempo 3) que fue cuando finalizó el

experimento. Para ello fue empleado un tubo de vidrio de 1 cm de diámetro y 30 cm de largo aproximadamente, se seleccionaron tres puntos de muestreo al azar en los ensayos, y fue realizada dos perforaciones en cada punto, obteniendo una submuestra de los primeros 12 cm del sustrato aproximadamente (figura 15).



Figura 15. Colección de submuestras en los ensayos.

ANÁLISIS QUÍMICO DE LAS MUESTRAS

Para poder estudiar los cambios que ocurren en las mezclas, fue determinado en cada ensayo el pH, conductividad eléctrica (CE), concentración de los elementos C, N, P, K, Mg, Fe, Na, Al y la mineralogía de las muestras, antes de sembrar la planta, transcurrido mes y medio de la plantación, y después de 104 días.

pH y conductividad

Estas propiedades fueron determinadas mediante un medidor de pH y conductividad, en una 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).

Determinación de Al, Fe, K, Mg y Na mediante la técnica de espectroscopia de absorción atómica (AA) y emisión atómica (EA)

Los elementos mayoritarios como Al, Fe y Mg fueron determinados mediante la técnica de espectroscopia de absorción atómica, K y Na fueron determinados por la técnica de espectroscopia de emisión atómica, mediante el equipo PerkinElmer A. Analyst 200 Atomic Absorption Spectrometer, para ello es llevado a cabo una digestión ácida parcial, de acuerdo al método 3050b de la US EPA (1996) (figura 16), el cual consiste en un ataque químico de la muestra con ácido nítrico (HNO_3) y ácido clorhídrico (HCl) en una relación 3:1 (HNO_3 :HCl) y por último es agregado una alícuota de peróxido de hidrógeno (H_2O_2). Este método proporciona la extracción de la mayoría de los elementos que son móviles y disponibles en el medio ambiente, es considerado adecuado para la recuperación del total de metales pesados en suelos y es usado para determinar la máxima concentración elemental disponible para las plantas (Vercoutere et al., 1995).

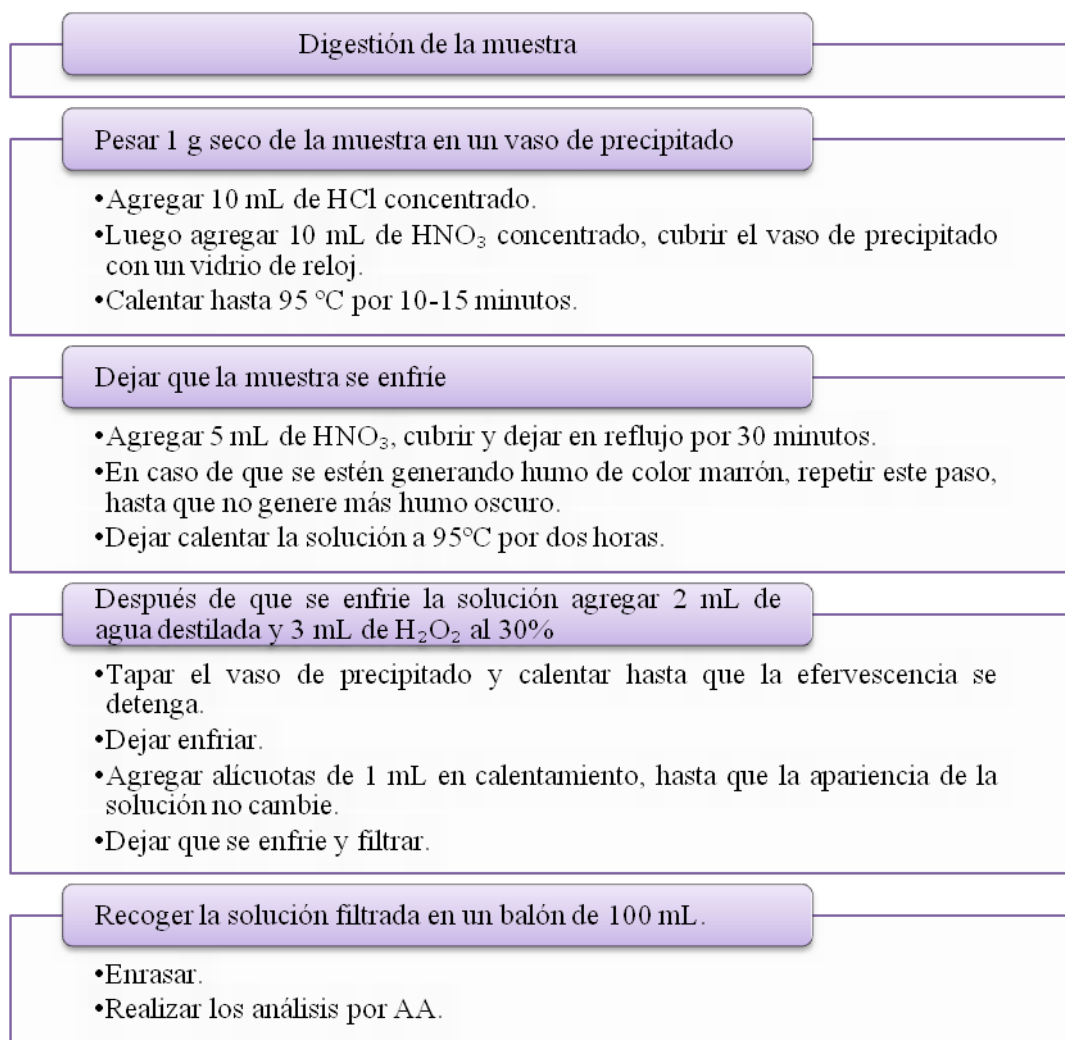


Figura 16. Esquema experimental para la digestión de la muestra. Tomado de US EPA (1996).

Determinación de N total mediante el método Kjeldahl

El N total en las muestra fue determinado mediante el método Kjeldahl, en el que todo el nitrógeno orgánico es reducido a amoníaco (Romero, 1997). Para el presente proyecto de investigación, el método Kjeldahl modificado por Allen et al. (1968) (Laboratorio de Estudios Ambientales, 1993), fue nuevamente modificado debido a la naturaleza de los suelos que son infértiles y con pocos nutrientes, y de los lodos rojos en los cuales el nitrógeno es ausente; es por ello que se incrementó cuatro veces la cantidad de muestra indicada en la metodología y fue duplicado la cantidad de reactivos necesarios para

llevar a cabo la digestión, con la finalidad de aumentar el amoníaco en solución y tener la posibilidad de cuantificar el nitrógeno.

La primera parte de la metodología consiste en la digestión de la muestra (figura 17 y 18) con ácido sulfúrico concentrado (H_2SO_4) en un tubo digestor, que es colocado en el digestor y aumentando gradualmente la temperatura, iniciando la digestión a 90°C por 30 min, luego se incrementa la temperatura a 180°C por 30 min y por último es aumentada la temperatura 270°C por otros 30 min. Posteriormente es añadido lentamente peróxido de hidrógeno concentrado (H_2O_2), y es aumentada la temperatura hasta 360°C por 90 min. La segunda parte corresponde a la determinación de N total (figura 19 y 20), para lo que es añadido NaOH (35%) para proceder a la destilación, en el extremo de salida del condensado debe haber una fiola que contenga ácido bórico (H_3BO_3 al 4%) con 5 gotas del indicador mixto (mezcla relación 1:5 de rojo de metilo y verde de bromocresol), luego el destilado es titulado con una solución de ácido clorhídrico (HCl 0,01 M). Mediante los valores obtenidos en la titulación es calculado el % total de nitrógeno en la muestra.

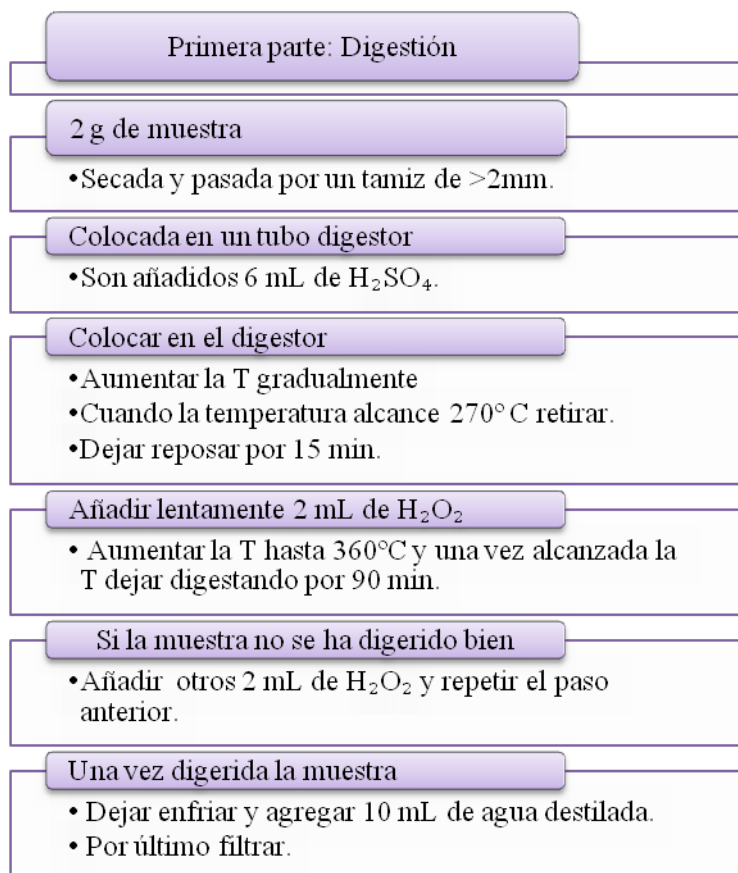


Figura 17. Esquema experimental para digestión de la muestra. Tomado y modificado de Laboratorio de Estudios Ambientales (1993).

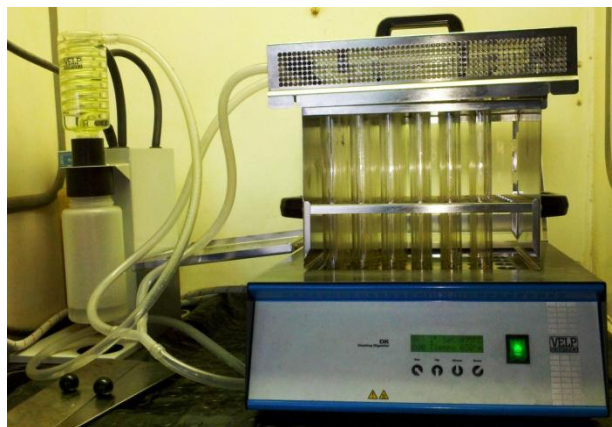


Figura 18. Digestión ácida de las muestras.

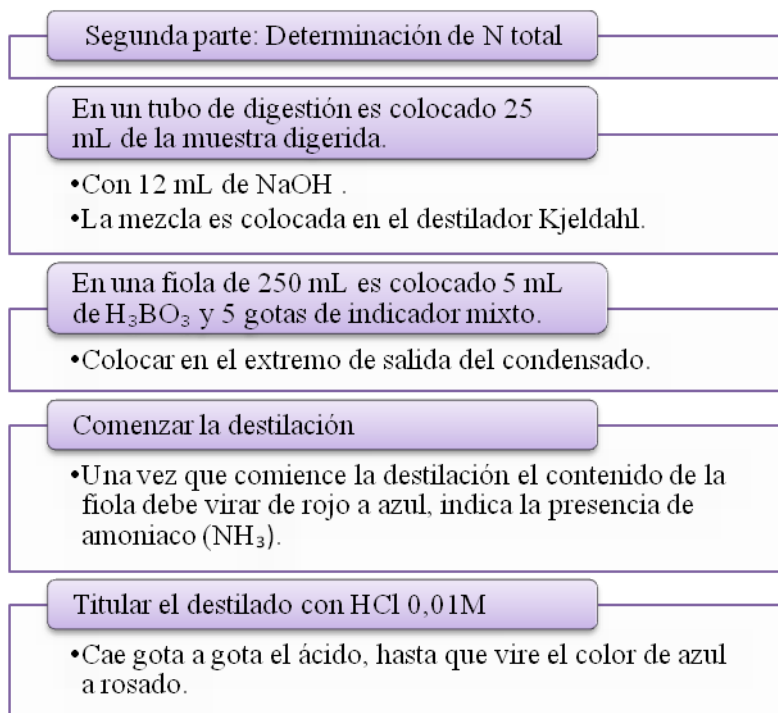


Figura 19. Esquema experimental para determinación de N total. Tomado de Laboratorio de Estudios Ambientales (1993).



Figura 20. Destilación y titulación de la muestra.

Determinación de P total mediante absorción molecular en el espectro UV y visible

La concentración de P total en las muestras fue determinada mediante un espectrofotómetro, con una longitud de onda de 880nm. La metodología de digestión de la muestra es la misma que la empleada para la determinación de N total (figura 17). La metodología que fue usada para la determinación de P total en solución es la de Watanabe y Olsen (1965) (figura 21 y 22), que está basado en la reducción del complejo fosfomolibdato de amonio con ácido ascórbico, en presencia de antimonio; el complejo coloreado que se forma es estable por 24 horas.

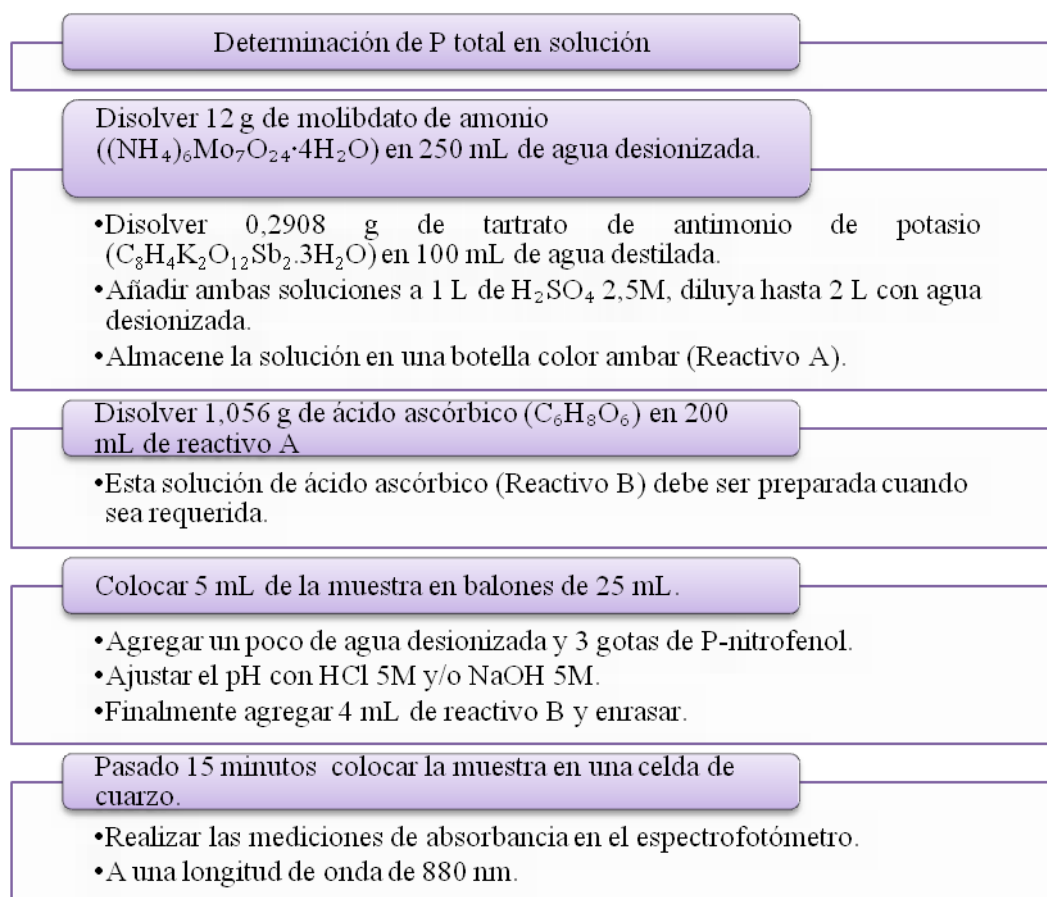


Figura 21. Esquema experimental para la determinación de P total. Tomado de Watanabe y Olsen (1965).



Figura 22. Determinación de P total en las muestras.

Determinación C total mediante analizador elemental LECO C-144

El análisis elemental está basado en la oxidación a elevadas temperaturas de los compuestos orgánicos contenidos en la muestra (de aproximadamente 0,175g), que transforman al carbono en moléculas gaseosas, dióxido de carbono (CO_2), que es detectado por absorción molecular en el espectro infrarrojo (IR), el carbono es reportado en porcentaje del elemento referido a la cantidad de la muestra inicial. Para que ocurra combustión completa de la muestras es requerido agregar óxido de tungsteno (WO_3) como catalizador (Valcárcel y Cárdenas, 2000; Skoog, et al., 2001).

Determinación de la mineralogía mediante difracción de rayos X (DRX)

Las distintas fases mineralógicas presentes en las muestras de suelos, lodos rojos neutralizados, lodos rojos sin neutralizar y las mezclas fueron determinadas con el equipo de Difracción de Rayos X Philips equipado con un tubo de cobalto, mediante el método del polvo. Para llevar a cabo este método las muestras fueron pulverizadas con el equipo Fritsch Pulverisette Analysette Laborette (que consta de un mortero y esfera pulverizadora de ágata) (figura 23), hasta obtener un polvo fino y homogéneo, en el cual los cristales están orientados en todas las direcciones posibles (Skoog et al., 2001).



Figura 23. Pulverizador Fritsch Pulverisette Analysette Laborette.

Determinación de humedad (%H₂O)

Para establecer si hubo un aumento en la retención de agua de los suelos gracias a la aplicación de los lodos rojos, se procedió a determinar la humedad en las submuestras tomadas al finalizar el experimento. Fue empleado el detector de humedad OHAUS marca REG (figura 24), en el que se debe ajustar la potencia a 4 watts, pesar la muestra en un crisol de porcelana (llevado a peso constante) y ajustar el tiempo necesario hasta que la masa de la muestra no varíe, en el caso de las muestras SAS, SLRN 3 y SLR fueron necesarios 15 min para que perdieran la humedad, para las muestras LRN 35 min y las muestras LR 25 min.



Figura 24. Detector de humedad OHAUS.

Crecimiento del vetiver

Para evaluar la fertilidad de las mezclas fue empleado el *Chrysopogon zizanioides* (vetiver), al cual le fueron cuantificados parámetros de crecimiento como: longitud de las raíces y hojas, número de brotes nuevos y peso de la planta. La longitud de las raíces y de las hojas fue medida por separado, para realizar las mediciones de longitud se tomaron las raíces y las hojas con la mano, estas fueron elongadas y medidas con una cinta métrica. El número de brotes nuevos fueron cuantificados en cada ensayo a medida que se iban apareciendo los nuevos brotes y el peso de la planta fue cuantificado antes de sembrarla en las mezclas y al finalizar el experimento, obteniendo así el porcentaje ganancia o pérdida de masa.

TRATAMIENTO DE DATOS Y ERRORES

Cada ensayo fue realizado por triplicado para poder evaluar la reproducibilidad y confiabilidad de los datos; mediante el cálculo de la media, desviación estándar y coeficiente de variación de los datos fue determinada la variabilidad de los mismos, empleando el programa Microsoft Excel 2007. Para determinar los parámetros de calidad del método fue calculado la sensibilidad de calibrado, el límite de detección y el límite de cuantificación del método. Y por último, la exactitud del método analítico fue evaluada mediante el análisis de patrones de referencia una bauxita dominicana de ALCOA SRC-6 para los elementos Al, Fe, Mg, K y Na y una muestra de suelo LECO PART NO. 502-309 para N (para C y P no se pudo evaluar la exactitud del método debido a que no se contó con patrones de referencia).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

A continuación serán presentados y discutidos los resultados obtenidos mediante el análisis químico y mineralógico de las mezclas de lodos rojos (neutralizados con salmueras marinas y sin neutralizar) con suelos ácidos de sabana y controles (suelo y lodos rojos), así como la relación de estos análisis con el crecimiento y desarrollo del vetiver en cada uno de estos ensayos.

PROPORCIÓN ÓPTIMA DE MEZCLA DE SUELOS Y LODOS ROJOS

La proporción óptima de mezcla de lodos rojos con suelos ácidos de sabana fue escogida basándose en el crecimiento y desarrollo de la planta vetiver, obteniendo al finalizar el experimento (104 días después) 100% de supervivencia para la mezcla de 2% en peso de lodos rojos neutralizados con suelos ácidos de sabana (SLRN 3). Para las mezclas de lodos rojos sin neutralizar con suelos ácidos de sabana, aunque ninguna planta sobrevivió, la proporción que tuvo mayor éxito fue la de 2% (SLR 3), en las cuales las plantas tuvieron mayor tiempo de supervivencia en comparación a las proporciones de 5 y 10%, obteniendo para dos réplicas que las plantas sobrevivieron durante 44 días y la tercera replica sobrevivió por 65 días (tabla 6).

Tabla 6. Tiempo de supervivencia de las plantas.

Muestra	Tiempo de supervivencia (días)
LRN 1, LRN 2, LRN 3	13
LR 1, LR 2, LR 3	26
SLR 1.1, SLR 1.2, SLR 1.3	26
SLR 2.1, SLR 2.2, SLR 2.3	44
SLR 3.1, SLR 3.2	44
SLR 3.3	65
SLRN 2.1	75
SLRN 2.2	79
SLRN 2.3	82
SAS 1, SAS 2, SAS 3	104
SLRN 3.1, SLRN 3.2, SLRN 3.3	104

Fundamentado en el criterio de las proporciones óptimas de mezcla, fue reducido el número de muestras a analizar, escogiendo sólo las correspondientes a las mezclas de 2% en peso de lodos rojos (tanto neutralizados como sin neutralizar) con suelos ácidos de sabana, y sus respectivos controles (suelo y lodos rojos).

CRECIMIENTO DE LA PLANTA *Chrysopogon zizanioides* (vetiver)

Durante el desarrollo del experimento las plantas de los ensayos SAS y SLRN 3 fueron las que presentaron una mejor evolución (Apéndice C), afirmación basada en los parámetros de crecimiento evaluados para el vetiver (tabla 7).

Tabla 7. Parámetros de crecimiento determinados en el vetiver (*Chrysopogon zizanioides*).

Muestras	Porcentaje de pérdida de masa (%)	Incremento de la raíz ($\pm 0,1$ cm)	Incremento de tallo ($\pm 0,1$ cm)	Incremento de diámetro ($\pm 0,1$ cm)	Brotos nuevos
SAS 1	38,8 \pm 0,3	17,0	18,0	0,3	9
SAS 2	14,5 \pm 0,3	15,2	17,3	0,8	5
SAS 3	6,8 \pm 0,2	16,0	14,4	2,2	9
Intervalo	[6,8; 38,8]	[15,2; 17,0]	[14,4; 18,0]	[0,3; 2,2]	[5, 9]
SLRN 3.1	13,4 \pm 0,4	25,0	16,5	1,6	10
SLRN 3.2	6,6 \pm 0,3	14,5	16,0	1,6	7
SLRN 3.3	21 \pm 0,3	14,1	13,0	0,7	5
Intervalo	[6,6; 21,0]	[14,1; 25,0]	[13,0; 16,5]	[0,7; 1,6]	[5, 10]
SLR 3.1	45,3 \pm 0,3	3,5	14,5	0,1	3
SLR 3.2	34,9 \pm 0,3	4,3	9,8	-	4
SLR 3.3	43,6 \pm 0,3	4,7	7,0	-	5
Intervalo	[34,9; 45,3]	[3,5; 4,7]	[7,0; 14,5]	[0,0; 0,1]	[3, 5]
LRN 1	46,3 \pm 0,4	1,5	0,5	-	2
LRN 2	52,3 \pm 0,4	2,0	-	-	3
LRN 3	47,1 \pm 0,4	1,0	0,6	-	1
Intervalo	[46,3; 52,3]	[1,0; 2,0]	[0,0; 0,6]	-	[1, 3]
LR 1	32,9 \pm 0,4	4,5	0,5	-	2
LR 2	29,1 \pm 0,4	3,5	0,5	-	4
LR 3	37,4 \pm 0,4	5	0,2	-	2
Intervalo	[29,1; 37,4]	[3,5; 5,0]	[0,2; 0,5]	-	[2, 4]

En cada uno de los ensayos las plantas disminuyeron su masa (tabla 7), obteniendo que para las muestras LRN (figura 25), el porcentaje de pérdida fue mayor, esto podría estar poniendo de manifiesto el efecto tóxico del sodio presente en el lodo rojo neutralizado; en las muestras SLR 3 (figura 26) y LR (figura 27), todas estas plantas murieron en el transcurso del experimento. En el caso de los ensayos SLRN 3 (figura 28) y SAS (figura 29), las plantas se mantuvieron con vida, sin embargo, experimentaron una disminución en su masa, atribuido a los procesos de fitorremediación que son llevados a cabo por estas plantas, que en principio de acuerdo a Antiochia et al. (2007), tienden a disminuir la producción de biomasa, debido a que los metales pesados generan inhibición de enzimas, lo que consecuentemente tiene un efecto negativo en algunos procesos fisiológicos importantes para las plantas como la fotosíntesis.

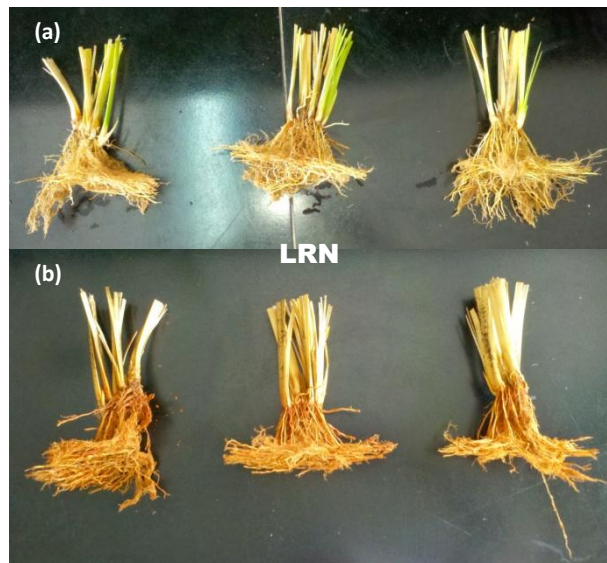


Figura 25. Plantas de los ensayos LRN (a) Tiempo 1, (b) Tiempo 3.



Figura 26. Plantas de los ensayos SLR 3 (a) Tiempo 1, (b) Tiempo 3.

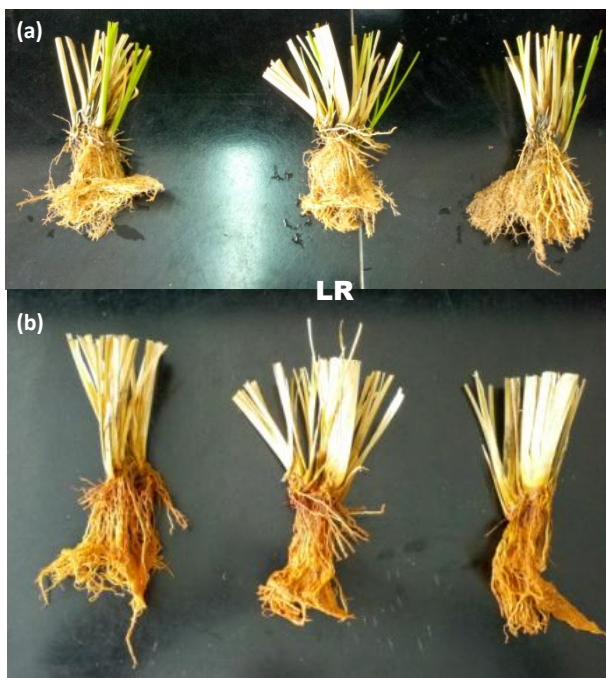


Figura 27. Plantas de los ensayos LR (a) Tiempo 1, (b) Tiempo 3.

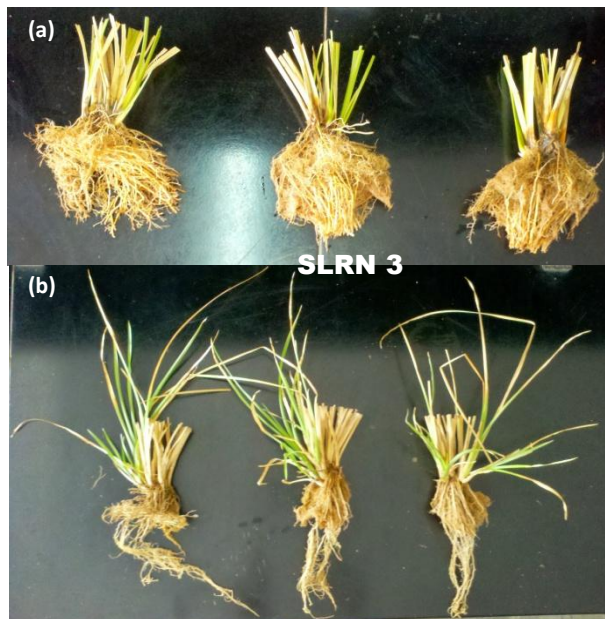


Figura 28. Plantas de los ensayos SLRN 3 (a) Tiempo 1, (b) Tiempo 3.

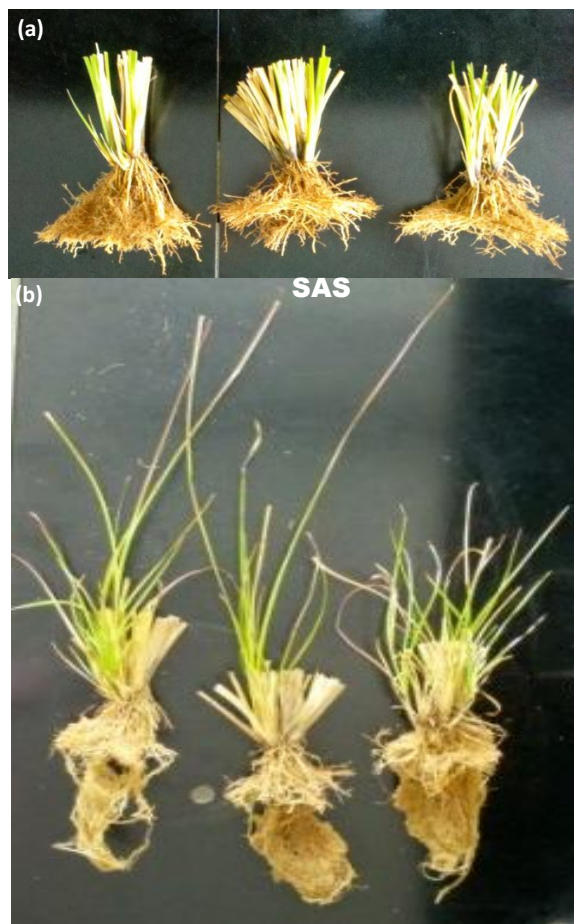


Figura 29. Plantas de los ensayos SAS (a) Tiempo 1, (b) Tiempo 3.

Por otro lado, la humedad del sustrato puede ser uno de los factores que genere las diferencias de masa entre las plantas vivas; en los ensayos SLRN 3 el sustrato retiene mayor humedad que en los ensayos SAS, mientras mayor sea la humedad del sustrato, la planta contenida en este estará más hidratada, lo que se traduce en un aporte masa a la planta.

A lo largo del desarrollo del experimento las plantas de las muestras SLRN 3 y SAS fueron las que presentaron mayor cantidad de brotes nuevos y con mayor desarrollo. En el caso de las plantas que murieron, las correspondientes a las muestras SLR 3 fueron las que presentaron un mayor número de nuevos brotes, lo cual apunta a que la proporción más exitosa para las mezclas con lodos rojos sin neutralizar, es la de 2%. Fue observado que para las proporciones de 5%, 10% y los controles de lodos rojos, el desarrollo de brotes nuevos fue menor, en algunos casos incluso inexistente. Así mismo, las plantas de los ensayo SAS y SLRN 3 presentaron el mayor aumento en la longitud de sus raíces dentro del intervalo [15,2; 17,0] y [14,1; 25,0] respectivamente, también el mayor incremento en la longitud del tallo en el intervalo [14,4; 18,0] para SAS y [13,0; 16,5] para SLRN 3, y aumentó el diámetro de la interfaz raíz-tallo en los intervalos para SAS [0,3; 2,2] y [0,7; 1,6] en el caso de la muestra SLRN 3. En las figuras 28 y 29, es observado que las plantas de los ensayos SLRN 3 tienen una morfología irregular con respecto a las plantas de los ensayos SAS, las hojas y las raíces tuvieron la tendencia a crecer ladeadas, con lo que es inferido que esta diferencia morfológica es debida a su contenido de lodos rojos neutralizados.

En resumen la presencia de brotes nuevos, crecimiento de raíces y tallo en las plantas, y el porcentaje de humedad retenido en los sustratos, apuntan a que la enmienda de relación 2% en masa de lodos rojos aplicados a suelos ácidos de sabana, es la relación más recomendable para planes de revegetación. Estos resultados concuerdan con los de Summers et al. (1996), Summers et al. (2001), Doye y Duchesne (2002), Yi et al. (2006), Udeigwe et al. (2009) y Feigl et al. (2012).

HUMEDAD EN LAS MUESTRAS

En la tabla 8 son presentados los valores de humedad obtenidos para las submuestras colectadas 104 días después de iniciado el experimento (tiempo 3), obteniendo que las muestras SAS son las que tienen menor porcentaje de humedad (Apéndice D), 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), por lo que los niveles de humedad son menores. Los ensayos SAS y SLRN 3, en los cuales las plantas permanecieron con vida, es observada una diferencia en el porcentaje de humedad entre la muestra y su respectivo control sin planta, las muestras con planta poseen un menor porcentaje de humedad debido a que la planta absorbe agua del sustrato. Las muestras SLRN 3 y SLR 3 tienen un mayor porcentaje de humedad que las muestras SAS, puesto que los sólidos tamaño arcilla añadidos a estas mezclas, le proporcionan al sustrato una mejor textura (menor porosidad), permitiendo una mayor retención de agua. Las muestras LRN son las que poseen mayor porcentaje de humedad, coincidiendo con el estudio de Marcano (2013), en el cual las muestras de lodos rojos neutralizadas con salmueras marinas eran las que poseían mayor humedad en comparación a las no neutralizadas, atribuyendo esta diferencia, a la presencia de fases minerales higroscópicas formadas durante la neutralización, como es la halita (NaCl) (figuras 32, 33 y 34), la cual adsorbe agua, lo que genera una mayor retención de agua en el sustrato.

Tabla 8. Humedad de las muestras al finalizar el experimento.

Muestra	Humedad (% H₂O)
SAS	<6
Control	6 ±1
SLRN 3	6 ±1
Control	13 ±2
SLR 3	13 ±2
Control	13 ±2
LRN	31 ±7
Control	31 ±7
LR	25 ±5
Control	25 ±5

MINERALOGÍA DE LAS MEZCLAS DE SUELOS Y LODOS ROJOS

En la tabla 9 es mostrada la mineralogía de las mezclas SLRN 3 y SLR 3, junto con sus respectivas muestras control, es decir, las muestras de suelos ácidos de sabana (SAS), lodo rojo neutralizado (LRN) y lodo rojo sin neutralizar (LR), las fases minerales detectadas por difracción de rayos X para todas las muestras fueron las mismas a través del tiempo. Es observado que en las mezclas, la fase mineral elucidada en el espectro de rayos X (figura 30), es cuarzo (SiO_2) componente mineralógico principal de los suelos, debido a que la proporción de lodos rojos en las mezclas es sólo del 2%, las señales de las otras fases minerales provenientes de los lodos rojos son muy bajas.

Tabla 9. Mineralogía de mezclas de suelos y lodos rojos.

Fases minerales	Muestras				
	SLRN 3	SLR 3	SAS	LRN	LR
Cuarzo (SiO_2)	✓	✓	✓	✓	✓
Halita (NaCl)				✓	
Gibbsita ($\text{Al}(\text{OH})_3$)				✓	✓
Hematita (Fe_2O_3)				✓	✓
Sodalita ($\text{Na}_4\text{Si}_3\text{Al}_3\text{O}_{12}\text{Cl}$)				✓	✓
Tychita ($\text{Na}_6\text{Mg}_2\text{SO}_4(\text{CO}_3)_4$)				✓	
Hidrotalcita ($\text{Mg}_6\text{Al}_2\text{CO}_3(\text{OH})_{16}\cdot 4\text{H}_2\text{O}$)				✓	
Anatasa (TiO_2)				✓	✓
Calcita (CaCO_3)					✓
Goethita ($\text{FeO}(\text{OH})$)				✓	✓

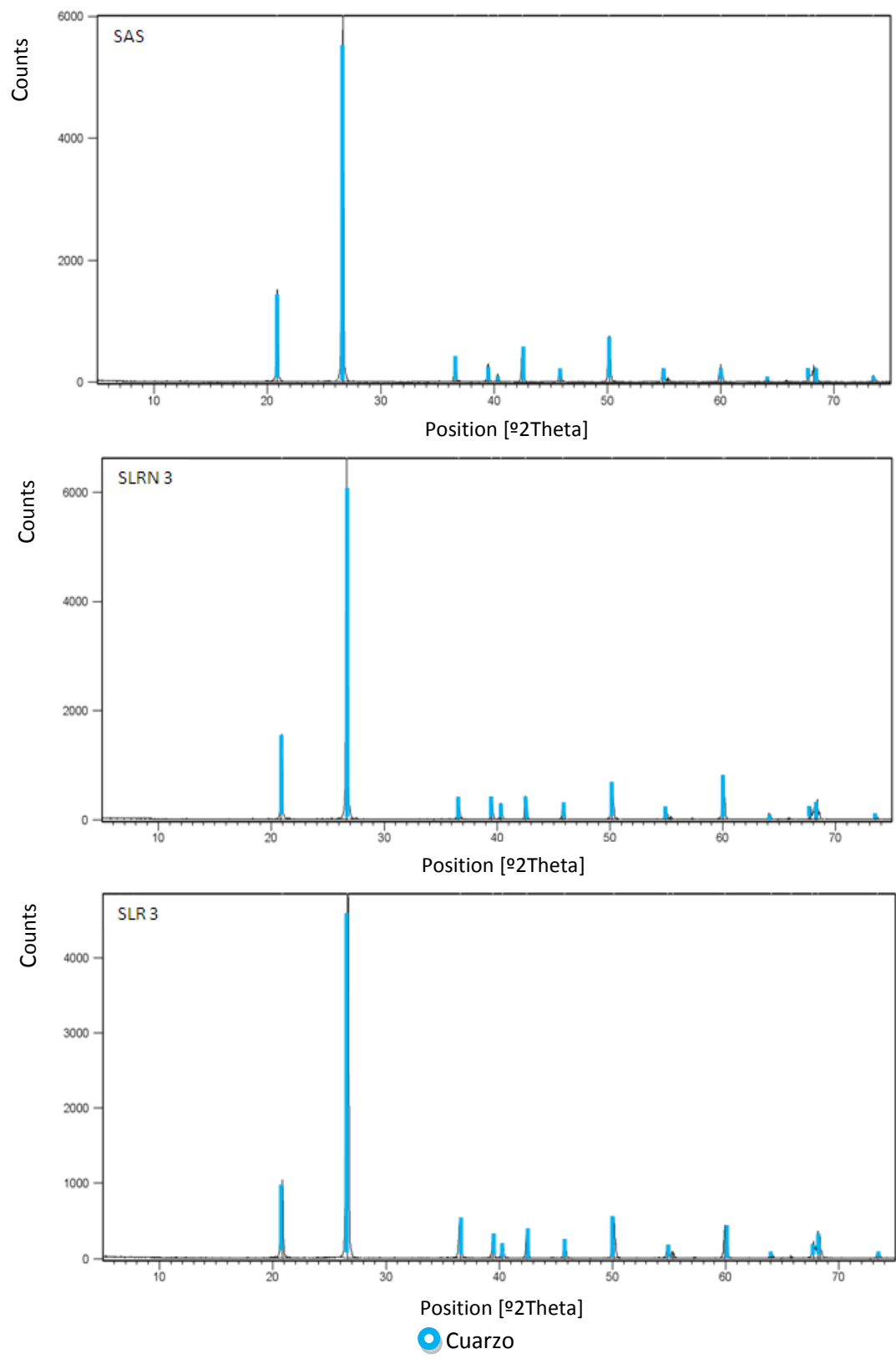


Figura 30. Difractogramas de las muestras SAS SLRN 3 y SLR 3.

Los lodos rojos sin neutralizar están compuestos por cuarzo, gibbsita, hematita, anatasa, sodalita, calcita y goethita como es observado en la figura 31, la intensidad para todas las fases minerales permanece constante del tiempo 2 al tiempo 3 (no se cuenta con el difractograma correspondiente al tiempo 1), excepto en el caso del cuarzo en el que la señal es más intensa en el tiempo 2, podría ser atribuida esta diferencia a la heterogeneidad de la muestra.

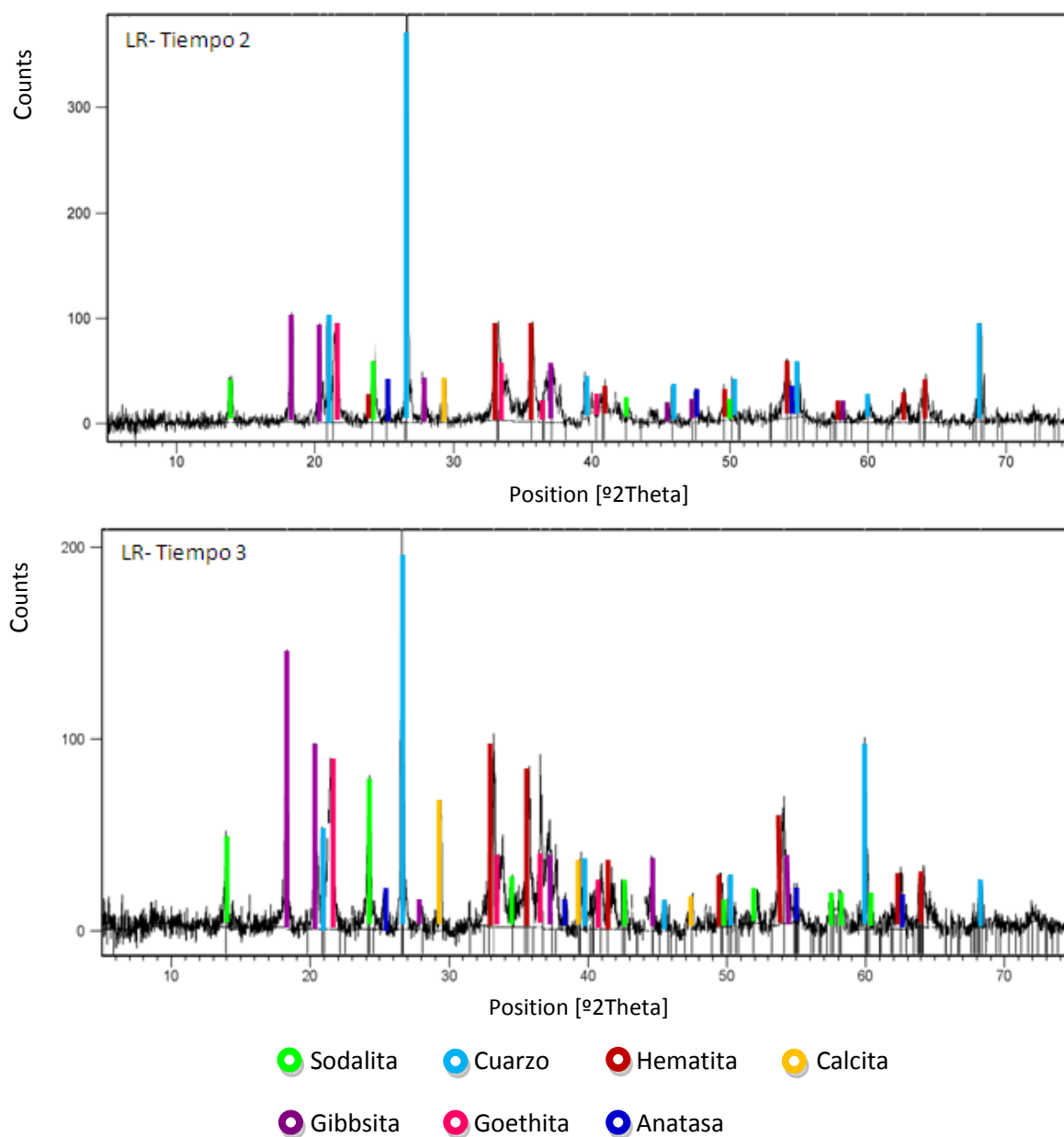


Figura 31. Difractograma de la muestra LR en el tiempo 2 y 3.

Las salmueras marinas aportan a los lodos rojos aniones (Cl^- , SO_4^{2-} y CO_3^{2-}) y cationes (enriquecidos en Mg^{2+} y Ca^{2+} , respecto al Na^+), que permiten la formación de nuevas fases minerales como halita, tychita e hidrotalcita (figura 32, 33 y 34), coincidiendo con los resultados reportados por Paradis (2007), Caccamo (2013), Marcano (2013) y Sarmiento (2013). A medida que transcurre el tiempo, el cloruro de sodio contenido en los ensayos LRN es disuelto, disminuyendo la intensidad de la señal para este mineral en el difractograma del tiempo 2 y tiempo 3, ocurriendo un enriquecimiento relativo en las otras fases minerales, por lo que su intensidad aumenta respecto a la halita.

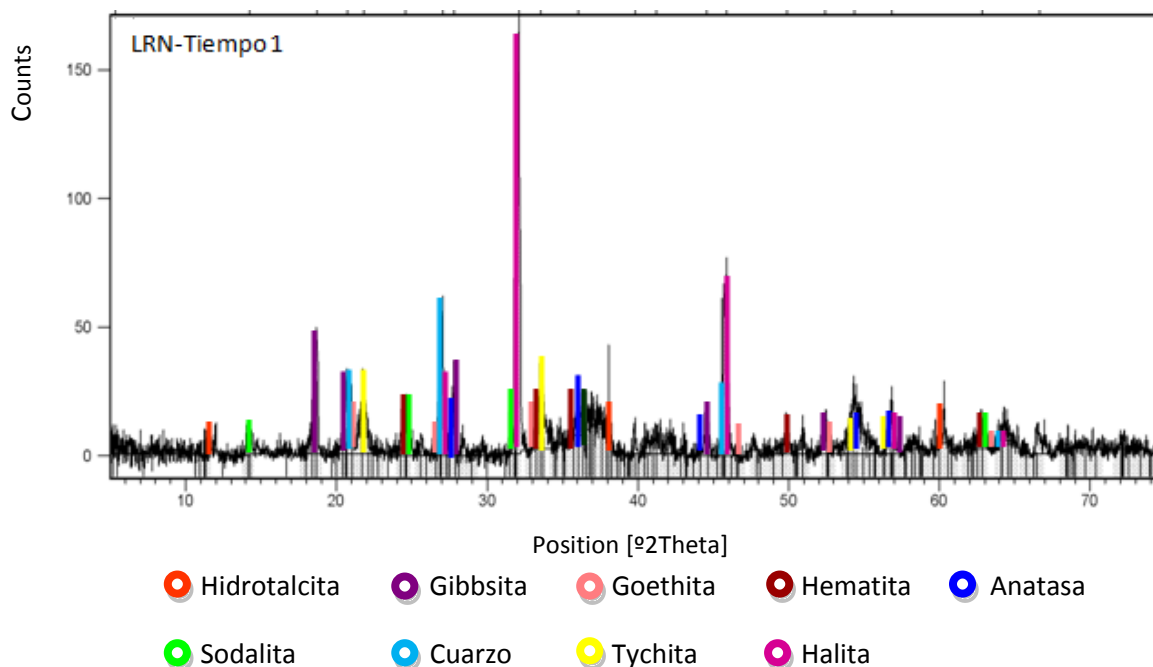


Figura 32. Difractograma de la muestra LRN en el tiempo 1.

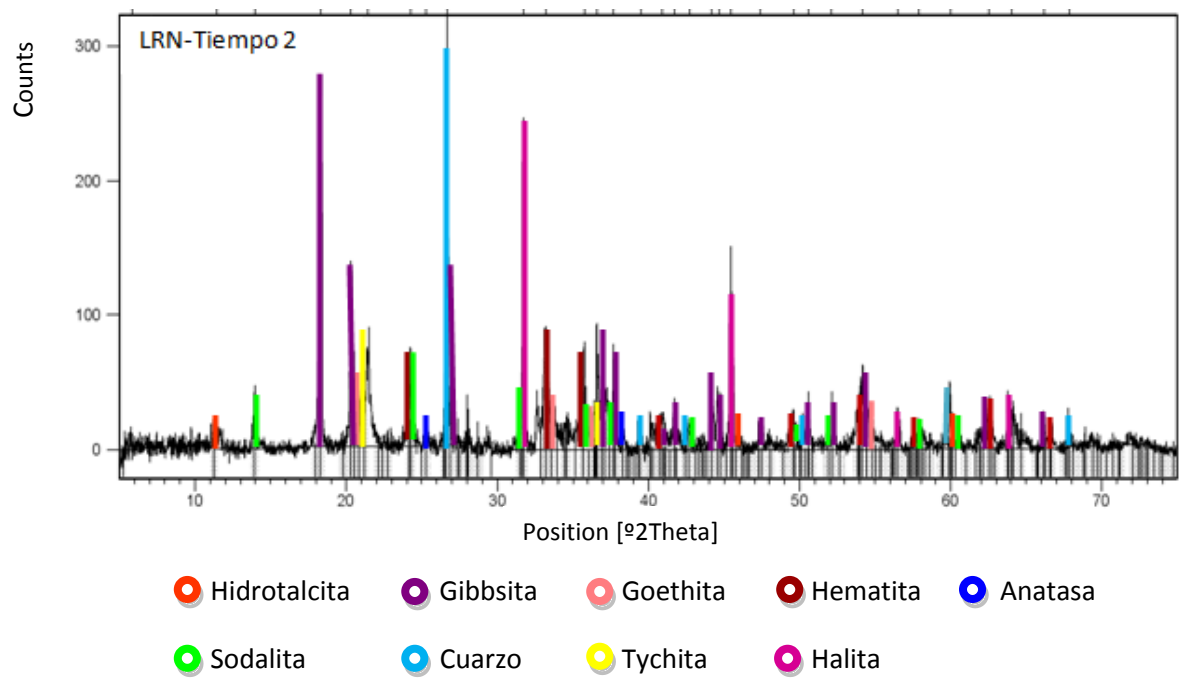


Figura 33. Difractograma de la muestra LRN en el tiempo 2.

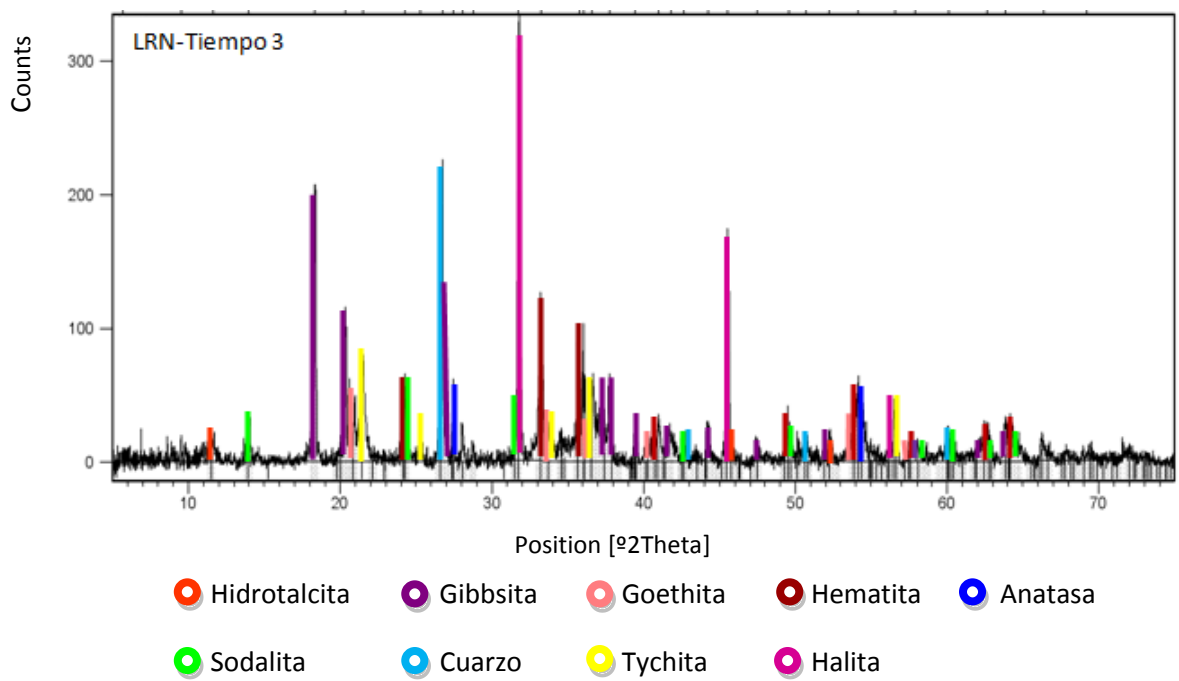


Figura 34. Difractograma de la muestra LRN en el tiempo 3.

Los difractogramas obtenidos para el residuo insoluble de los lodos rojos (tanto neutralizados como sin neutralizar) en agua regia (figura 35), revelan que están compuestos principalmente por cuarzo (SiO_2) y son elucidados picos correspondientes a la fase mineral anatasa (TiO_2), que tiene un porcentaje de 3% para el residuo de LR y 13% para el residuo de LRN, resultado que confirma la presencia de anatasa en los lodos rojos, que desde el punto de vista de la industria química y metalúrgica tiene una gran importancia, debido a que estos lodos rojos pueden ser tratados para la recuperación de Ti, metal de gran valor económico.

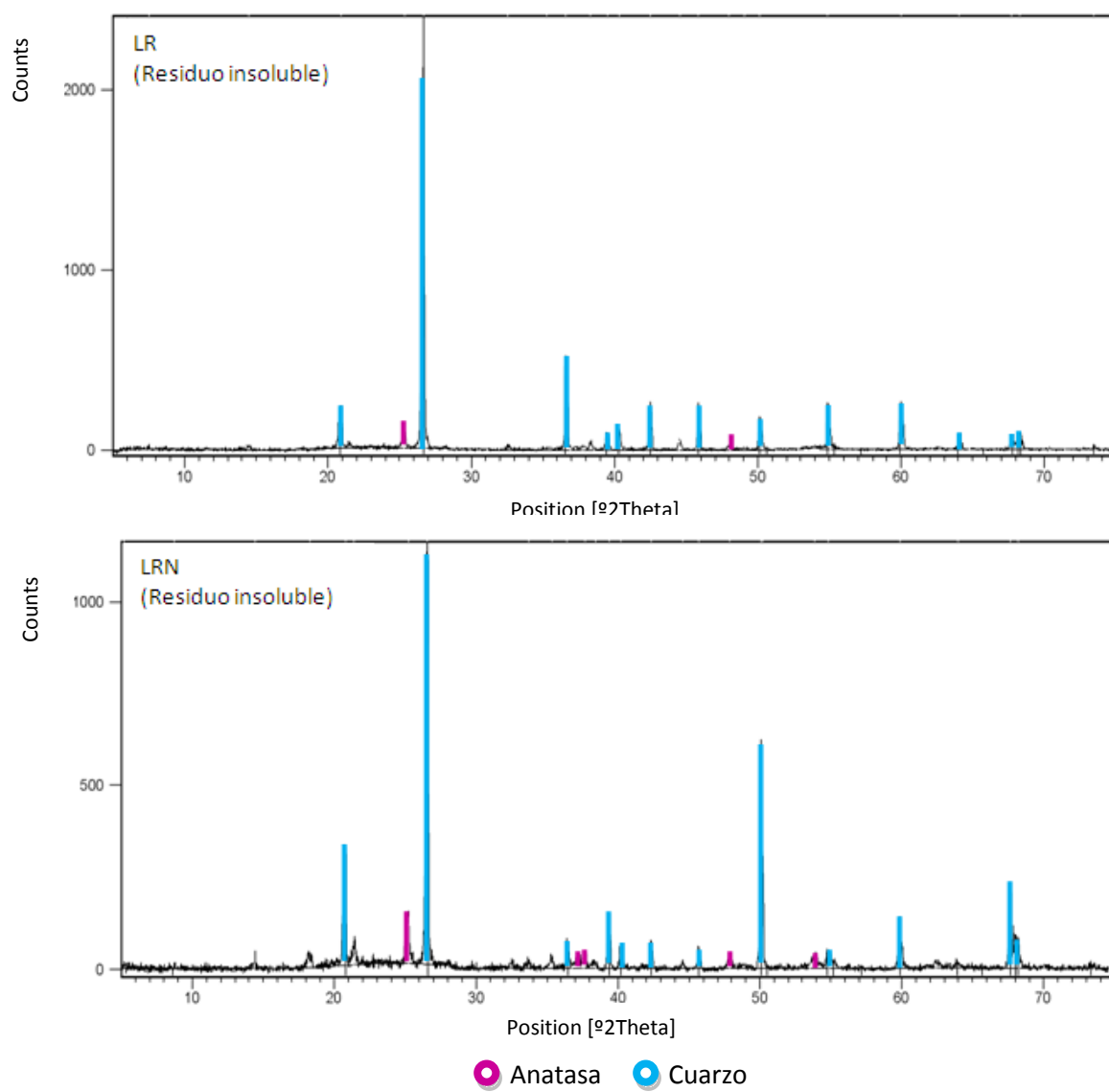


Figura 35. Difractogramas del residuo insoluble de las muestras LR y LRN en agua regia.

DETERMINACIÓN DE pH Y CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA

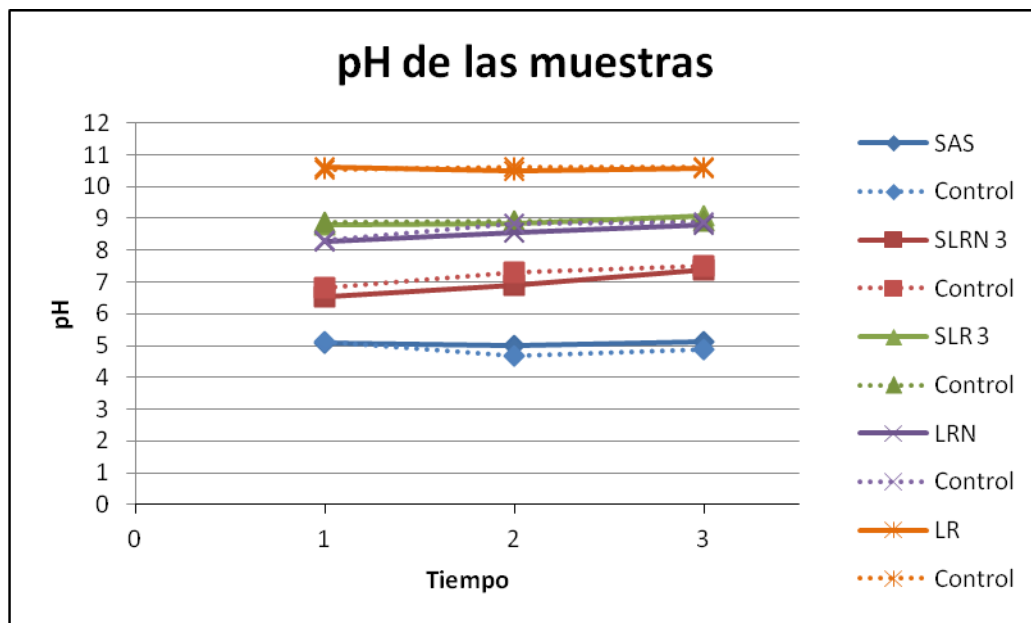
El pH inicial de los lodos rojos colectados en la bomba GEHO fue de 13,03, luego de su neutralización con salmueras marinas (proporción 4:1 m/v), separación por gravedad de la fracción sólida y secado, el pH del lodo rojo resultante fue de 8,29, valor que está dentro de los límites permitidos (6-9), de acuerdo a la Gaceta Oficial N° 5021 (1995) de la normativa ambiental venezolana, establecida para el control de vertido de sustancias al medio ambiente. Al agregar la enmienda de lodo rojo neutralizado a los suelos ácidos resultó en un incremento de pH de 5,01 a 7,41 en el sustrato, valor que está dentro de los límites permitidos ambientalmente, y más importante aún, es un valor comúnmente encontrado en suelos fértiles.

En el caso de la enmienda con lodo rojo proveniente de la laguna 3C sin neutralizar de pH 10,62; incrementó el pH del suelo hasta 9,10 al finalizar el experimento (Apéndice E). Este valor contrario a lo obtenido al mezclar lodos rojos neutralizados con suelos ácidos en la misma proporción, se encuentra en el límite de lo permitido por la normativa ambiental y desde el punto de vista de fertilidad, si bien es un valor que puede encontrarse en algunos suelos productivos el pH encontrado en la mezcla con lodos rojos neutralizados es mucho más deseable, puesto que a pH neutro hay mayor solubilidad de nutrientes esenciales como N, P, K, Ca y Mg que son absorbidos por las plantas (Casanova, 2005).

Variaciones en el pH

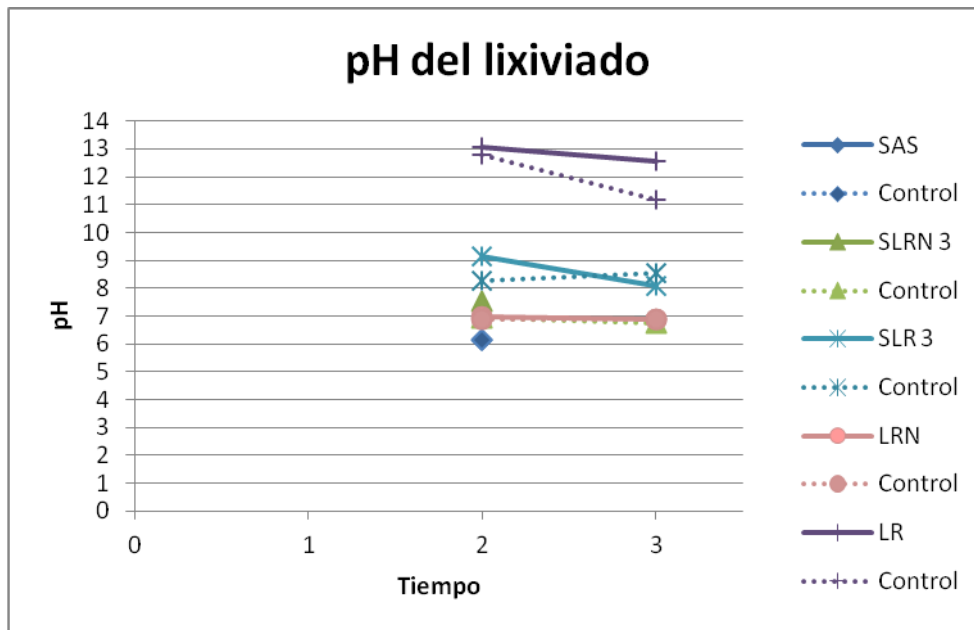
En la gráfica 1 es observado que los valores de pH para las muestras SAS y SLRN 3 (en las cuales las plantas sobrevivieron) se mantienen más cercanos a la neutralidad respecto a sus controles sin planta; para los ensayos SAS el pH es mayor que en el control sin planta, para el caso de los ensayos SLRN 3 el pH disminuye en comparación a su control sin planta, en ambos casos pareciera ser que la planta tiene un efecto sobre el pH del sustrato, esta inferencia se apoya con lo expuesto por Casanova (2005), quien afirma que estudios realizados con variedades de plantas tolerantes a la acidez pueden aumentar el pH en soluciones, mientras que las plantas más sensibles mantienen el mismo pH o lo

disminuyen, este aumento en el pH es inducido en la rizosfera de la planta. Apoyando esto en el presente trabajo se observó que para las muestras SLR 3, LRN y LR no hubo variaciones de pH en comparación con sus respectivos controles sin planta, cabe destacar que las plantas contenidas en estos ensayos murieron durante el desarrollo del experimento, por lo que no pudieron ejercer un efecto sobre el sustrato en que estaban contenidas.



Gráfica 1. pH de las muestras de suelo, lodos rojos y mezclas.

En la gráfica 2 es mostrado el pH del lixiviado colectado 48 días después de iniciado el experimento (tiempo 2) y al finalizar (tiempo 3) (Apéndice F), es importante resaltar que para las muestras SLRN 3 el pH (6,8-7,5) está dentro de los límites permitidos ambientalmente, lo que es una ventaja adicional para esta proporción de mezcla escogida como óptima, apoyando su aplicación en un sistema natural, puesto a que desde el punto de vista de pH no generaría ningún impacto negativo sobre el suelo, cuerpos de agua y cualquier organismo vivo.



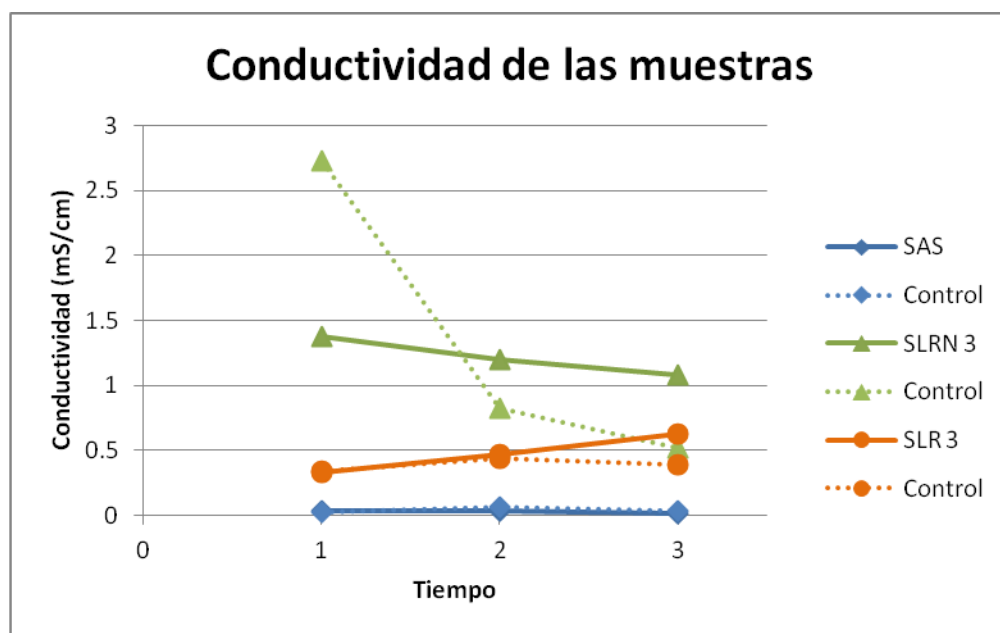
Gráfica 2. pH del lixiviado de las muestras de suelo, lodos rojos y mezclas.

Variaciones en la conductividad eléctrica

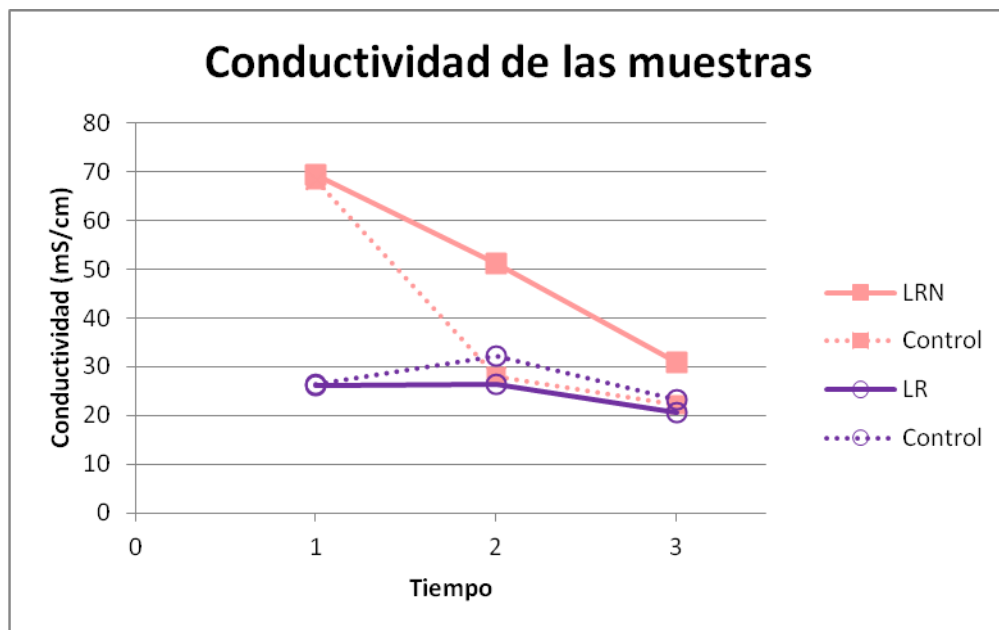
Con respecto a los valores de conductividad, al finalizar el experimento (tiempo 3) en el suelo ocurrió un incremento de 0,020 mS/cm a 1,1 mS/cm para las mezcla con lodos rojos neutralizados (SLRN 3) y 0,6 mS/cm para la mezcla con lodo rojo sin neutralizar (SLR 3). Las muestras SLRN 3 presentan un mayor incremento en la conductividad debido a las salmueras marinas, que aportan una alta concentración de sales solubles a los lodos rojos durante el proceso de neutralización. En la gráfica 3 es observado que para la muestra SLRN 3 la conductividad disminuye gradualmente con el transcurso del tiempo, contrastando con el control sin planta en el cual la conductividad tiene una disminución mucho más pronunciada variando de 2,7 mS/cm a 0,5 mS/cm (Apéndice E), esta diferencia puede ser atribuida a la acción de la planta, la absorción de agua por parte del vetiver conlleva a una menor humedad del sustrato, por lo que la tasa de precipitación de sales sería en estos casos mayor. Adicionalmente de acuerdo a la bibliografía la planta dependiendo del suministro de nutrientes y pH, sus raíces tienden a crecer verticalmente en los suelos, creando una matriz extensa con gran área superficial para tomar metales así

como nutrientes del sustrato (Srivastava et al., 2008), permitiendo la retención cationes en el sustrato por procesos de intercambio catiónico.

Los valores de conductividad eléctrica de las muestras SAS, SLRN 3 y SLR 3, de acuerdo a la escala de tolerancia de las plantas a la salinidad en *Diagnosis and Improvement of Saline and Alkali Soils* (1954), se encuentra dentro del rango de 0-2 mS/cm en el que el efecto de la salinidad es insignificante sobre las plantas y de 2-3 mS/cm que afecta sólo a los cultivos más sensibles, con esta información es posible inferir que para las muestras SLR 3, la conductividad no fue el factor que afecto de manera negativa el desarrollo de las plantas contenidas en estos ensayos. En el caso de las muestras LR y LRN (gráfica 4), sus valores de conductividad caen en el rango de salinidad extrema, superior a 16 mS/cm, en el cual sólo algunas especies de plantas muy resistentes a estas condiciones pueden desarrollarse, indicando que la salinidad fue uno de los causantes de la inhibición en el crecimiento del vetiver para estos ensayos.

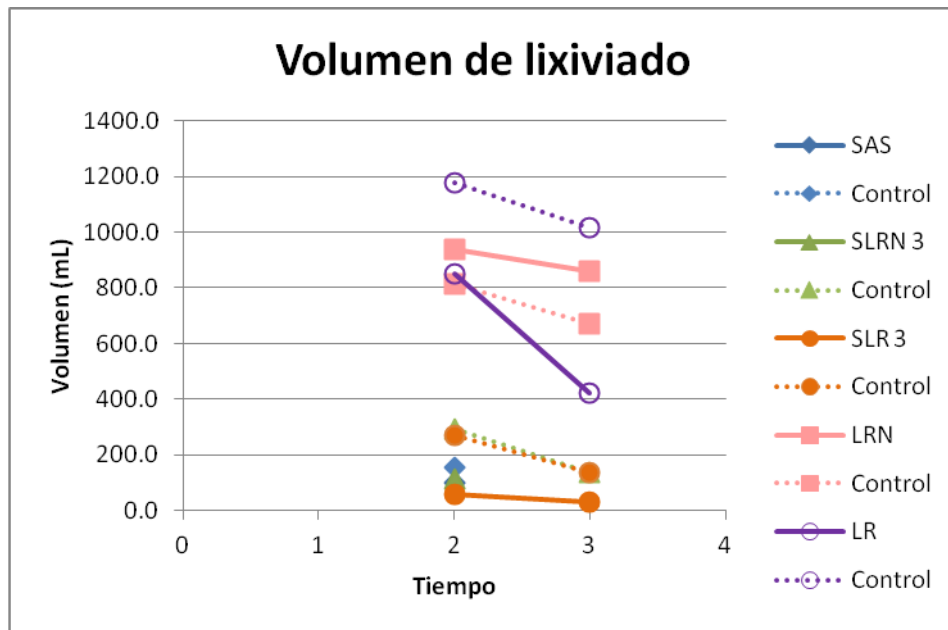


Gráfica 3. Conductividad eléctrica de las muestras de suelo y mezclas.



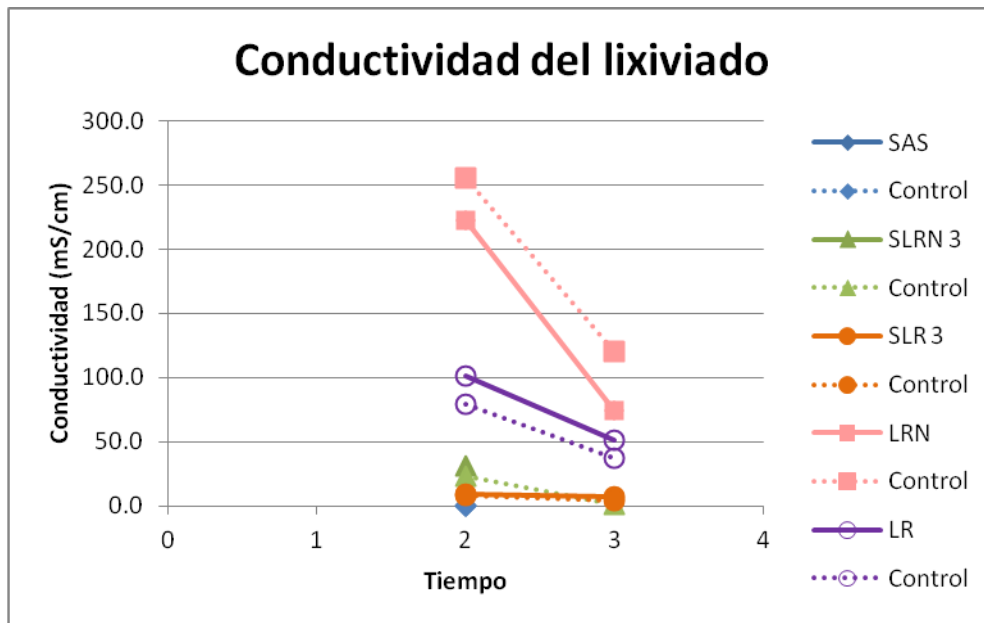
Gráfica 4. Conductividad eléctrica de las muestras de lodos rojos.

Las muestras LRN tienen la tendencia marcada a disminuir la conductividad eléctrica a medida que pasa el tiempo (gráfica 4), esta tendencia puede ser atribuida a que una de las sales responsables de esta alta conductividad eléctrica es el cloruro de sodio formado durante la neutralización del lodo rojo, la cual es una sal muy soluble, es por ello que existe una relación directa entre la cantidad de lixiviado generado (gráfica 5) y la conductividad eléctrica para esta muestra, lo mismo ocurre con la muestra LR, a diferencia que esta no está enriquecida en NaCl, por lo que la pendiente en la gráfica de la conductividad eléctrica vs. tiempo, para esta muestra es mucho más suave, manteniéndose prácticamente constante durante el desarrollo del experimento. Otro aspecto importante de la gráfica 5, es que para las muestras SAS y SLRN 3, sólo fue posible coleccionar el lixiviado de los ensayos en el tiempo 2, puesto a que a medida que las plantas iban creciendo la demanda de agua fue mayor, lo que no permitió la generación de lixiviado en el tiempo 3 (Apéndice F).



Gráfica 5. Volumen de lixiviado generado por cada sustrato a lo largo del experimento.

En la gráfica 6 es presentada la conductividad eléctrica del lixiviado generado por cada ensayo, la relación entre el volumen de lixiviado generado y la conductividad, indica para las muestras LRN y LR, que a medida que es generado mayor cantidad de lixiviado menor es la conductividad eléctrica, debido a que la concentración de sólidos disueltos disminuye con el aumento del volumen del lixiviado. Si es comparada la conductividad eléctrica de las muestras sólidas con la de los lixiviados, se observa que la conductividad en los lixiviados es mayor debido a que hay mayor disponibilidad de iones.



Gráfica 6. Conductividad eléctrica del lixiviado de las muestras de suelo, lodos rojos y mezclas.

Estos resultados indican que aunque la conductividad eléctrica en las muestras depende de las sales solubles presentes en el sustrato, también puede estar siendo controlada por la humedad de este, lo cual se evidencia en la correlación existente entre la conductividad y el volumen de lixiviado generado (gráfica 4, 5 y 6). Por otro lado, es propuesto que el vetiver tenga un efecto sobre el pH y conductividad el sustrato gracias a su rizosfera y mecanismos de absorción de metales y nutrientes, que a su vez promueven procesos de intercambio catiónico en el suelo.

COMPOSICIÓN ELEMENTAL DE LAS MEZCLAS DE SUELOS Y LODOS ROJOS

La solución del suelo es el medio de donde las plantas obtienen los nutrientes necesarios para su desarrollo, estos nutrientes son encontrados en forma iónica y pueden ser sorbidos o desorbidos (liberados) por componentes orgánicos e inorgánicos del suelo y precipitar (dependiendo del grado de saturación de la solución). Los iones presentes en la solución del suelo pueden ser transportados por agua subterránea, también por procesos de

escorrentía superficial, y a través de la evaporación y secado puede ocurrir movilización ascendente de los iones; los microorganismos pueden remover iones de la solución el suelo y cuando estos mueren y la materia orgánica es descompuesta, los iones son liberados nuevamente al suelo (Lindsay, 1979 en Sparks, 2003). Para tener una mayor comprensión y entendimiento de las reacciones y procesos que ocurren en el suelo como meteorización, biodisponibilidad, movilidad y el ciclo biogeoquímico de los nutrientes y compuestos tanto orgánicos como inorgánicos, es necesario una medida del factor de intensidad del suelo que no es más que la concentración de un ion en particular en el suelo (Sparks, 2003).

Carbono

En la tabla 10 es mostrada la concentración de C_T para las muestras de lodos rojos sin neutralizar (LR) a través del tiempo, la concentración de C_T en las muestras SAS, SLRN 3, SLR 3 y LRN no fue detectado (es menor a 0,5%, patrón de menor concentración en la curva de calibración) debido a la naturaleza de las muestras y la duración del experimento que no fue el suficiente para acumular materia orgánica al sustrato (Apéndice G). El carbono en las muestras LR proviene de la calcita, la concentración de carbonato no cambia a través del tiempo, debido a que la duración del experimento y al pH básico del sustrato, la disolución de la calcita (cuya constante de producto de solubilidad es $3,36 \times 10^{-9}$) no fue favorecida.

Tabla 10. Cuantificación de C_T en los suelos, lodos rojos y mezclas.

Tiempo	Muestra	C_T (%)
1	LR	1,3±0,1
	Control	1,2±0,1
2	LR	1,3±0,1
	Control	1,3±0,1
3	LR	1,14±0,05
	Control	1,08±0,04

Nitrógeno

Los reactivos necesarios para llevar a cabo la determinación de N_T en las muestras eran limitados, es por ello que se redujo el número de muestras a ser digeridas, escogiendo las muestras SAS 3, SLRN 3.2 y SLR 3.2, en las que el nitrógeno debería encontrarse en mayor concentración debido a que las plantas contenidas en estos sustratos fueron las que mostraron un mayor desarrollo. Mediante el método Kjeldahl no fue posible cuantificar el N total contenido en las muestras (tabla 11), por lo se concluye a partir de estos resultados, que para futuros trabajos debería ser empleado un método adecuado para determinar nitrógeno en cantidades traza.

Tabla 11. Determinación de N_T en las mezclas y suelo.

	Tiempo 1	Tiempo 2	Tiempo 3
Muestra	N_T (%)		
SAS	ND	ND	ND
SLRN 3	ND	ND	ND
SLR 3	ND	ND	ND

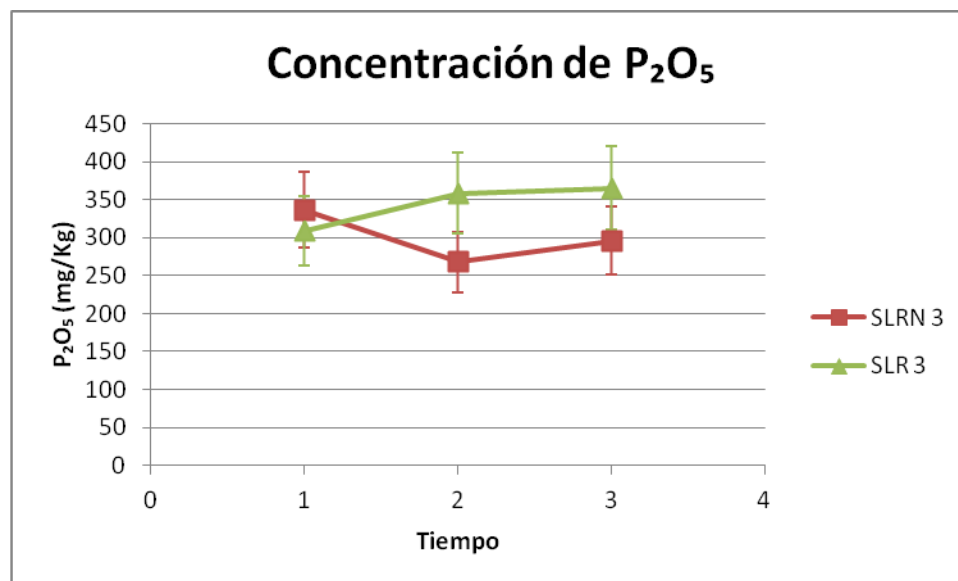
ND: No detectado

Fósforo

La concentración de fósforo total fue determinada en las muestras SAS, SLRN 3 y SLR 3, debido a limitaciones de la metodología empleada no fue posible cuantificar fósforo para las muestras LRN y LR, puesto a que las soluciones obtenidas en la digestión tenían una coloración amarilla, igual a la tonalidad del P-nitrofenol (indicador) a $pH > 4,5$, por lo que no fue posible ajustar el pH de la solución.

La concentración de P en la muestras SAS cayó por debajo del límite de detección (0,6mg/L), se presume que la fuente de fósforo en las muestras SLRN 3 y SLR 3 es alguna fase mineral de fosfato contenida en el lodo rojo, que debido a su baja concentración no fue detectada por rayos X (Apéndice I). En la gráfica 7 es mostrado que las diferencias de concentración de fósforo a través del tiempo para las muestras no son significativas, la

concentración está comprendida entre 300 y 350 mg/Kg de P_2O_5 aproximadamente en las muestras.



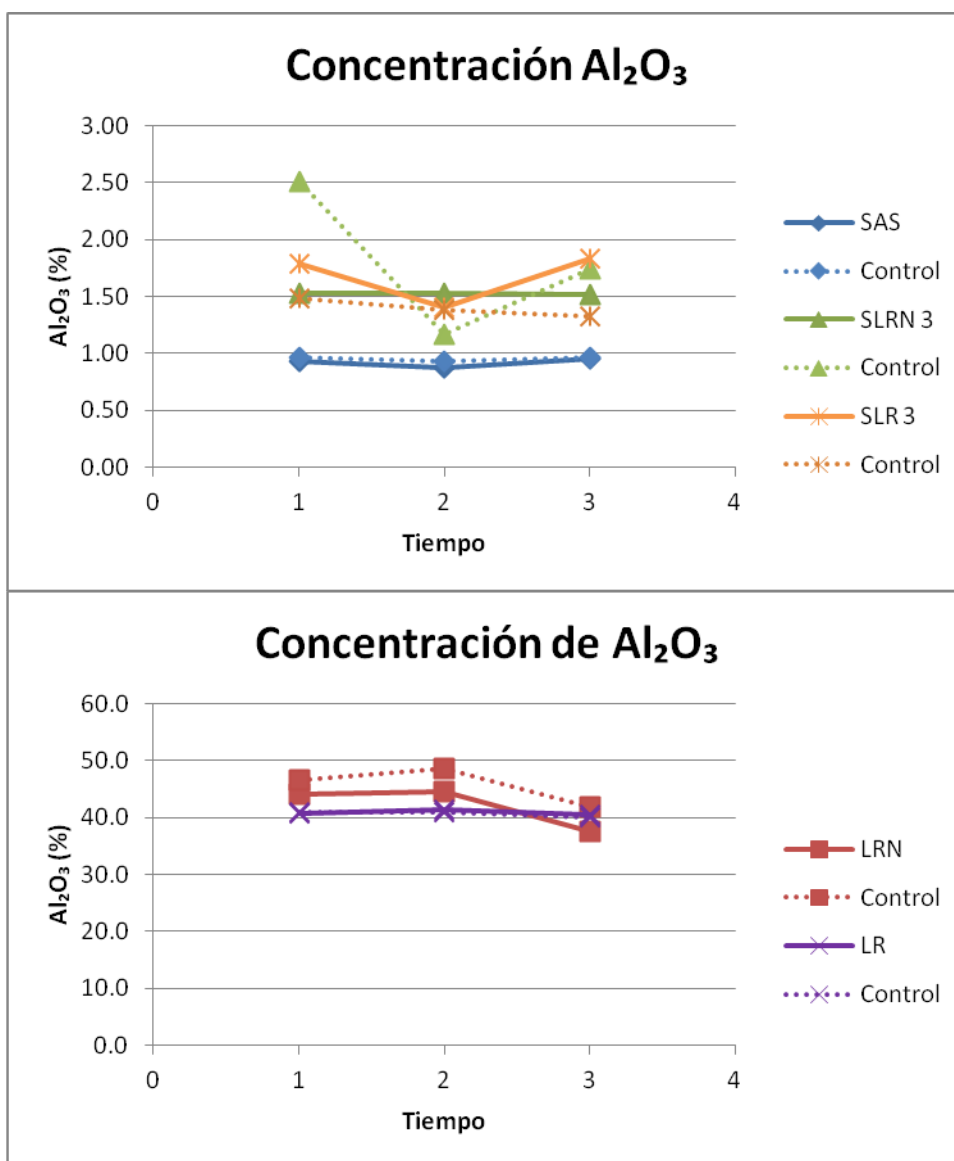
Gráfica 7. Concentración de P_T expresado como óxido a través del tiempo.

Aluminio

La retención de aluminio en la litosfera es extremadamente eficiente, alrededor de 99,9% de su ciclo ocurre en esta geosfera, siendo energéticamente favorecida su permanencia en la litosfera, la concentración de aluminio en solución es limitada por las fases minerales de baja solubilidad (Exley, 2003). La mineralogía, grado de cristalinidad y la reactividad de los productos de precipitación de Al^{3+} , son afectados por el pH, la mineralogía de los sedimentos tamaño arcilla y la concentración de ácidos orgánicos e inorgánicos del suelo (Casierra y Niño, 2007).

En la gráfica 8 es observado que la muestra SAS es la que posee menor concentración de Al 0,96% al finalizar el experimento, contenido probablemente en hidroxialuminosilicatos que no fueron elucidados por RX. Las muestras LRN y LR son las que poseen una mayor concentración de Al entre 40 y 50% (Apéndice J), la principal fuente de este elemento es la gibbsita, para el caso de los LRN también se encuentra en la

hidrotalcita (figura 32, 33 y 34). La gibbsita es un mineral muy insoluble ($K_{ps}= 3 \times 10^{-34}$) y cinéticamente es una fase inerte (Exley et al., 2002) a pH comprendido entre 4 y 8,5 como se muestra en el diagrama de Pourbaix (figura 13), el Al es muy sensible a las variaciones de pH, en los LR el Al permanece invariable a través del tiempo al igual que el pH (Gráfica 1); por otro lado en los LRN tiene la tendencia a disminuir con el tiempo, contrario a lo que sucede con el pH, a medida que aumenta el pH, por encima a 8,5 el Al es soluble como AlO_2^- , por lo que su concentración en el sustrato va decreciendo.



Gráfica 8. Concentración de Al expresado como óxido en suelos, lodos rojos y mezclas.

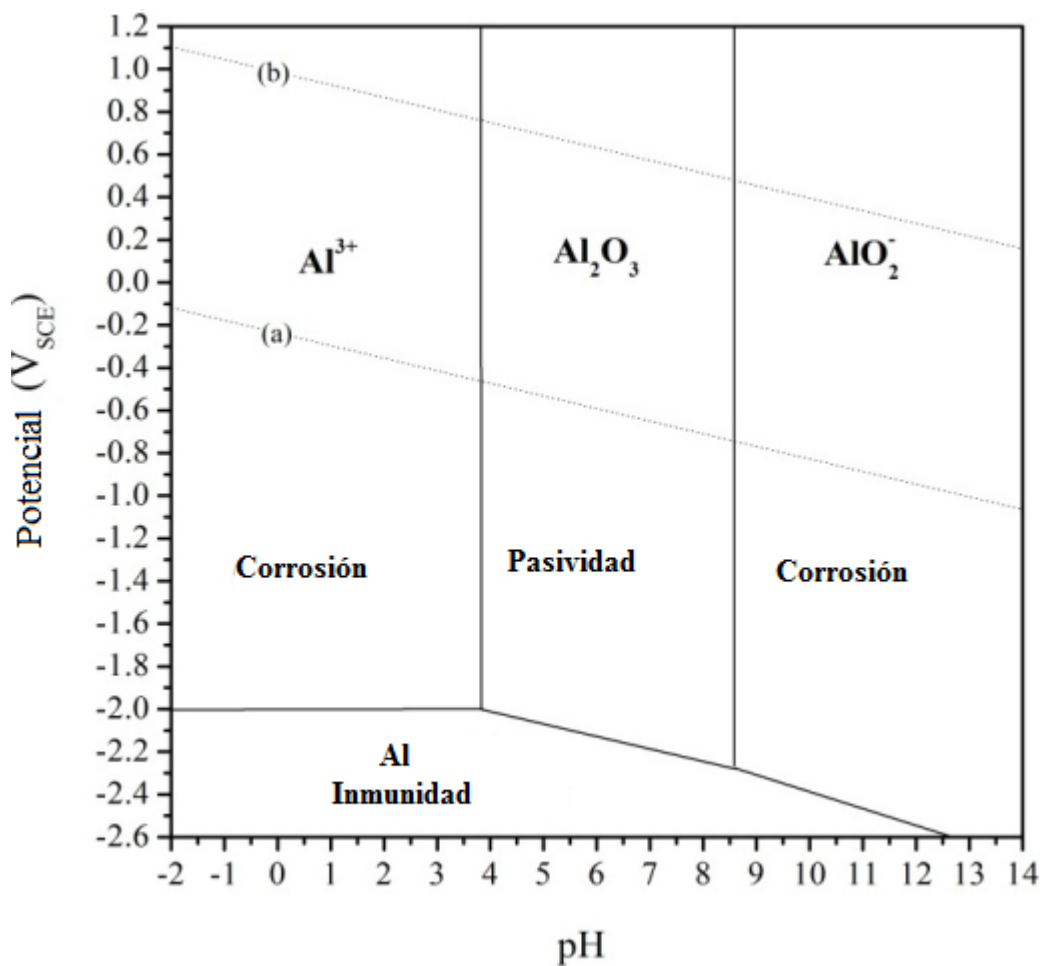
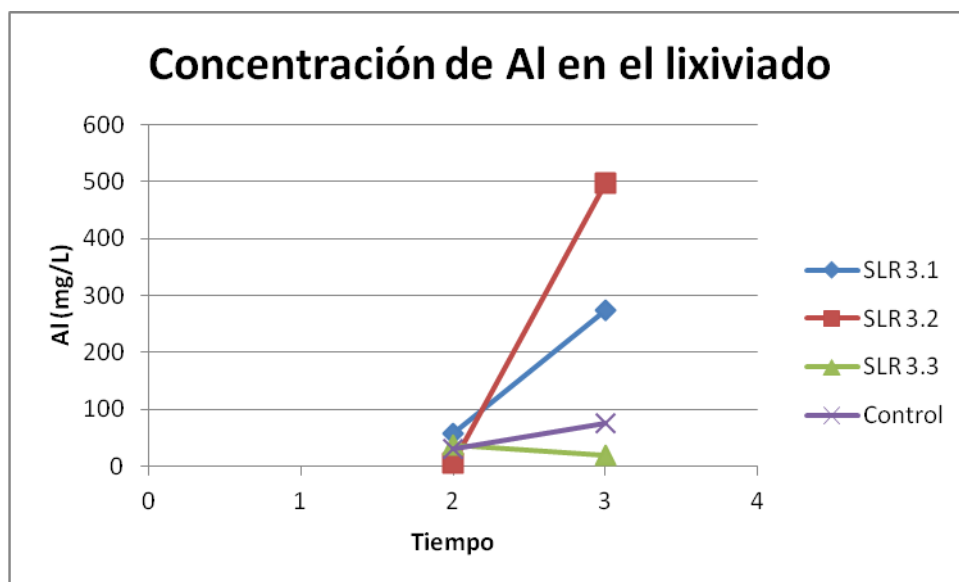


Figura 13. Diagrama Eh-pH de Pourbaix 1974 para Al puro en solución acuosa a 25°C. Las líneas (a) y (b) corresponden con la estabilidad en agua y sus productos de descomposición. Tomado y modificado de: Sukiman et al. (2013).

En ningún caso, el comportamiento del Al para las mezclas sigue una tendencia clara, debido a un gran número de variables como la heterogeneidad de la muestra, textura del sustrato, movilidad de las especies solubles de Al, procesos de intercambio catiónico (promovidos en los suelos por enmiendas con alto contenido de Fe³⁺ y Al³⁺ (Bronick y Lal, 2005)), diferencias en la retención de agua, el desarrollo de la planta en cada ensayo.

Para las muestras de lixiviado ocurre lo mismo, las muestras SLR 3 (gráfica 9), en las cuales la concentración de Al (mg/L) está comprendida en el intervalo [$<9,59$] para el

lixiviado colectado en el tiempo 2 y en el tiempo 3 [19,497], valores que de acuerdo a la Gaceta Oficial N° 5021 (1995) sobrepasa el límite permitido ambientalmente para cuerpos de agua en el subsuelo, que es 5mg/L. En el caso de los lixiviados de las muestras SAS y SLRN 3, la concentración de Al se encontró debajo del límite de detección 9 mg/L (valor más cercano al límite permitido ambientalmente), esto es lógico para las muestras SAS ya que la presencia de minerales que contiene Al en estas muestras es muy baja, tanto que no son detectadas a través de los análisis de rayos X, sin embargo para la muestra SLRN 3 el argumento que justifica esta baja concentración está relacionado más bien a que el pH de estos sustratos están en el área de estabilidad del Al, en el que es insoluble. Este es otro aspecto favorable de la aplicación de lodos rojos neutralizados en una proporción de 2% para la enmienda de los suelos ácidos de sabana, puesto a que permite mantener al aluminio en una forma no biodisponible a expensas de la neutralidad mantenida en el suelo, esto probablemente fue uno de los factores que favoreció el crecimiento del vetiver; contrario a lo que ocurrió con la mezcla SLR 3, a cuyo pH el Al una especie biodisponible, y en concentración suficiente para ser tóxica para las plantas, siendo una de las razones por la cual no sobrevivieron.

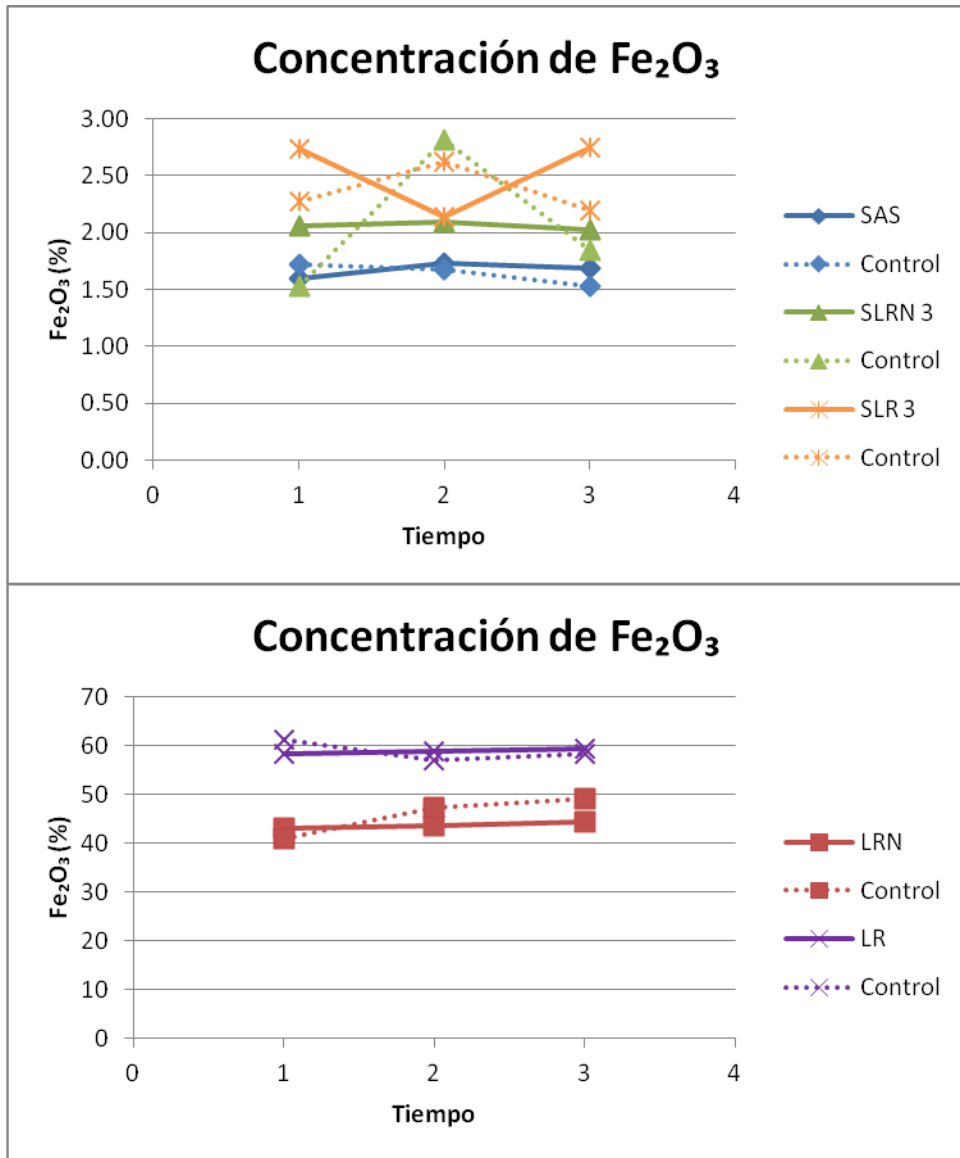


Gráfica 9. Concentración de Al en el lixiviado de las muestras SLR 3.

Hierro

El hierro es un micronutriente, generalmente absorbido por las plantas como Fe^{2+} , aunque también puede ser aprovechado como Fe^{3+} , necesario para la formación de clorofila y actúa en algunas enzimas del sistema respiratorio (Thompson y Troeh, 1988; Casanova, 2005). El Fe en las muestras está contenido en fases minerales como la goethita y hematita, que son muy estables en condiciones básicas, (pH superior a 9, figura 14). En la gráfica 10, es observado que las muestras SAS presentan una concentración de Fe invariable en el tiempo, es decir, que se encuentra como una especie inerte (insoluble), por lo que en lixiviado de estas muestras el Fe no fue detectado, estando su concentración en todas las réplicas por debajo del límite de cuantificación (4 mg/L) (Apéndice K). Para las muestras SLRN 3 y SLR 3 la concentración de Fe no presenta una tendencia clara al igual que para el Al, atribuyendo estas diferencias a las variables que influyen el comportamiento del Al.

Es observado para las muestras LR y LRN que la concentración de Fe permanece constante en el tiempo, este comportamiento es atribuido al pH del sustrato, en el caso LR es de 10,5 aproximadamente (gráfica 1), pH que corresponde a la zona de estabilidad del Fe, al igual que ocurre para las muestras LRN de pH comprendido entre 8,3 y 8,8.



Gráfica 10. Concentración de Fe expresado como óxido en suelos, lodos rojos y mezclas.

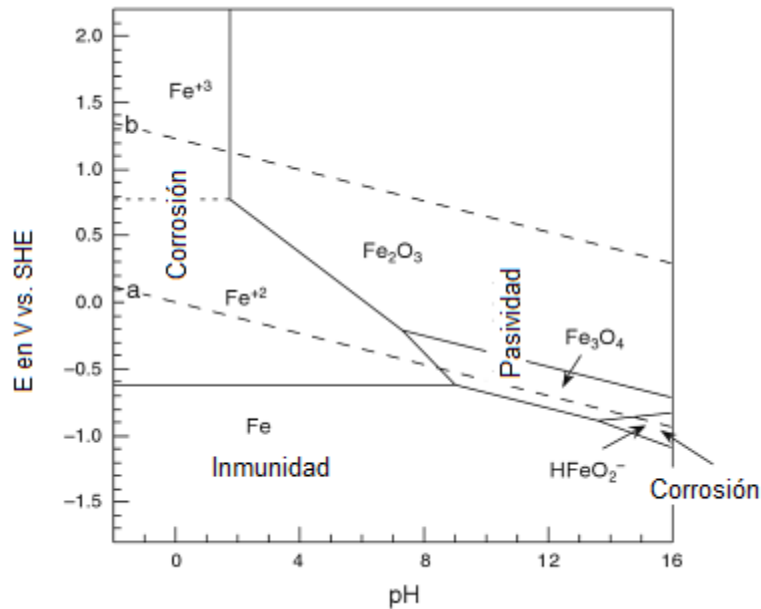
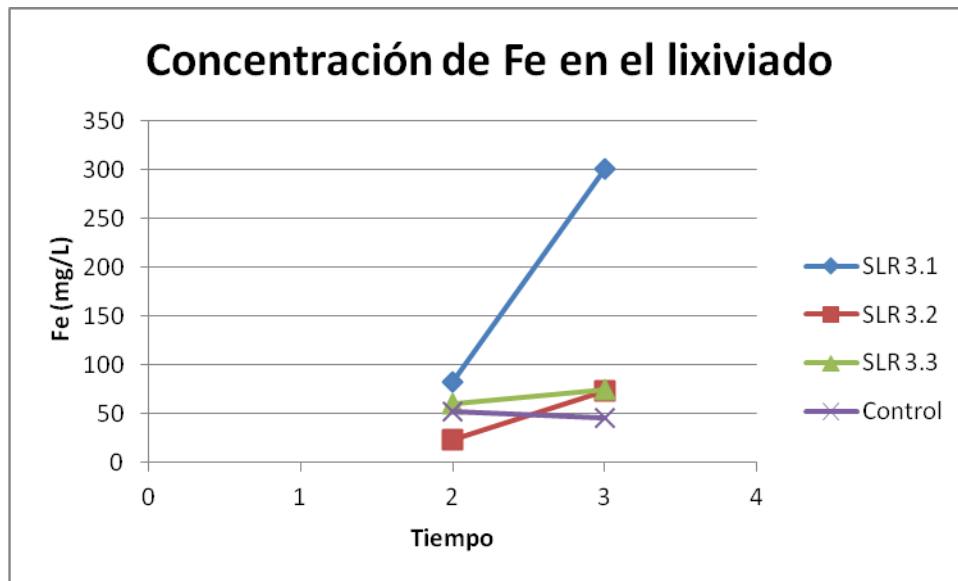


Figura 14. Diagrama Eh-pH de Pourbaix para Fe puro en solución acuosa a 25°C. Tomado y modificado de: McCafferty (2010).

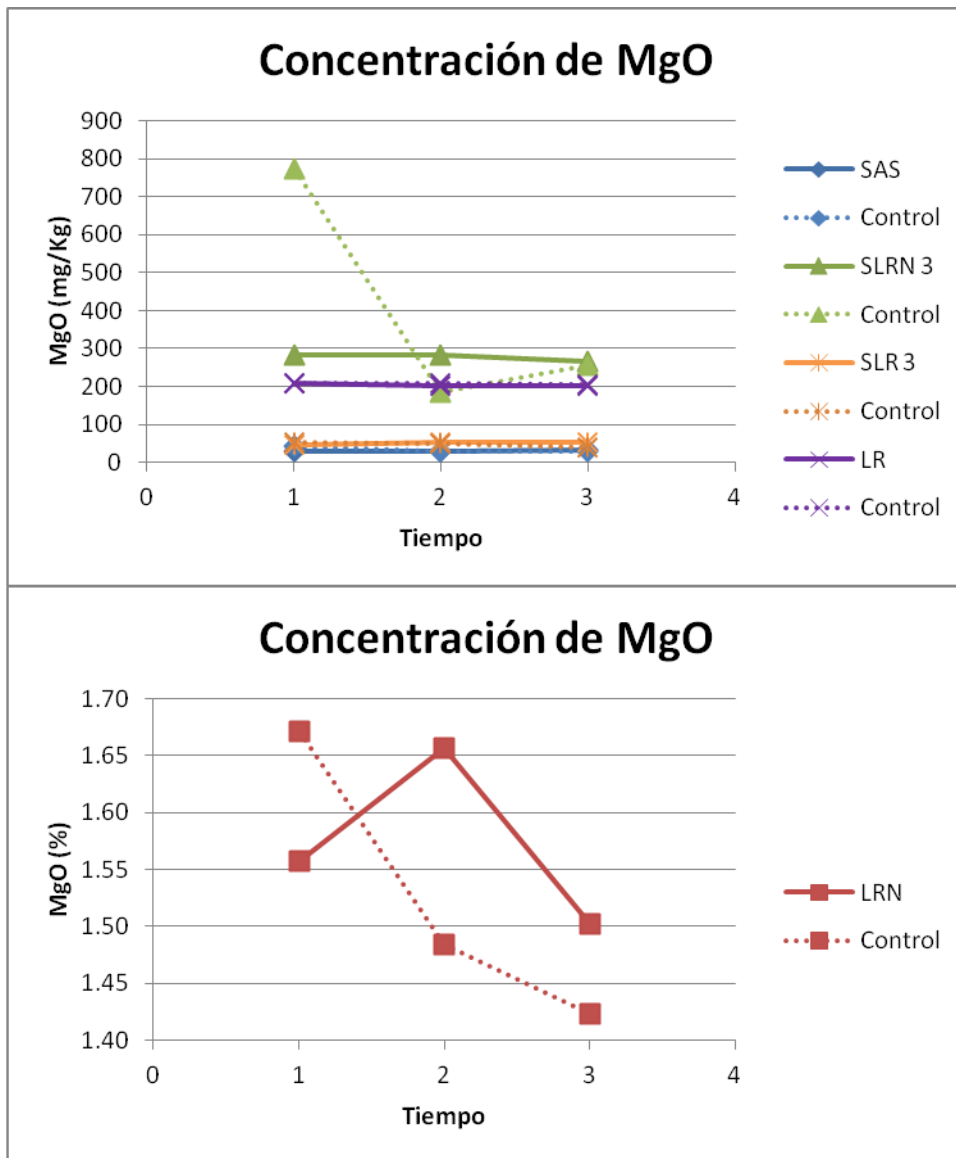
El Fe en el lixiviado de las muestras SLR 3 (gráfica 11) se encuentra en el intervalo de concentración (mg/L) [23,82] para el tiempo 2 y para el tiempo 3 [46, 301], encontrándose por encima del límite de concentración de hierro total permitido ambientalmente, que es 10mg/L para cuerpos de agua en el subsuelo, de acuerdo a la Gaceta Oficial N° 5021 (1995). El Fe en el lixiviado de las muestras SLRN 3 cayó por debajo del límite de cuantificación 4 mg/L, estando en menor concentración que el límite establecido en los estatutos ambientales, siendo este un beneficio adicional para esta proporción de mezcla con lodos rojos neutralizados.



Gráfica 11. Concentración de Fe en el lixiviado de las muestras SLR 3.

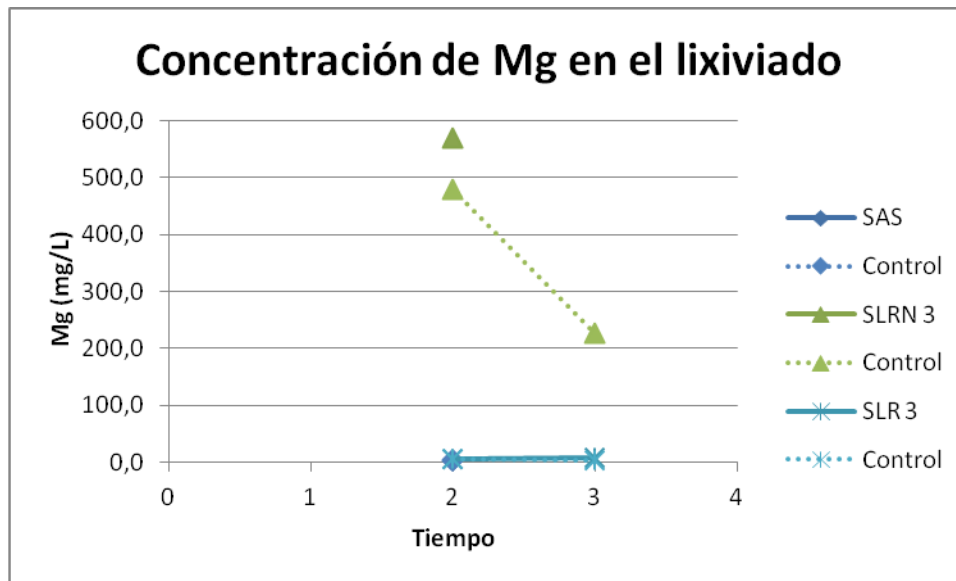
Magnesio

El magnesio es un nutriente esencial para la producción de clorofila, este es absorbido por las plantas como Mg^{2+} , es el único elemento metálico que constituye la clorofila, siendo fundamental en los procesos fotosintéticos (Thompson y Troeh, 1988; Moreno, 2007). Las salmueras marinas son la principal fuente de Mg en las muestras LRN y SLRN 3 (gráfica 12), quedando retenido en estos sustratos por la precipitación de nuevas fases minerales tychita e hidrotalcita, formadas durante la neutralización de los lodos rojos con las salmueras marinas. En el caso de las muestras SLRN 3 la concentración de Mg (230- 350 mg/Kg) (Apéndice L) está dentro del límite de tolerancia del vetiver que es 2400 mg/Kg, de acuerdo a Truong et al. (2009); la neutralización de lodos rojos con salmueras marinas proporciona Mg, una fuente de nutrientes para las plantas, infiriendo que este fue uno de los factores que permitió el desarrollo y supervivencia del vetiver.



Gráfica 12. Concentración de Mg expresado como óxido en suelos, lodos rojos y mezclas.

Las muestras SAS, SLR 3 y LR no tienen ninguna fuente significativa de Mg, viéndose reflejado en la concentración que posee en estos sustratos y en sus respectivos lixiviados (gráfica 13). Es observado que el Mg tiene mayor concentración en el lixiviado que en el sustrato, es decir, que el Mg añadido a través de las salmueras marinas, en su mayoría no está siendo fijado en el suelo, permanece en solución y es lixiviado.



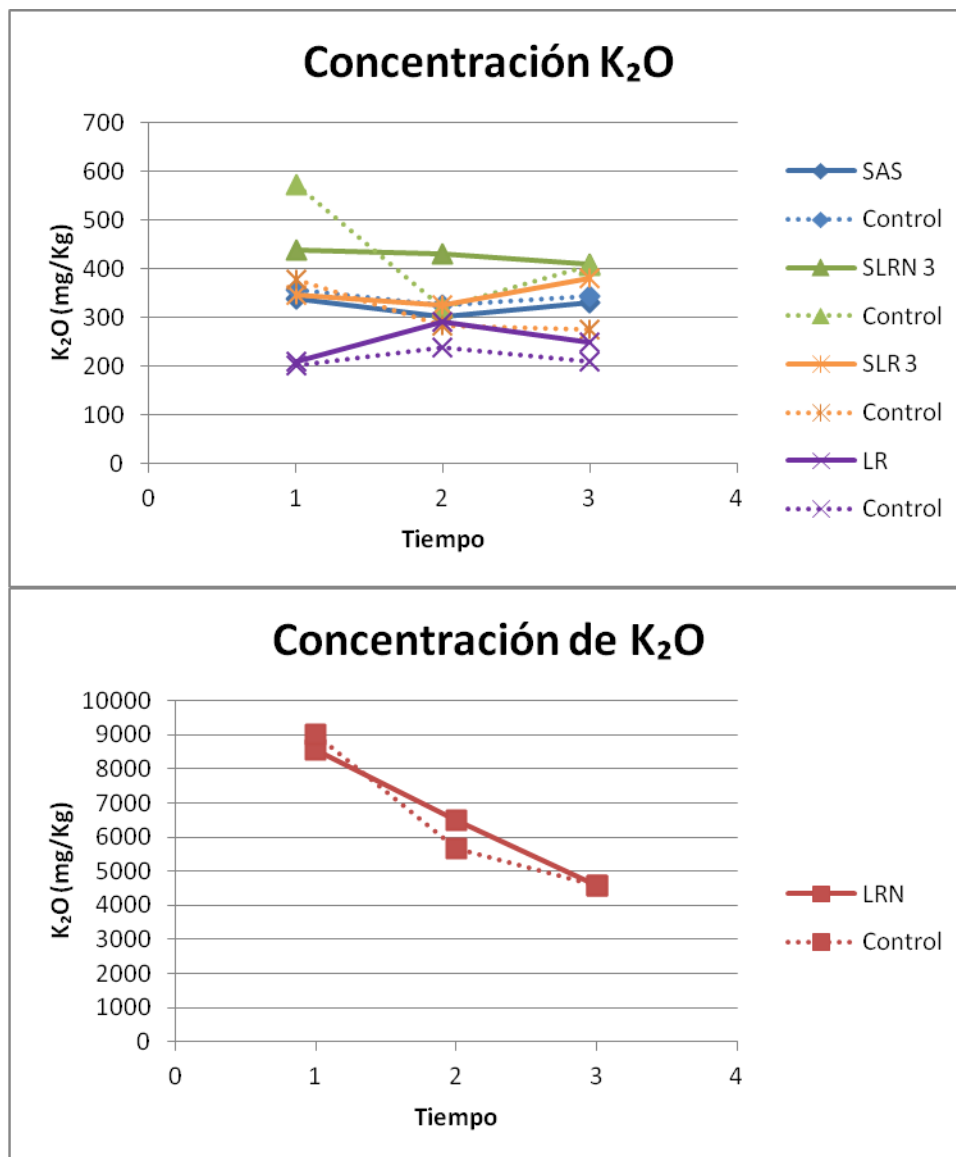
Gráfica 13. Concentración de Mg en el lixiviado de las muestras SAS, SLR 3 y SLRN 3.

Potasio

El potasio es un elemento vital para el desarrollo de las plantas, debido a que activa más de sesenta enzimas, siendo primordial en la síntesis de carbohidratos y proteínas, también regula el régimen hídrico (circulación de agua) de la planta (Moreno, 2007). El potasio es asimilado por las plantas en la forma iónica K^+ , la fijación y capacidad de intercambio catiónico del suelo son los medios por los cuales el potasio es retenido en el suelo, siendo liberado con mayor facilidad de los minerales tamaño arcilla (Thompson y Troeh, 1988).

Las salmueras marinas son las que proporcionan K a los suelos al ser empleadas para neutralizar los lodos rojos, es por ello que se observa en la gráfica 14 que la muestra SLRN 3 y LRN son las que poseen la mayor concentración de K (Apéndice M), se infiere que el potasio se encuentra fijado en arcillas del tipo 2:1, que debido a su baja concentración no fueron detectadas por difracción de rayos X. Para la muestra SLRN 3 la concentración de K se mantiene constante a través del tiempo, si se compara con su control sin planta, es posible que esta diferencia sea dada por la heterogeneidad de la muestra, también la planta pudo ejercer un efecto sobre el sustrato, ya que el vetiver gracias a sus

mecanismos desintoxicantes del suelo puede absorber metales tóxicos (Srivastava et al., 2008), dejando espacios libres, permitiendo que el K permanezca retenido por intercambio catiónico. En la muestra LRN el potasio disminuye a través del tiempo, el motivo de esta disminución puede ser que el potasio este siendo lixiviado del sustrato ya que no existe la posibilidad de absorción por parte de las plantas pues estas murieron.



Gráfica 14. Concentración de K expresado como óxido en suelos, lodos rojos y mezclas.

En la tabla 11 es mostrado que la concentración de K en el lixiviado del control sin planta de la muestra SLRN 3 y el lixiviado de las muestras SLR 3 (con planta y control sin planta) disminuye a través del tiempo por disolución. La concentración de K en el lixiviado de las muestras SLR 3 es muy variable, atribuido a factores como la heterogeneidad de la muestra, procesos de intercambio catiónico, movilidad de la especie y el desarrollo de la planta en estos ensayos.

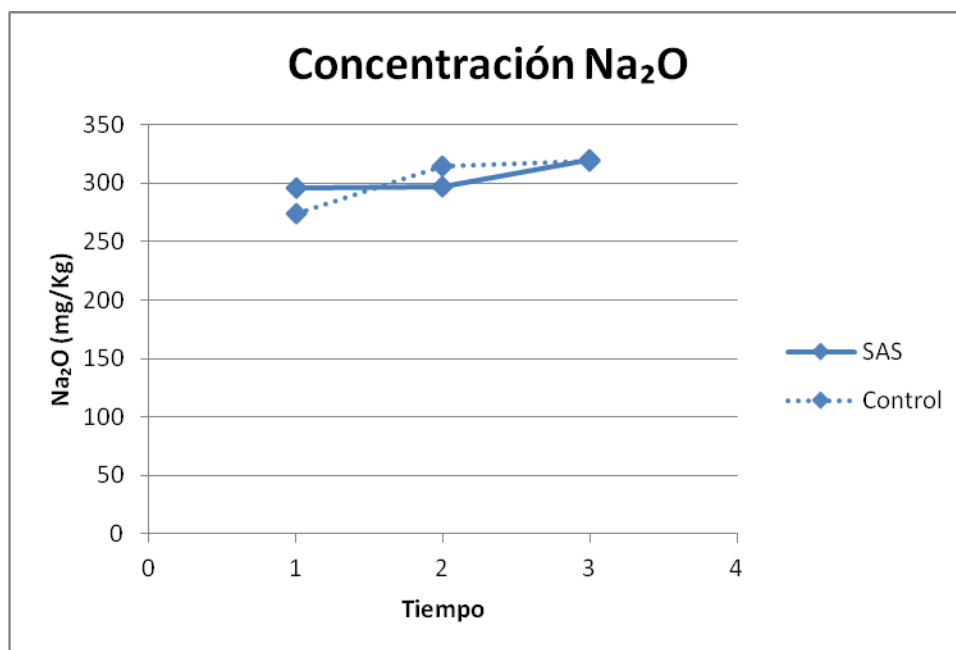
Tabla 15. Concentración de K en el lixiviado de las muestras SAS, SLR 3 y SLRN 3.

Tiempo	Muestra	K (mg/L)
	Lixiviado	
2	SAS	13,3±0.3
	Control	15,1±0,3
	SLRN 3	297±33
	Control	207±23
3	Control	96±11
2	SLR 3.1	145
	SLR 3.2	117
	SLR 3.3	23
	SLR 3.4	120
	Intervalo	[23,145]
3	SLR 3.1	45
	SLR 3.3	19
	SLR 3.4	16
	Intervalo	[19,45]

Sodio

La química del sodio es muy similar a la del potasio, pero su comportamiento en el suelo es diferente, una vez solubilizado como Na^+ , este no es fijado en el suelo y es retenido con menor fuerza por los puntos de intercambio catiónico (Thompson y Troeh, 1988), el sodio en altas concentraciones es un agente altamente dispersante, que afecta la agregación del suelo, disminuyendo la productividad del cultivos, debido a que altera la homeostasis de cationes esenciales y microelementos en las plantas (Bronick y Lal, 2005; Kudo et al., 2010).

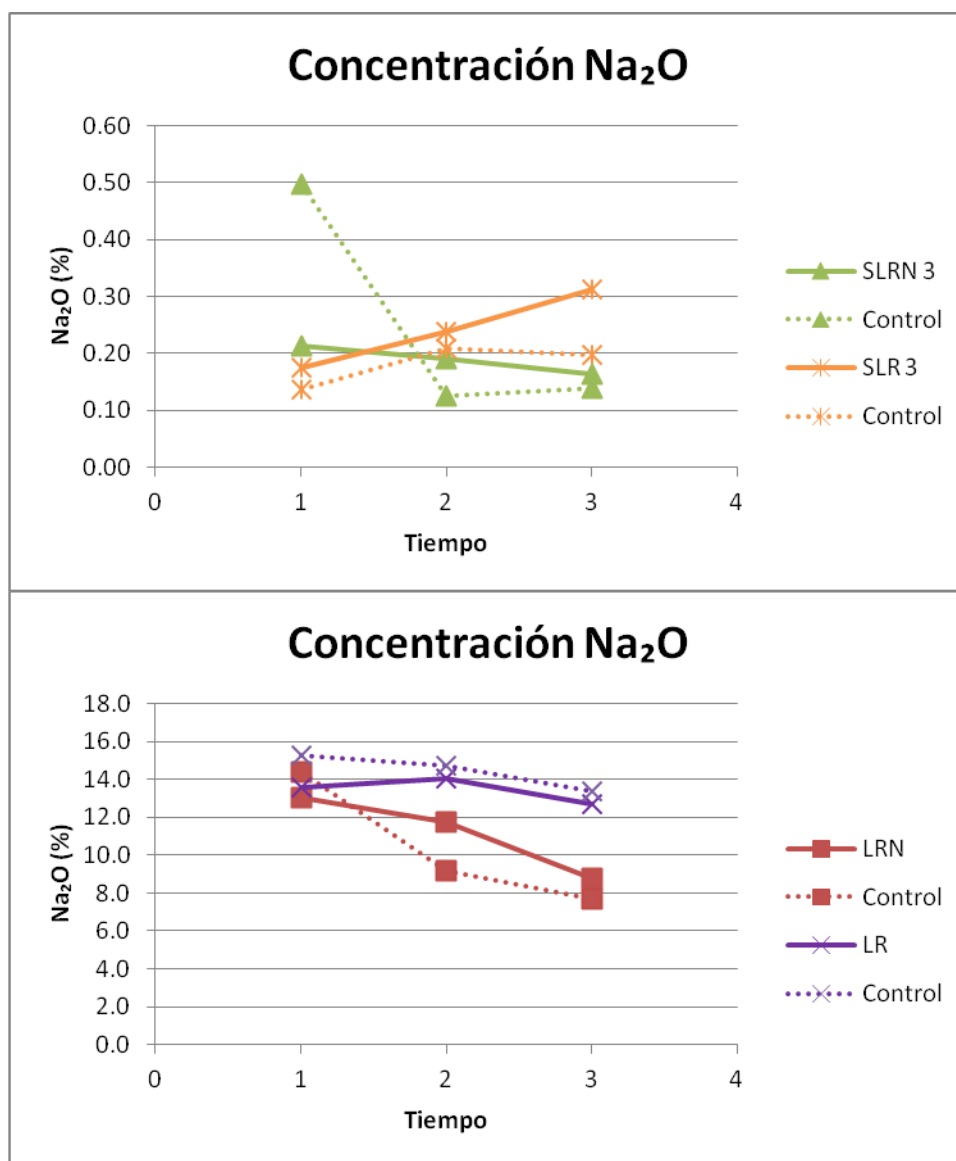
En el gráfico 16 es observado que la concentración de sodio en las muestras SAS aumenta gradualmente con el tiempo de 296 mg/L a 320 mg/L (Apéndice N), debido a que a medida que transcurría el tiempo la generación de lixiviado fue disminuyendo hasta el punto en que no se generó lixiviado, quedando retenido el sodio en el sustrato.



Gráfica 16. Concentración de Na expresado como óxido en suelos.

En las muestras LR y SLR 3 el sodio se encuentra en la sodalita, la tendencia de la muestra SLR 3 es a aumentar la concentración de Na a medida que transcurre el tiempo, teniendo una relación directa con la disminución de la generación de lixiviado. En el caso de la muestra LR el sodio tiende a mantenerse constante a través del tiempo, al igual que ocurre en las investigaciones realizadas por Fernandes (2012) y Marcano (2013), siendo atribuido este comportamiento a que la mayor concentración de sodio se encuentra en fases menos solubles que la halita, como lo son la sodalita y carbonatos de sodio. El sodio en las muestras LRN y SLRN 3 (gráfica 17) se encuentra en las fases minerales halita, tychita y sodalita (figura 32, 33 y 34), en estos sustratos el sodio disminuye a medida que transcurre el experimento, siendo esta disminución mucho mayor en la muestra LRN de 13% a 9%, y menor en el caso de la muestra SLRN 3 de 0,21% a 0,16%, debido al contenido de NaCl mineral muy soluble (0,36g/mL).

De acuerdo a Courtney et al. (2013), las enmiendas realizadas a los lodos rojos para reducir su toxicidad y el establecimiento de vegetación disminuye significativamente la concentración de sodio (consecuentemente el Na intercambiable) y aumenta la concentración de otros cationes como Ca, K y Mg, este decrecimiento en la concentración de sodio probablemente ocurre por procesos de intercambio catiónico con Ca, K y Mg (Hanahan et al., 2004)



Gráfica 17. Concentración de Na expresado como óxido en lodos rojos y mezclas.

En la tabla 12 es mostrado que la concentración de Na en los lixiviados tiene un comportamiento errático, debido a que esta especie es muy soluble y móvil, con lo que no es posible establecer una tendencia clara en su comportamiento.

Tabla 12. Concentración de Na en el lixiviado de las muestras SAS, SLRN 3 y SLR 3.

Tiempo	Muestra	Na (mg/L)
	Lixiviado	
2	SAS 1	8
	SAS 2	15
	SAS 3	7
	Control	9
	Intervalo	[7,15]
2	SLRN 3.1	3726
	SLRN 3.2	4290
	SLRN 3.3	2296
	Control	2973
	Intervalo	[2296,4290]
3	Control	1470
2	SLR 3.2	1746
	Control	1743
3	SLR 3.1	1476
	SLR 3.2	1155
	SLR 3.3	1374
	Control	1018
	Intervalo	[1155,1476]

La composición elemental de la mezcla de suelos ácidos de sabana con lodos rojos neutralizados en la proporción de 2%, demuestra ser la más adecuada en planes de revegetación con lodos rojos, debido a que le proporciona al sustrato nutrientes como: P, Fe, Mg y K esenciales para las plantas, cuya concentración en los ensayos con plantas tiende a ser constante durante los 104 días en que fue llevado a cabo el experimento; por otro lado el Al, que es un elemento tóxico para las plantas y el medio ambiente, permanece retenido en el suelo como una especie no biodisponible, adicionalmente el Na perjudicial para la agregación del suelo y el desarrollo de las plantas, tiene la tendencia a disminuir su concentración con el tiempo.

CONCLUSIONES

1. La proporción óptima de mezcla es la de 2% de lodos rojos neutralizados en suelos ácidos de sabana (SLRN 3), de todas las mezclas fue la única en la que se obtuvo el 100% de supervivencia del vetiver, además los parámetros de crecimiento (masa, longitud de tallo y raíces, diámetro y brotes nuevos) medidos en la planta indican que tuvieron mayor desarrollo en comparación a los otros ensayos.
2. La aplicación de lodos rojos (tanto neutralizados como sin neutralizar) a los suelos aumenta su retención de agua de 6 a 13%, debido a que los sólidos tamaño arcilla mejoran la textura del sustrato, lo que es favorable para el establecimiento de vegetación.
3. Las plantas de los ensayos SLRN 3 presentan una morfología irregular en sus tallos y raíces, si se compara con las plantas de los ensayos SAS, siendo este un indicativo de que los lodos rojos neutralizados ejercen un efecto sobre el crecimiento de la planta.
4. Con la aplicación de lodos rojos neutralizados en 2% a los suelos, el pH incrementó de 5,01 a 7,41, valor de pH cercano al de los suelos fértiles, uno de los factores que favoreció el crecimiento de la planta.
5. El pH generado en el lixiviado de la muestra SLRN 3, está comprendido entre 6,8 y 7,5, valores que están dentro de los límites permitidos ambientalmente, por lo que la aplicación de los lodos rojos neutralizados en esta proporción no generaría desde el punto de vista de pH ningún impacto negativo sobre el suelo, cuerpos de agua y cualquier organismo vivo.
6. La conductividad eléctrica de los suelos aumentó de 0,020 mS/cm a 1,1 mS/cm en la muestra SLRN 3 y a 0,6 mS/cm para la muestra SLR 3, estos valores indican que

la conductividad no tuvo un efecto negativo en el desarrollo del vetiver, de acuerdo a la escala de tolerancia de las plantas a la salinidad.

7. Para las muestras SLRN 3 la retención de aluminio en el sustrato como una especie no biodisponible, insoluble bajo las condiciones de pH del sustrato, es un factor clave que favoreció el crecimiento de las plantas. Caso contrario a lo que ocurrió con las muestras SLR 3, en que el Al era un especie biodisponible debido al pH del sustrato, siendo una de las razones por las cuales las plantas no sobrevivieron.
8. La concentración de Al y Fe en el lixiviado es menor a 9 mg/L y 4 mg/L respectivamente, en el caso de Al este valor es cercano a los permitidos ambientalmente (5mg/L), para Fe está por debajo del límite (10mg/L).
9. Los lodos rojos neutralizados le suministraron al sustrato nutrientes como P, Fe, Mg y K, nutrientes esenciales para las plantas, lo es un factor clave en la remediación del suelo y el plan de revegetación.
10. La concentración de Na en la muestra SLRN 3 va disminuyendo moderadamente en el sustrato de 0,21% a 0,16%, condición favorable para el suelo y las plantas, debido a que promueve la agregación del suelo.

RECOMENDACIONES

En futuras experiencias es recomendado realizar ensayos aplicando un fertilizante de fórmula completa a la proporción de mezcla establecida como óptima, para evaluar la retención de estos nutrientes en el sustrato y su efecto sobre el vetiver.

En la búsqueda de la compresión más completa de los sistemas es conveniente determinar la concentración de metales como Mn, Zn, Cu, Mo, Co, Cd, Pb, Cr, Ti y Ni tanto en el sustrato como en su lixiviado.

En futuros estudios es recomendado analizar nitrógeno por un método adecuado para determinar nitrógeno en concentraciones traza, como el método Nessler.

Con la finalidad de evaluar el efecto que la planta tuvo sobre los sustratos estudiados, es recomendado realizar un análisis químico a su raíz y tallo.

Es recomendado realizar un ensayo a mayor escala y por mayor tiempo con la proporción de mezcla establecida como óptima, para evaluar su influencia sobre las propiedades físicas y químicas del suelo y en la planta a largo plazo.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Allen, S.M., Carlisle, A., White, E.J. y Evans, C.C., 1968. The plant nutrient content of rainwater. *Journal of Ecology*, 56(2): 497-504.
- Alshaal, T., Domokos-Szabolcsy, É., Márton, L., Czakó, M., Kátai, J., Balogh P., Elhawat, N., El-Ramady H. y Fári, M., 2013. Phytoremediation of bauxite-derived red mud by giant reed. *Environmental Chemistry Letters*, 11(3): 295-302. DOI 10.1007/s10311-013-0406-6.
- Antiochia, R., Campanella, L., Ghezzi, P. y Movassaghi, K., 2007. The use of vetiver for remediation of heavy metal soil contamination. *Analytical and Bioanalytical Chemistry*, 388: 947-956. DOI 10.1007/s00216-007-1268-1.
- Balomenos, E., Gianopoulou, I., Pantias, D., Paspaliaris, I., Perry, K. y Boufounos, D., 2011. Efficient and complete exploitation of the bauxite residue (red mud) produced in the Bayer Process. *Proceedings of EMC 2011*, 745-758.
- Bárdossy, G. y Aleva, G.J., 1990. *Lateritic Bauxites*. Elsevier Science Publishers. Amsterdam, The Netherlands. 624 p.
- Bray, E.L., 2013. U.S. Geological Survey, Mineral Commodity Summaries. <http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/bauxite/mcs-2013-bauxi.pdf>. Consulta: Enero 2014.
- Bronick, C.J. y Lal, R., 2005. Soil structure and management: a review. *Geoderma*, 124 (2005): 3-22.

- 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.
- Casanova, E.F., 2005. Introducción a la ciencia del suelo. Segunda Edición. Consejo de Desarrollo Científico y Humanístico. Universidad Central de Venezuela. 482 p.
- Casierra, F. y Niño, R.C., 2007. Solubilidad y reacción del aluminio en el suelo. Ciencia y Agricultura, 5 (2): 7-17.
- Chen, Y., Shen, Z. y Li, X., 2004. The use of vetiver grass (*Vetiveria zizanioides*) in the phytoremediation of soils contaminated with heavy metals. Applied Geochemistry, 19: 1553-1565.
- Chiu, K.K., Ye, Z.H. y Wong, M.H., 2006. Growth of *Vetiveria zizanioides* and *Phragmites australis* on Pb/Zn and Cu mine tailings amended with manure compost and sewage sludge: A greenhouse study. Bioresource Technology, 97: 158-170.
- Courtney, R.G. y Timpson, J.P., 2005. Reclamation of fine fraction bauxite processing residue (red mud) amended with coarse fraction residue and gypsum. Water, Air, and Soil Pollution, 164(1-4): 91-102.
- Courtney, R.G. y Mullen, G., 2009. Use of germination and seedling performance bioassays for assessing revegetation strategies on bauxite residue. , Air, and Soil Pollution, 197 (1-4): 15-22.
- Courtney, R., Harrington, T. y Byrne, K.A., 2013. Indicators of soil formation in restored bauxite residues. Ecological Engineering, 58 (2013): 63-68.

CVG Bauxilum, 2014. Procesos. <http://www.bauxilum.com/es/procesos>. Consulta: Enero 2014.

Dana, J.D., Klein, C. y Hurlbut, C.S. Jr, 1997. Manual de Mineralogía Vol. 2. Cuarta Edición. Editorial Reverté, S.A. Barcelona-España. 679 p.

Danh, L.T., Truong, P., Mammucari, R., Pu, Y. y Foster, N.R., 2012. Contaminated by heavy metals, metalloids, and radioactive materials using vetiver grass, *Chrysopogon zizanioides*. Phytotechnologies: Remediation of Environmental Contaminants. En Anjum, N.A., Pereira, M.E., Ahmad, I., Duarte, A.C., Umar, S. y Khan, N.A. (Eds). CRC Press. U.S.A. 571 p.

Diagnosis and Improvement of Saline and Alkaline Soils, 1954. United States Department of Agriculture Handbook No. 60; Richards, L. A., Ed.; United States Government Printing Office: Washington DC.

Dilmore, R., Lu, P., Allen, D., Soong, Y., Hedges, S., Fu, J.K., Dobbs, C.L., Degalbo, A. y Zhu, C., 2008. Sequestration of CO₂ in mixtures of bauxite residue and saline wastewater. Energy Fuels, 22(1): 343-353.

Doye, I. y Duchesne, J., 2002. Neutralisation of acid mine drainage with alkaline industrial residues: laboratory investigation using batch-leaching tests. Applied Geochemistry, 18(2003): 1197–1213.

European Aluminium Association, 2013. Bauxite Residue Management: Best Practice. <http://www.world-aluminium.org/publications/>. Consulta: Febrero 2014.

Exley, C., 2003. A biogeochemical cycle for aluminium?. Journal of Inorganic Biochemistry, 97 (2003): 1-7.

- Feigl, V., Anton, A., Uziger, N. y Gruiz, K., 2012. Red mud as a chemical stabilizer for soil contaminated with toxic metals. *Water Air Soil Pollut*, 223: 1237-1247.
- Fernandes, M. (2012). Estudio de enmiendas de lodos rojos. Tesis de Magister. Facultad de Ciencias. Universidad Central de Venezuela. 116p.
- Gaceta Oficial N° 5.021, 1995. Decreto 883, Normas para la Clasificación y el Control de la Calidad de los Cuerpos de Agua y Vertidos o efluentes líquidos. República de Venezuela. 13 p.
- Gupta, V.K. y Ali, I., 2004. Adsorbents for water treatment: development of low-cost alternatives to carbon. *Encyclopedia of Surface and Colloid Science*, 2004 Update Supplement, Volumen 5. En Somasundaran, P. (Eds). Editorial Marcel Dekker. New York, U.S.A. 698 p.
- Hanahan, C., McConchie, D., Pohl, H., Creelman, R., Clark, M.W. y Stocksiek C, 2004. Chemistry of seawater neutralization of bauxite refinery residues (red mud). *Environmental Engineering Science* 21(2): 125–138. DOI:10.1089/109287504773087309.
- Hind, A. R., Bhargava, S. K. y Grocott, S.C., 1999. The surface chemistry of Bayer process solids: a review, *Colloids and Surfaces A: Physicochemical Engineering Aspects*, 146 (1999) 359–374.
- Ho, G.E., Mathew, K. y Newman, P.W., 1989. Leachate quality from gypsum neutralized red mud applied to sandy soils. *Water, Air, and Soil Pollution*, 47(1-2): 1-18.
- Khaitan, S., Dzombak, D.A. y Lowry, G.V., 2009. Chemistry of the acid neutralization capacity of bauxite residue. *Environmental Engineering Science*, 26(5): 873-881.

- Klauber, C., Gräfe, M., y Power, G., 2009. Review of bauxite residue “re-use” options. CSIRO Document DMR-3609, May 2009. 66 p.
- Klebercz, O., Gruiz, K., Feigl, V. y Anton, A., 2010. Introducing the Project SOILUTIL. In Conference proceedings CD of Consoil 2010, 22–24 September 2010, Salzburg, Austria, Consoil 2010 Posters A3-39.
- Kudo, N., Sugino, T., Oka, M. y Fujiyama, H., 2010. Sodium tolerance of plants in relation to ionic balance and the absorption ability of microelements. *Soil Science and Plant Nutrition* 56 (2): 225–233. DOI: 10.1111/j.1747-0765.2009.00436.x.
- Laboratorio de Estudios Ambientales, 1993. Laboratorio Ciencias del Suelo. Instituto de Zoología Tropical. Facultad de Ciencias. Universidad Central de Venezuela. 56 p.
- Lin, C.X., Long, X.X. y Xu, S.J., 2003. Amendment of minesite acid sulfate soils and the use of vetiver grass for re-vegetation in Dabaoshan Mine, Northern Guangdong, China. *Proceedings of the Third International Vetiver Conference*, October, Guangzhou, China: 427–431.
- Lisena, M., Tovar, C. y Ruiz, L., 2006. Estudio exploratorio de la siembra del vetiver en un área degradada por el lodo rojo. Superintendencia Protección de Recursos Naturales. CVG Bauxilum Los Pijiguaos. 15 p.
- Lo Mónaco, S., 1984. Caracterización geoquímica de perfiles de meteorización lateríticos, pertenecientes al yacimiento de bauxita de Los Pijiguaos, Edo. Bolívar. Trabajo de Ascenso. Instituto de Geoquímica. Facultad de Ciencias. Universidad Central de Venezuela. 109 p.
- Lottermoser, B.G., 2010. *Mine Wastes*. 3ra Edición. Springer Heidelberg Dordrecht London New York. 393 p.

Luque, R., Lisena, M. y Luque, O., 2005. Vetiver System for environmental protection of open cut bauxite mining en “Los Pijiguaos”-Venezuela. Cuarta Conferencia Internacional Vetiver. Venezuela, Octubre 2006.

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.

McCafferty, E., 2010. Introduction to Corrosion Science. Springer New York Dordrecht Heidelberg London. 571 p.

MEC (Minerals Education Coalition), 2013. Minerals Database. <http://www.mineralseducationcoalition.org/minerals/aluminumbauxite>. Consulta: Enero 2014.

Meléndez, W.G., 2006. Estudio químico y mineralógico del yacimiento de bauxita de Los Pijiguaos, estado Bolívar. Tesis Doctoral. Departamento de Geoquímica. Escuela de Química. Facultad de Ciencias. Universidad Central de Venezuela. 282 p.

Meyer, F.M., 2004. Availability of bauxite reserves. Natural Resources Researchs, 13(3): 161-172.

Moreno, A., 2007. Elementos nutritivos. Asimilación, funciones, toxicidad e indisponibilidad en los suelos. Primera Edición. LibrosEnRed. Amertown International S.A. 89 p.

OECD, 2010. Aluminium. OECD Global Forum on Environment: Sustainable Materials Management. <http://www.oecd.org/environment/waste/46194971.pdf>. Consulta: Enero 2014.

- 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. 37 p.
- Palmer, S.J. y Frost, R.L., 2009. Characterisation of bauxite and seawater neutralised bauxite residue using XRD and vibrational spectroscopic techniques. *Journal of Material Science*, 44: 55-63. DOI 10.1007/s10853-008-3123-y.
- Paradis, M., Duchesne J., Lamontagne, A. e Isabel, D., 2007. Long-term neutralisation potential of red mud bauxite with brine amendment for the neutralisation of acidic mine tailings. *Applied Geochemistry*, 22: 2326- 2333.
- Plunkert, P.A., 2000. Aluminum. U.S. Geological Survey Minerals Yearbook-2000. <http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/aluminum/050400.pdf>. Consulta: Enero 2014.
- Pontikes, Y., 2005a. Production. Red Mud Project. http://redmud.org/?page_id=66. Consulta: Enero 2014.
- Pontikes, Y., 2005b. Applications. Red Mud Project. http://redmud.org/?page_id=72. Consulta: Febrero 2014.
- Pontikes, Y., 2006. Disposal. Red Mud Project. http://redmud.org/?page_id=70. Consulta: Enero 2014.
- Rodríguez, C.E., 2006. Diseño de un sistema de información estratégico para la promoción y operación del turismo en el municipio Cedeño del estado Bolívar. http://www.oocities.org/es/cibercero/teg/capitulo_uno.htm. Consulta: Febrero de 2014.

- Rodríguez, M.F., Cortez, A., Rey, J.C., Lobo, D., Parra, R.M., González, W., Ovalles, F. y Gabriels, D., 2011. Análisis de la agresividad y concentración de las precipitaciones en Venezuela. III. Región sur-este (Guayana y Delta). *Bioagro*, 23 (2): 94-104.
- Romero, N., 1997. Métodos de análisis para la determinación de nitrógeno y constituyentes nitrogenados en alimentos. Depósito de Documentos de la FAO. <http://www.fao.org/docrep/010/ah833s/ah833s17.htm>. Consulta: Febrero de 2014.
- 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 refinera de bauxita de Los Pijiguaos, Edo. Bolívar-Venezuela. Trabajo Especial de Grado. Escuela de Química. Facultad de Ciencias. Universidad Central de Venezuela. 74 p.
- Skoog, D.A., Holler, F.J. y Nieman, T.A., 2001. Principios de Análisis Instrumental. Quinta Edición. Editorial McGRAW-HILL/INTERAMERICANA DE ESPAÑA, S.A.U. 1028 p.
- Skoog, D.A., West, D.M., Holler, F.J. y Crouch, S.R., 2005. Fundamentos de Química Analítica. Octava Edición. International Thomson Editores S.A. México. 1065 p.
- Sparks, D.L., 2003. Environmental Soil Chemistry. Segunda Edición. Academic Press, Elsevier Science. 352 p.
- Snars, K., Gilkes, R. y 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 of Soil Research*, 41: 1229-1241.

Soil Science Society of America. Glossary of Soil Science Terms. <https://www.soils.org/publications/soils-glossary>. Consulta: Enero 2014.

Srivastava, J., Kayastha, S., Jamil, S. y Srivastava, V., 2008. Environmental perspectives of *Vetiveria zizanioides* (L.) Nash. *Acta Physiologiae Plantarum*, 30: 413-417. DOI 10.1007/s11738-008-0137-7.

Sukiman, N.L., Zhou, X., Birbilis, N., Hughes, A.E., Mol, J.M.C., García, S.J. Zhou, X. y Thompson, G.E., 2013. Durability and Corrosion of Aluminium and Its Alloys: Overview, Property Space, Techniques and Developments. *Aluminium Alloys - New Trends in Fabrication and Applications*, 2012. En Ahmad, Z. (Eds). Editorial InTech. 368 p. DOI: 10.5772/3354.

Summers, R.N., Guise, N.R., Smirk, D.D. y Summers, K.J., 1996. Bauxite residue (red mud) improves pasture growth on sandy soils in Western Australia. *Australian Journal Soil Research*, 34: 569-581.

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.

Sverdlin, H., 2003. Introduction to aluminum. *Handbook of Aluminum: Vol. 1: Physical Metallurgy and Processes*. En Totten, G.E. y MacKenzie, D.S. (Eds). Marcel Dekker, Inc. New York, U.S.A. 1294 p.

Thompson, L.M. y Troeh, F.R., 1988. *Los suelos y su fertilidad*. Cuarta Edición. Editorial Reverté, S.A. Barcelona-España. 639 p.

Truong, P., Tan Van, T. y Pinners, E., 2009. *Vetiver System Applications*. Technical Reference Manual. Publicado por The Vetiver Network International. 126 p.

- Udeigwe, T.K., Wang, J.J. y Zhang, H., 2009. Effectiveness of bauxite residues in immobilizing contaminants in manure-amended soils. *Soil Science*, 174(12): 676-686.
- US EPA (United States Environmental Protection Agency), 1996. Method 3050B. Acid digestion of sediments, sludges, and soils. 12 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.
- US EPA (United States Environmental Protection Agency), 2014. Using Phytoremediation to Clean Up Sites. <http://www.epa.gov/superfund/accomp/news/phyto.htm>. Consulta: Enero 2014.
- USGS (United States Geological Survey), 2014. Minerals Information. <http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/bauxite/>. Consulta: Enero 2014.
- Valcárcel, M. y Cárdenas, M.S., 2000. Automatización y Miniaturización en Química Analítica. Springer-Verlag Ibérica, S.A. Barcelona-España. 279 p.
- Vercoutere, K., Fortunati, U., Muntau, H., Griepink, B. y Maier, E.A., 1995. The certified reference materials CRM 142 R light sandy soil, CRM 143 R sewage sludge amended soil and CRM 145 R sewage sludge for quality control in monitoring environmental and soil pollution. *Fresenius' Journal of Analytical Chemistry*, 352 (1-2): 197-202.
- Watanabe, F.S. y Olsen, S.R., 1965. Test of an ascorbic acid method for determining phosphorus in water and NaHCO₃ extracts from soil. *Soil Science Society of America Journal*, 29(6):677-678.

Xue, S., Zhu, F., Kong, X., Wu, C., Huang, L., Huang, N. y Hartley, W., 2015. A review of the characterization and revegetation of bauxite residues (Red mud). *Environmental Science and Pollution Research*, Abril 2015. DOI 10.1007/s11356-015-4558-8.

Yi, L., Hong, Y., Wang, D. y Zhu, Y., 2006. Stabilities of heavy metals in soils treated with red mud. *Chinese Journal of Geochemistry*, 25 (8):256.

APÉNDICE A - Neutralización de lodos rojos provenientes de la bomba GEHO con salmueras marinas proporción 4:1 masa (g)/volumen (mL).

Tabla A1. Masa de las muestras y propiedades físico-químicas.

Muestra	Masa ($\pm 0,1g$)	Densidad (g/mL)	pH	Conductividad (mS/cm)
Salmuera marina	10805,0	1,3013 \pm 0,0002	6,56	170,9
Lodo rojo de la bomba GEHO	33202,1	1,4019 \pm 0,0005	13,03	49,6
Lodo rojo neutralizado	44007,1	1,3982 \pm 0,0005	8,13	89,8

APÉNDICE B – Cantidad de muestra por ensayo.

Tabla B1. Masa de suelos y lodos rojos tomada para la elaboración de las mezclas.

Mezcla	Suelo ($\pm 0,1g$)	Lodos rojos neutralizado ($\pm 0,1g$)	Lodos rojos sin neutralizar ($\pm 0,1g$)
SLRN 1	14403,0	1600,2	-
SLRN 2	15204,0	801,5	-
SLRN 3	15681,0	320,2	-
SLR 1	14406,0	-	1600,7
SLR 2	15204,0	-	803,9
SLR 3	15680,0	-	320,3

SLRN 1: mezcla 10% lodo rojo neutralizado + suelo, **SLRN 2:** mezcla 5% lodo rojo neutralizado + suelo, **SLRN 3:** mezcla 2% lodo rojo neutralizado + suelo, **SLR 1:** mezcla 10% lodo rojo sin neutralizar + suelo, **SLR 2:** mezcla 5% lodo rojo sin neutralizar + suelo y **SLR 3:** mezcla 2% lodo rojo sin neutralizar + suelo.

Tabla B2. Masa de muestra contenida en cada ensayo.

Ensayo	Masa ($\pm 0,1g$)	Ensayo	Masa ($\pm 0,1g$)	Ensayo	Masa ($\pm 0,1g$)
SAS 1	3749,9	LRN 1	3413,3	LR 1	3446,2
SAS 2	3843,8	LRN 2	3389,7	LR 2	3480,3
SAS 3	3867,5	LRN 3	3421,4	LR 3	3477,7
SAS 4	3887,1	LRN 4	3165,6	LR 4	3460,8
SLRN 1.1	3754,2	SLRN 2.1	3778,0	SLRN 3.1	3776,7
SLRN 1.2	3754,0	SLRN 2.2	3776,4	SLRN 3.2	3775,0
SLRN 1.3	3762,8	SLRN 2.3	3777,0	SLRN 3.3	3773,1
SLRN 1.4	3754,5	SLRN 2.4	3773,4	SLRN 3.4	3783,6

Ensayo	Masa (±0,1g)	Ensayo	Masa (±0,1g)	Ensayo	Masa (±0,1g)
SLR 1.1	3758,4	SLR 2.1	3759,3	SLR 3.1	3783,7
SLR 1.2	3771,0	SLR 2.2	3788,2	SLR 3.2	3791,8
SLR 1.3	3797,8	SLR 2.3	3760,1	SLR 3.3	3788,9
SLR 1.4	3777,6	SLR 2.4	3789,9	SLR 3.4	3788,2

SAS: suelo ácido de sabana, **LRN:** lodo rojo neutralizado y **LR:** lodo rojo sin neutralizar. Cada ensayo tiene 3 réplicas, el número 4 de cada ensayo corresponde al control sin planta.

APÉNDICE C – Parámetros de crecimiento evaluados en el vetiver.

Tabla C1. Masa de las plantas al iniciar y finalizar el experimento.

Muestras	Masa inicial (±0,1 g)	Masa final (±0,1 g)	Porcentaje de pérdida de masa (%)
SAS 1	58,2	35,6	38,8±0,3
SAS 2	43,3	37,0	14,5±0,3
SAS 3	59,1	55,1	6,8±0,2
Intervalo			[6,8; 38,8]
SLRN 3.1	39,5	34,2	13,4±0,4
SLRN 3.2	43,8	40,9	6,6±0,3
SLRN 3.3	45,8	36,2	21±0,3
Intervalo			[6,6; 21,0]
SLR 3.1	53,4	29,2	45,3±0,3
SLR 3.2	47,6	31,0	34,9±0,3
SLR 3.3	56,0	31,6	43,6±0,3
Intervalo			[34,9; 45,3]
LRN 1	42,1	22,6	46,3±0,4
LRN 2	35,2	16,8	52,3±0,4
LRN 3	37,8	20,0	47,1±0,4
Intervalo			[46,3; 52,3]
LR 1	33,4	22,4	32,9±0,4
LR 2	33,3	23,6	29,1±0,4
LR 3	39,0	24,4	37,4±0,4
Intervalo			[29,1; 37,4]

Tabla C2. Crecimiento de brotes nuevos.

Muestra	Brotos nuevos			
	Secos	Naciendo	Desarrollados	Total
SLR 1.1	-	-	-	-
SLR 1.2	2	-	-	2
SLR 1.3	-	-	-	-
SLR 2.1	1	-	-	1
SLR 2.2	2	-	-	2
SLR 2.3		-	-	-
SLR 3.1	3	-	-	3
SLR 3.2	4	-	-	4
SLR 3.3	5	-	-	5
LR 1	2	-	-	2
LR 2	4	-	-	4
LR 3	2	-	-	2
SLRN 1.1	3	-	-	3
SLRN 1.2	3	-	-	3
SLRN 1.3	2	-	-	2
SLRN 2.1	1	-	-	1
SLRN 2.2	3	-	-	3
SLRN 2.3	3	-	-	3
SLRN 3.1	2	2	4	10
SLRN 3.2	2	2	3	7
SLRN 3.3	-	2	3	5
LRN 1	2	-	-	2
LRN 2	3	-	-	3
LRN 3	1	-	-	1
SAS 1	1	2	6	9
SAS 2	-	1	4	5
SAS 3	1	3	5	9

- no presenta

Tabla C3. Longitud de las raíces de las plantas al inicio y finalizar el experimento.

Muestras	Longitud inicial raíces ($\pm 0,1$ cm)	Longitud final raíces ($\pm 0,1$ cm)	Aumento de longitud ($\pm 0,1$ cm)
SAS 1	10	27,0	17,0
SAS 2	10	25,2	15,2
SAS 3	10	26,0	16,0
Intervalo			[15,2; 17,0]
SLRN 3.1	10	35,0	25,0

Muestras	Longitud inicial raíces ($\pm 0,1$ cm)	Longitud final raíces ($\pm 0,1$ cm)	Aumento de longitud ($\pm 0,1$ cm)
SLRN 3.2	10	24,5	14,5
SLRN 3.3	10	24,1	14,1
Intervalo			[14,1; 25,0]
SLR 3.1	10	13,5	3,5
SLR 3.2	10	14,3	4,3
SLR 3.3	10	14,7	4,7
Intervalo			[3,5; 4,7]
LRN 1	10	11,5	1,5
LRN 2	10	12,0	2,0
LRN 3	10	11,0	1,0
Intervalo			[1,0; 2,0]
LR 1	10	14,5	4,5
LR 2	10	13,5	3,5
LR 3	10	15,0	5,0
Intervalo			[3,5; 5,0]

Tabla C4. Longitud del tallo de las plantas al inicio y finalizar el experimento.

Muestras	Longitud inicial tallo ($\pm 0,1$ cm)	Longitud final tallo ($\pm 0,1$ cm)	Aumento de longitud ($\pm 0,1$ cm)
SAS 1	10	28,0	18,0
SAS 2	10	27,3	17,3
SAS 3	10	24,4	14,4
Intervalo			[14,4; 18,0]
SLRN 3.1	10	26,5	16,5
SLRN 3.2	10	26,0	16,0
SLRN 3.3	10	23,0	13,0
Intervalo			[13,0; 16,5]
SLR 3.1	10	24,5	14,5
SLR 3.2	10	19,8	9,8
SLR 3.3	10	17,0	7,0
Intervalo			[7,0; 14,5]
LRN 1	10	10,5	0,5
LRN 2	10	10,0	-
LRN 3	10	10,6	0,6
Intervalo			[0,0; 0,6]
LR 1	10	10,5	0,5
LR 2	10	10,5	0,5
LR 3	10	10,2	0,2
Intervalo			[0,2; 0,5]

Tabla C5. Diámetro en la interfaz raíz-tallo de la planta al inicio y finalizar el experimento.

Muestras	Diámetro inicial (±0,1 cm)	Diámetro final (±0,1 cm)	Aumento de diámetro (±0,1 cm)
SAS 1	13,1	13,4	0,3
SAS 2	13,3	14,1	0,8
SAS 3	15,0	17,2	2,2
Intervalo			[0,3; 2,2]
SLRN 3.1	12,9	14,5	1,6
SLRN 3.2	14,0	15,6	1,6
SLRN 3.3	13,8	14,5	0,7
Intervalo			[0,7; 1,6]
SLR 3.1	12,4	12,5	0,1
SLR 3.2	13,0	13,0	-
SLR 3.3	15,5	15,5	-
Intervalo			[0,0; 0,1]
LRN 1	12,0	12,0	-
LRN 2	12,1	12,1	-
LRN 3	11,1	11,1	-
LR 1	14,3	14,3	-
LR 2	13,4	13,4	-
LR 3	10,9	10,9	-

- no presenta

APÉNDICE D – Determinación de la humedad en las submuestras del tiempo 3.

Tabla D1. Humedad de las muestras al finalizar el experimento.

Muestra	Masa muestra húmeda (±0,1 g)	Masa muestra seca (±0,1 g)	Humedad (% H ₂ O)	Propagación de errores
SAS 1	1,6	>1,5	<6	
SAS 2	1,6	>1,5	<6	
SAS 3	1,6	>1,5	<6	
Promedio (planta)			<6	
SAS 4.1	1,6	1,5	6,3	0,7
SAS 4.2	1,6	1,5	6,3	0,7
SAS 4.3	1,6	1,5	6,3	0,7
Promedio (sin planta)			6	1
SLRN 3.1	1,6	1,5	6,3	0,7
SLRN 3.2	1,6	1,5	6,3	0,7
SLRN 3.3	1,6	1,5	6,3	0,7
Promedio (planta)			6	1

Muestra	Masa muestra húmeda ($\pm 0,1$ g)	Masa muestra seca ($\pm 0,1$ g)	Humedad (% H₂O)	Propagación de errores
SLRN 3.4.1	1,6	1,4	13	1
SLRN 3.4.2	1,6	1,4	13	1
SLRN 3.4.3	1,6	1,4	13	1
Promedio (sin planta)			13	2
SLR 3.1	1,6	1,4	13	1
SLR 3.2	1,6	1,4	13	1
SLR 3.3	1,6	1,4	13	1
Promedio (planta)			13	2
SLR 3.4.1	1,6	1,4	13	1
SLR 3.4.2	1,6	1,4	13	1
SLR 3.4.3	1,6	1,4	13	1
Promedio (sin planta)			13	2
LRN 1	1,6	1,1	31	4
LRN 2	1,6	1,1	31	4
LRN 3	1,6	1,1	31	4
Promedio (planta)			31	7
LRN 4.1	1,6	1,1	31	4
LRN 4.2	1,6	1,1	31	4
LRN 4.3	1,6	1,1	31	4
Promedio (sin planta)			31	7
LR 1	1,6	1,2	25	3
LR 2	1,6	1,2	25	3
LR 3	1,6	1,2	25	3
Promedio (planta)			25	5
LR 4.1	1,6	1,2	25	3
LR 4.2	1,6	1,2	25	3
LR 4.3	1,6	1,2	25	3
Promedio (sin planta)			25	5

Tabla D2. Ecuaciones empleadas para el cálculo de la humedad.

Parámetro	Ecuación
Humedad en la muestra (%H ₂ O)	$\%H_2O = \frac{M_h - M_s}{M_h} \times 100$ <p>Donde: M_h: masa de la muestra húmeda. M_s: masa de la muestra seca.</p>
Propagación de errores (Skoog et al., 2005)	$\frac{s_y}{y} = \sqrt{\left(\frac{s_a}{a}\right)^2 + \left(\frac{s_b}{b}\right)^2 + \left(\frac{s_c}{c}\right)^2}$ $s_y = \sqrt{s_a^2 + s_b^2 + s_c^2}$ <p>Donde: y: humedad. s_y: desviación estándar. a, b y c: variables experimentales. s_a, s_b y s_c: error asociado a la de medida.</p>

APÉNDICE E – Mediciones de pH y conductividad.

Tabla E1. Mediciones de pH en las muestras (réplicas y control sin planta) a través del tiempo.

Muestra	Tiempo 1				Tiempo 2				Tiempo 3			
	pH	Desviación estándar	CV (%)	Error absoluto (±)	pH	Desviación estándar	CV (%)	Error absoluto (±)	pH	Desviación estándar	CV (%)	Error absoluto (±)
SAS 1	5,14	0,04	0,8	0,04	5,03	0,05	0,9	0,05	5,19	0,04	0,8	0,04
SAS 2	5,08			0,04	4,96			0,04	5,12			0,04
SAS 3	5,06			0,04	5,05			0,05	5,11			0,04
SAS 4	5,13			0,04	4,68			0,04	4,89			0,04
Promedio	5,10			0,04	5,01			0,05	5,14			0,04
SLRN 3.1	6,2	0,2	3	0,2	6,8	0,1	2	0,1	7,3	0,1	1	0,1
SLRN 3.2	6,43			0,2	6,8			0,1	7,4			0,1
SLRN 3.3	6,62			0,2	7,1			0,1	7,4			0,1
SLRN 3.4	6,81			0,2	7,3			0,1	7,5			0,1
Promedio	6,52			0,2	6,9			0,1	7,4			0,1
SLR 3.1	9,6	0,8	9	0,9	8,9	0,2	2	0,2	9,2	0,1	1	0,1
SLR 3.2	8,0			0,7	8,6			0,2	9,0			0,1
SLR 3.3	8,6			0,8	9,0			0,2	9,3			0,1
SLR 3.4	8,9			0,8	8,9			0,2	8,9			0,1
Promedio	8,8			0,8	8,8			0,2	9,1			0,1
LRN 1	8,28	0,05	0,5	0,05	8,5	0,1	1	0,1	8,7	0,1	1	0,1
LRN 2	8,24			0,04	8,67			0,09	8,90			0,09
LRN 3	8,33			0,04	8,46			0,08	8,70			0,09
LRN 4	8,32			0,04	8,82			0,09	8,86			0,09
Promedio	8,29			0,04	8,54			0,09	8,80			0,09

Muestra	Tiempo 1				Tiempo 2				Tiempo 3			
	pH	Desviación estándar	CV (%)	Error absoluto (±)	pH	Desviación estándar	CV (%)	Error absoluto (±)	pH	Desviación estándar	CV (%)	Error absoluto (±)
LR 1	10,66	0,07	0,7	0,07	10,3	0,2	2	0,2	10,6	0,1	1	0,1
LR 2	10,71			0,07	10,6			0,2	10,6			0,1
LR 3	10,57			0,07	10,6			0,2	10,4			0,1
LR 4	10,52			0,07	10,6			0,2	10,6			0,1
Promedio	10,62			0,07	10,5			0,2	10,6			0,1

Tabla E2. Mediciones de conductividad eléctrica (CE) en las muestras (réplicas y control sin planta) a través del tiempo.

Muestra	Tiempo 1				Tiempo 2				Tiempo 3			
	CE (mS/cm)	Desviación estándar	CV (%)	Error absoluto (±)	CE (mS/cm)	Desviación estándar	CV (%)	Error absoluto (±)	CE (mS/cm)	Desviación estándar	CV (%)	Error absoluto (±)
SAS 1	0,038	0,004	13	0,005	0,03	0,01	42	0,01	0,021	0,002	11	0,002
SAS 2	0,030			0,004	0,05			0,02	0,017			0,002
SAS 3	0,031			0,004	0,02			0,01	0,020			0,002
SAS 4	0,020			0,003	0,07			0,03	0,030			0,003
Promedio	0,033			0,004	0,03			0,01	0,020			0,002
SLRN 3.1	1,3	0,4	29	0,4	0,9	0,3	23	0,2	1,4	0,3	24	0,3
SLRN 3.2	1,0			0,3	1,5			0,3	1,0			0,2
SLRN 3.3	1,8			0,5	1,2			0,3	0,9			0,2
SLRN 3.4	2,7			0,8	0,8			0,2	0,5			0,1
Promedio	1,4			0,4	1,2			0,3	1,1			0,3
SLR 3.1	1,7	0,1	37	0,6	0,4	0,1	23	0,1	0,6	0,2	35	0,2
SLR 3.2	0,4			0,2	0,4			0,1	0,5			0,2
SLR 3.3	0,2			0,1	0,6			0,1	0,8			0,3
SLR 3.4	0,3			0,1	0,4			0,1	0,4			0,1

Muestra	Tiempo 1				Tiempo 2				Tiempo 3			
	CE (mS/cm)	Desviación estándar	CV (%)	Error absoluto (±)	CE (mS/cm)	Desviación estándar	CV (%)	Error absoluto (±)	CE (mS/cm)	Desviación estándar	CV (%)	Error absoluto (±)
Promedio	0,3			0,1	0,5			0,1	0,6			0,2
LRN 1	70	0,6		0,6	53	13	25	13	27	9	31	8
LRN 2	68,9			0,6	38			10	24			7
LRN 3	69,5			0,6	63			16	42			13
LRN 4	68,4			0,5	28			7	22			7
Promedio	69,5			0,6	51			13	31			10
LR 1	26,5	0,6	2	0,6	23	3	12	3	20,8	0,8	4	0,8
LR 2	26,3			0,5	25			3	21,4			0,9
LR 3	25,4			0,5	30			4	19,8			0,8
LR 4	26,3			0,5	32			4	23,3			0,9
Promedio	26,1			0,5	26			3	20,6			0,8

Tabla E3. Ecuaciones utilizadas para el tratamiento de errores (Skoog et al., 2005).

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

APÉNDICE F – Volumen de lixiviado generado y mediciones de pH y conductividad en estas muestras.

Tabla F1. Volumen de lixiviado generado en cada ensayo.

Muestra	Tiempo 2		Tiempo 3	
	Volumen (mL)	Error del instrumento(±)	Volumen (mL)	Error del instrumento (±)
SAS 1	95,6	0,2	-	-
SAS 2	109,6	0,2	-	-
SAS 3	99,2	0,2	-	-
SAS 4	154,2	0,2	-	-
Promedio	101,5	0,2	-	-
SLRN 3.1	137,6	0,2	-	-
SLRN 3.2	118,2	0,2	-	-
SLRN 3.3	82,2	0,2	-	-
SLRN 3.4	291,4	0,2	135,6	0,2
Promedio	112,7	0,2	-	-
SLR 3.1	81,4	0,2	28,0	0,2
SLR 3.2	63,8	0,2	24,0	0,2
SLR 3.3	27,6	0,2	41,8	0,2
SLR 3.4	268,6	0,2	135,6	0,2
Promedio	57,6	0,2	31,3	0,2
LRN 1	876	1	861	1
LRN 2	818	1	665	1
LRN 3	1118	1	1049	1
LRN 4	814	1	673	1
Promedio	937	1	858	1
LR 1	828	1	502	1
LR 2	869	1	158	1
LR 3	855	1	606	1
LR 4	1176	1	1015	1
Promedio	851	1	422	1

- no presenta

Tabla F2. Mediciones de pH en los lixiviados de las muestras (réplicas y control sin planta) a través del tiempo.

Muestra	Tiempo 2				Tiempo 3			
Lixiviado	pH	Desviación estándar	CV (%)	Error absoluto (±)	pH	Desviación estándar	CV (%)	Error absoluto (±)
SAS 1	6,3	0,4	6	0,4	-	-	-	-
SAS 2	6,4			0,4	-			-
SAS 3	5,7			0,3	-			-
SAS 4	6,2			0,4	-			-
Promedio	6,1			0,4	-			-
SLRN 3.1	7,5	0,1	1	0,1	-			-
SLRN 3.2	7,5			0,1	-			-
SLRN 3.3	7,6			0,1	-			-
SLRN 3.4	6,9			0,1	6,8			-
Promedio	7,5			0,1	-			-
SLR 3.1	9,1	0,1	1	0,1	8,2	0,1	2	0,1
SLR 3.2	9,3			0,1	7,9			0,2
SLR 3.3	9,0			0,1	8,1			0,2
SLR 3.4	8,3			0,1	8,6			0,2
Promedio	9,1			0,1	8,1			0,2
LRN 1	7,1	0,12	2	0,1	6,93	0,05	1	0,05
LRN 2	7,0			0,1	6,84			0,07
LRN 3	6,8			0,1	6,90			0,07
LRN 4	6,9			0,1	6,89			0,07
Promedio	7,0			0,1	6,89			0,07
LR 1	13,11	0,05	0,4	0,05	12,51	0,08	0,6	0,08
LR 2	13,08			0,05	12,65			0,08
LR 3	13,01			0,05	12,52			0,08
LR 4	12,80			0,05	11,19			0,07
Promedio	13,07			0,05	12,56			0,08

-no determinada

Tabla F3. Mediciones de conductividad eléctrica (CE) en los lixiviados de las muestras (réplicas y control sin planta) a través del tiempo.

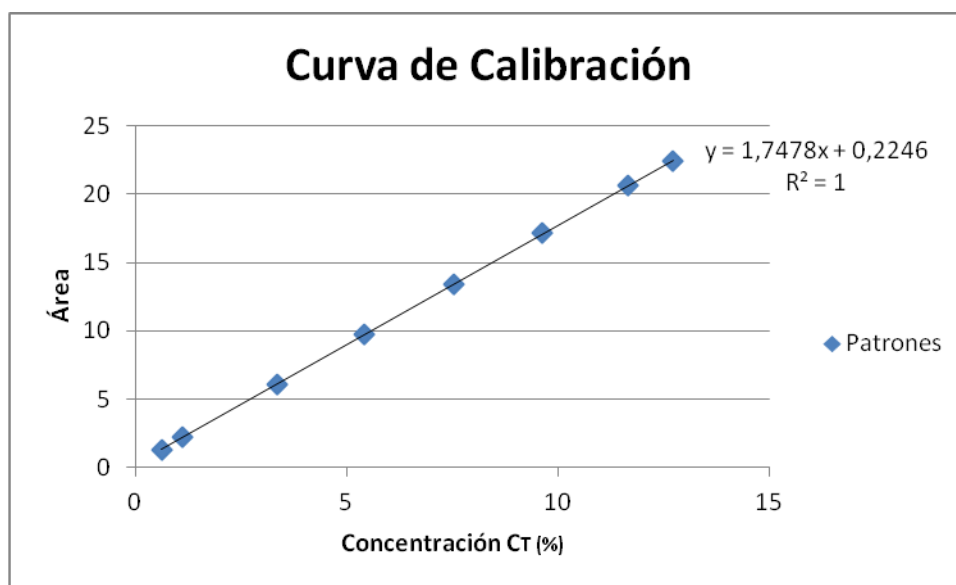
Muestra	Tiempo 2				Tiempo 3			
Lixiviado	CE (mS/cm)	Desviación estándar	CV (%)	Error absoluto (±)	CE (mS/cm)	Desviación estándar	CV (%)	Error absoluto (±)
SAS 1	0,2	0,03	13	0,03	-			
SAS 2	0,2			0,03	-			
SAS 3	0,2			0,02	-			
SAS 4	0,2			0,03	-			
Promedio	0,2			0,03	-			
SLRN 3.1	31	2	6	2	-			
SLRN 3.2	33			2	-			
SLRN 3.3	29			2	-			
SLRN 3.4	23			1	1			
Promedio	31			2	-			
SLR 3.1	9,1	0,8	9	0,8	8	2	21	2
SLR 3.2	8,2			0,7	5			1
SLR 3.3	9,7			0,9	8			2
SLR 3.4	8,2			0,7	4			1
Promedio	9,0			0,8	7			2
LRN 1	234	11	5	12	75	2	3	2
LRN 2	212			11	74			2
LRN 3	224			11	72			2
LRN 4	256			13	120			4
Promedio	223			11	74			2
LR 1	106	5	5	5	53	6	12	7
LR 2	102			5	45			5
LR 3	97			5	57			7
LR 4	79			4	38			5
Promedio	102			5	51			6

-no determinada

APÉNDICE G – Determinación de C_T en las muestras.

Tabla G1. Datos para la curva de calibración C_T

Patrones	Masa ($\pm 0,0001$ g)	Concentración (%)	Área
0,50%	1,750	0,62579	1,3182
1%	1,750	1,1286	2,1961
3,0136%	1,750	3,3437	6,0635
5,0136%	1,750	5,4304	9,7067
7,0068%	1,750	7,5541	13,415
9%	1,750	9,6355	17,136
11%	1,750	11,668	20,598
11,9796%	1,750	12,734	22,459



Gráfica G1. Curva de calibración C_T .

Tabla G2. Determinación de C_T en las muestras (réplicas y control sin planta).

Muestra	Tiempo 1				Tiempo 2				Tiempo 3			
	C_T (%)	Desviación estándar	CV (%)	Error absoluto (\pm)	C_T (%)	Desviación estándar	CV (%)	Error absoluto (\pm)	C_T (%)	Desviación estándar	CV (%)	Error absoluto (\pm)
SAS 1	ND				ND				ND			
SAS 2	ND				ND				ND			
SAS 3	ND				ND				ND			
SAS 4	ND				ND				ND			
SLRN 3.1	ND				ND				ND			
SLRN 3.2	ND				ND				ND			
SLRN 3.3	ND				ND				ND			
SLRN 3.4	ND				ND				ND			
SLR 3.1	ND				ND				ND			
SLR 3.2	ND				ND				ND			
SLR 3.3	ND				ND				ND			
SLR 3.4	ND				ND				ND			
LRN 1	ND				ND				ND			
LRN 2	ND				ND				ND			
LRN3	ND				ND				ND			
LRN 4	ND				ND				ND			
LR 1	1,3	0,1	11	0,1	1,2	0,1	9	0,1	1,17	0,04	4	0,04
LR 2	1,1			0,1	1,4			0,1	1,15			0,05
LR 3	1,3			0,1	1,4			0,1	1,09			0,04
LR 4	1,2			0,1	1,3			0,1	1,08			0,04
Promedio	1,3			0,1	1,3			0,1	1,14			0,05

ND: No detectado.

APÉNDICE H – Determinación de N_T en las muestras.

Tabla H1. Determinación de N_T en las muestras.

Muestra	Tiempo 1				Tiempo 2				Tiempo 3			
	Masa (±0,0001 g)	Volumen de muestra (mL)	Volumen de HCl (±0,1 mL)	% N _T	Masa (±0,0001 g)	Volumen de muestra (mL)	Volumen de HCl (±0,1 mL)	% N _T	Masa (±0,0001 g)	Volumen de muestra (mL)	Volumen de HCl (±0,1 mL)	% N _T
Blanco 1		25	0,4	0								
Blanco 2		25	0,3	0								
Blanco 3		25	0,3	0								
SAS 3	2,0001	25	0,2	ND	2,0002	25	0,2	ND	2,0008	25	0,2	ND
SLRN 3.2	2,0003	25	0,2	ND	2,0007	25	0,2	ND	2,0003	25	0,2	ND
SLR 3.2	2,0000	25	0,2	ND	2,0004	25	0,2	ND	2,0004	25	0,2	ND

Concentración de HCl 0,013 M

ND: No detectado.

Tabla H2. Determinación de N_T en un patrón certificado LECO PART NO. 502-309.

Patrón certificado	Masa (±0,0001 g)	Volumen de muestra (mL)	Volumen de HCl (±0,1 mL)	Concentración HCl	% N Dilución	%N muestra	Promedio	Desviación estándar	CV (%)	Error (±)
1	1,0001	25	4,5	0,03	0,2	0,60	0,67	0,09	13	0,08
2	1,0001	25	9,1	0,01	0,2	0,64				
3	1,0003	17,5	7,8	0,03	0,3	0,77				

Valor teórico N_T 0,78%

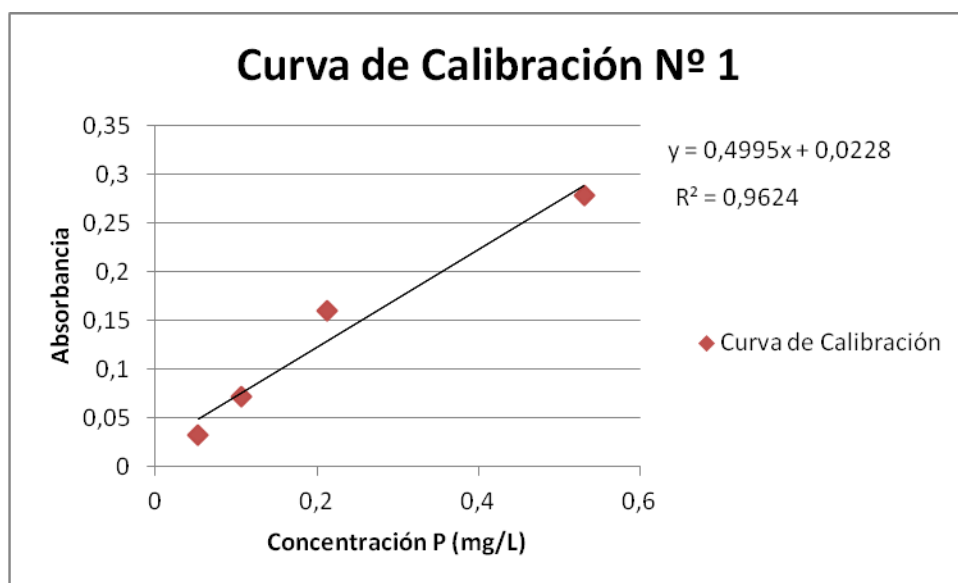
Tabla H3. Ecuación empleada para calcular el % de N_T (Laboratorio de Estudios Ambientales, 1993).

Análisis químico	Ecuación
Determinación de N total mediante el método Kjeldahl	$\%N = (V_{HCl} - VB_{HCl}) \times C_{HCl} \times \frac{1,4}{P_m}$ <p>Donde: %N: Porcentaje de nitrógeno en la muestra. V_{HCl}: Volumen de ácido usado en la titulación. VB_{HCl}: Volumen de ácido usado en la titulación del blanco. C_{HCl}: Concentración del ácido. P_m: Peso de la muestra.</p>

APÉNDICE I – Determinación de P_T.

Tabla II. Datos para elaborar de la curva de calibración N°1 de P_T.

Patrón	P(mg/L)	%T	Absorbancia
1	0,053	92,8	0,03
2	0,106	84,8	0,07
3	0,213	69,2	0,2
4	0,531	52,7	0,3



Gráfica II. Curva de calibración N°1 P_T.

Tabla I2. Parámetros de calidad del método. Curva de calibración N°1.

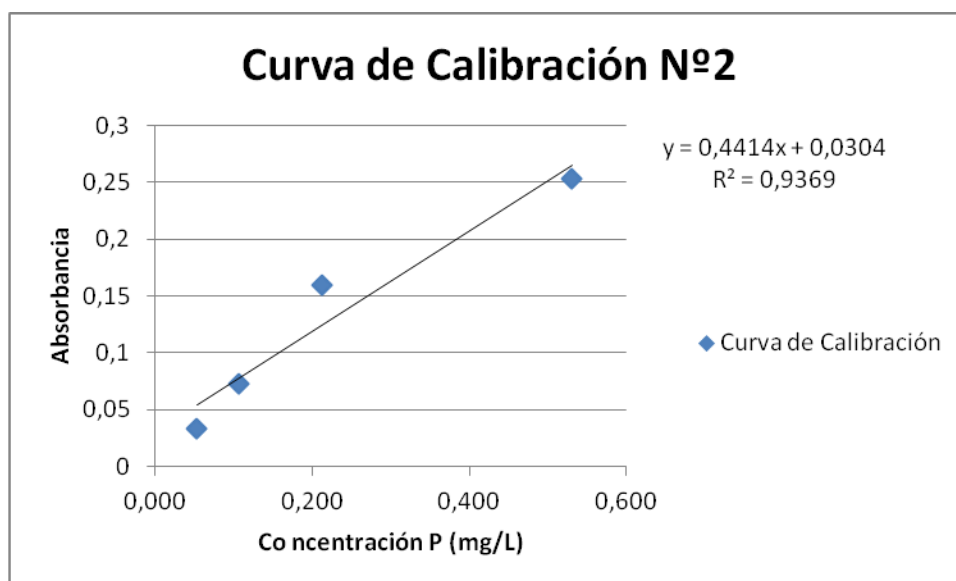
Sensibilidad de calibrado (S)	Mínima señal analítica distinguible (Sm)	Concentración mínima detectable (Cm)	Límite de detección (LD)	Límite de cuantificación (LC)
0,5	0,2	0,1 mg/L	0,1 mg/L	0,6 mg/L

Tabla I3. Ecuaciones utilizadas para evaluar la calidad del método (Skoog et al., 2001).

Parámetro	Ecuación
Sensibilidad del calibrado (S)	$S = m$ <p>Donde: m: pendiente de la curva de calibración.</p>
Límite de detección del método (C _m)	$S_m = \overline{Sbl} + k sbl$ <p>Donde: S_m: Mínima señal analítica distinguible \overline{Sbl}: Señal media del blanco sbl: Desviación estándar del blanco k: Constante.</p>
	$C_m = \frac{S_m - \overline{Sbl}}{m}$ <p>Donde: C_m: Concentración mínima que se puede detectar.</p>

Tabla I4. Datos para elaborar la curva de calibración N°2 de P_T.

Patrón	P (mg/L)	%T	Absorbancia
1	0,053	92,5	0,03
2	0,106	84,5	0,07
3	0,213	69,2	0,2
4	0,531	55,8	0,3



Gráfica I2. Curva de calibración N° 2 P_T.

Tabla I5. Parámetros de calidad del método. Curva de calibración N°2.

Sensibilidad de calibrado (S)	Mínima señal analítica distinguible (S _m)	Concentración mínima detectable (C _m)	Límite de detección (LD)	Límite de cuantificación (LC)
0,4	0,2	0,1 mg/L	0,1 mg/L	0,5 mg/L

Tabla I6. Valores de P_T de los blancos.

Muestra	%T	Absorbancia	P dilución (mg/L)	P solución (mg/L)	Desviación	CV (%)	Error Absoluto (±)
Blanco 1 *	69,6	0,1574	0,27	2,7	0,3	10	0,3
Blanco 2 *	65,1	0,1864	0,33	3,3			0,3
Blanco 3	69,8	0,1561	0,28	2,8			0,3
Blanco 4	71,4	0,1463	0,26	2,6			0,3
Promedio				2,9			0,3

* Curva de calibración N°1

Nota: Fueron empleados las réplicas de los blancos para realizar el tratamiento de errores en el caso de la cuantificación de P_T, debido a que para esta experiencia no se contó con réplicas de las muestras, debido a que existieron limitaciones con los reactivos.

Tabla I7. Determinación de P_T en las muestras.

Tiempo	Muestra	Masa (±0,0001 g)	%T	Absorbancia	P dilución	P solución (mg/L)	P muestra	P ₂ O ₅	Error (±)
					(mg/L)		(mg/Kg)		
1	SAS 3*	2,0001	51,1	0,2916	<0,6	ND	ND	ND	
	SLRN 3.2	2,0003	51,7	0,2865	0,6	2,9	74	337	34
	SLR 3.2	2,0000	53	0,2757	0,6	2,7	67	309	31
2	SAS 3*	2,0002	55,6	0,2549	<0,6	ND	ND	ND	
	SLRN 3.2	2,0007	56,6	0,2472	0,5	2,3	58	268	27
	SLR 3.2	2,0004	50,7	0,2950	0,6	3,1	78	359	36
3	SAS 3*	2,0008	51,9	0,2848	<0,6	ND	ND	ND	
	SLRN 3.2	2,0003	53,6	0,2708	0,5	2,6	65	296	30
	SLR 3.2	2,0004	50,4	0,2976	0,6	3,2	80	366	37

*Curva de calibración N°1

CV=10%

Tabla I8. Ecuaciones empleadas para calcular P_T en la muestra (Skoog et al., 2001).

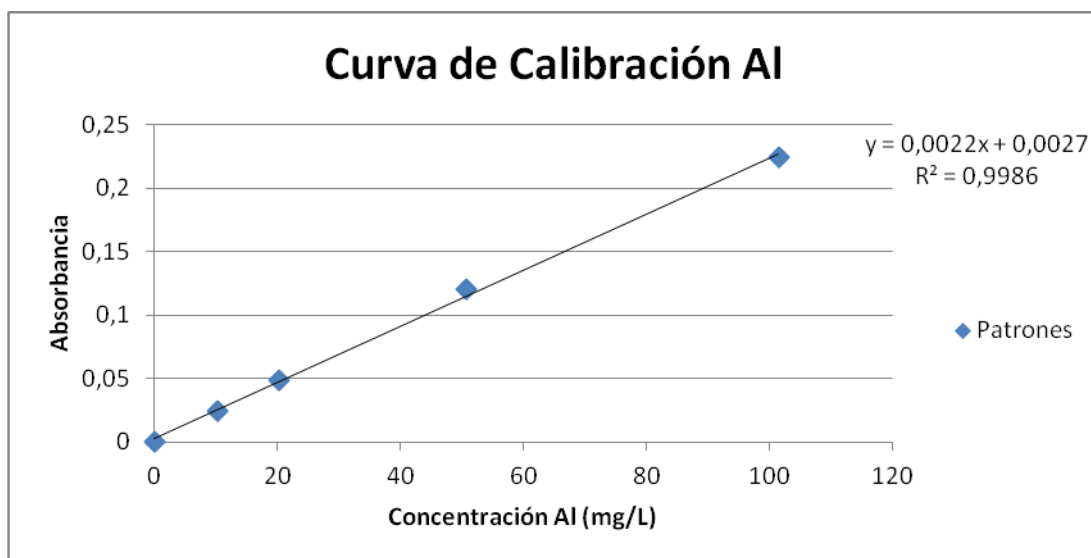
Análisis químico	Ecuaciones
Determinación de P total mediante absorción molecular en el espectro UV y visible	$A = -\log \frac{T}{100}$ <p>Donde: A: Absorbancia. T: Transmitancia.</p>
	$y = mx + b$ <p>Donde: y: Absorbancia. m: Pendiente de la curva de calibrado. x: Concentración del analito en la dilución. b: punto de intersección con el eje de ordenadas.</p>
	$C_X = \frac{C_{XD} \times V_D}{V_A}$ <p>Donde: C_X: Concentración del analito en la solución original (mg/L). C_{XD}: Concentración del analito en la dilución (mg/L). V_D: Volumen de la dilución. V_A: Volumen de la alícuota.</p>

Análisis químico	Ecuaciones
Determinación de P total mediante absorción molecular en el espectro UV y visible	$P \text{ (ppm)} = \frac{C_x \times V}{M_m} / 1000$ <p>Donde: C_A: Concentración del analito en solución. V: Volumen de la solución. M_m: Masa de la muestra.</p>

APÉNDICE J – Determinación de Al.

Tabla J1. Datos para elaborar la curva de calibración de Al.

Patrón	Al (mg/L)	Absorbancia
Blanco	0	0
1	10,15	0,024
2	20,3	0,049
3	50,75	0,12
5	101,5	0,224



Gráfica J1. Curva de calibración para Al.

Tabla J2. Valores de los blancos.

Blanco	Absorbancia	Promedio	Desviación
1	0	0	0,01
2	0,009		

Tabla J3. Parámetros de calidad del método.

Sensibilidad de calibrado (S)	Mínima señal analítica distinguible (Sm)	Concentración mínima detectable (Cm) (mg/L)	Límite de detección (LD) (mg/L)
0,0022	0,02	9	9

Tabla J4. Determinación de Al en un patrón certificado ALCOA SRC-6.

Patrón certificado	Masa ($\pm 0,0001$ g)	Absorbancia	Al solución original (mg/L)	Al muestra (%)	Al ₂ O ₃ (%)	Promedio	Desviación estándar	CV (%)	Error (\pm)
1	0,4993	0,166	1132,86	22,689	42,9	43,0	0,4	1	0,4
2	0,5052	0,17	1161,43	22,989	43,4				
3	0,5012	0,166	1132,86	22,603	42,7				

Valor teórico Al₂O₃= 45,8%

Tabla J5. Determinación de Al en las muestras (réplicas y control sin planta).

Muestra	Tiempo 1								
	Masa (±0,0001)	Absorbancia	Al Dilución (mg/L)	Al solución original (mg/L)	Al Muestra (%)	Al ₂ O ₃ (%)	Desviación estándar	CV (%)	Error absoluto (±)
SAS 1	1,0006	0,055		23,773	0,24	0,90	0,07	8	0,07
SAS 2	1,0005	0,062		26,955	0,27	1,02			0,08
SAS 3	1,0001	0,054		23,318	0,23	0,88			0,07
SAS 4	1,0002	0,059		25,591	0,26	0,97			0,08
Promedio				25	0,25	0,93			0,07
SLRN 3.1	1,0008	0,087		38,318	0,38	1,4	0,2	13	0,2
SLRN 3.2	1,0007	0,084		36,955	0,37	1,4			0,2
SLRN 3.3	1,0006	0,105		46,500	0,46	1,8			0,2
SLRN 3.4	1,0002	0,149		66,500	0,66	2,5			0,3
Promedio				41	0,41	1,5			0,2
SLR 3.1	1,0002	0,145		64,682	0,6	2,4	0,6	32	0,8
SLR 3.2	1,0007	0,096		42,409	0,4	1,6			0,5
SLR 3.3	1,0005	0,08		35,136	0,4	1,3			0,4
SLR 3.4	1,0006	0,089		39,227	0,4	1,5			0,5
Promedio				47	0,5	1,8			0,6
LRN 1*	1,0000	0,1080	47,864	1197	12,0	45,2	0,9	2	0,9
LRN 2*	1,0001	0,104	46,045	1151	11,5	43,5			0,9
LRN 3*	1,0005	0,1050	46,500	1163	11,6	43,9			0,9
LRN 4*	1,0000	0,1110	49,227	1231	12,3	46,5			0,9
Promedio			46,803	1170	11,7	44,2			0,9
LR 1*	0,9999	0,1	44,227	1106	11,1	41,8	1	2	0,9
LR 2*	1,0007	0,097	42,864	1072	10,7	40,5			0,8
LR 3*	1,0009	0,096	42,409	1060	10,6	40,0			0,8
LR 4*	0,9999	0,098	43,318	1083	10,8	40,9			0,8
Promedio			43,167	1079	10,8	40,8			0,8

Muestra	Tiempo 2								
	Masa (±0,0001)	Absorbancia	Al Dilución (mg/L)	Al solución original (mg/L)	Al Muestra (%)	Al ₂ O ₃ (%)	Desviación	CV (%)	Error absoluto (±)
SAS 1	1,0005	0,049		21,045	0,21	0,79	0,07	8	0,06
SAS 2	1,0005	0,057		24,682	0,25	0,93			0,07
SAS 3	1,0004	0,055		23,773	0,24	0,90			0,07
SAS 4	1,0007	0,057		24,682	0,25	0,93			0,07
Promedio				23	0,23	0,88			0,07
SLRN 3.1	1,0002	0,092		40,591	0,41	1,53	0,06	4	0,06
SLRN 3.2	1,0004	0,095		41,955	0,42	1,58			0,06
SLRN 3.3	1,0007	0,088		38,773	0,39	1,46			0,06
SLRN 3.4	1,0002	0,071		31,045	0,31	1,17			0,05
Promedio				40	0,40	1,53			0,06
SLR 3.1	0,9999	0,086		37,864	0,38	1,43	0,09	6	0,09
SLR 3.2	1,0004	0,079		34,682	0,35	1,31			0,08
SLR 3.3	1,0002	0,089		39,227	0,39	1,48			0,09
SLR 3.4	0,9999	0,083		36,500	0,37	1,38			0,08
Promedio				37	0,37	1,41			0,08
LRN 1*	1,0006	0,1090	48,318	1208	12,1	46	1	3	1
LRN 2*	1,0003	0,1070	47,409	1185	11,8	45			1
LRN 3*	1,0004	0,1030	45,591	1140	11,4	43			1
LRN 4*	1,0002	0,1160	51,500	1288	12,9	49			1
Promedio			47,106	1178	11,8	44			1
LR 1*	1,0007	0,101	44,682	1117	11,2	42	1	3	1
LR 2*	1,0000	0,1000	44,227	1106	11,1	42			1
LR 3*	1,0003	0,096	42,409	1060	10,6	40			1
LR 4*	1,0004	0,098	43,318	1083	10,8	41			1
Promedio			43,773	1094	10,9	41			1

Muestra	Tiempo 3								
	Masa (±0,0001)	Absorbancia	Al Dilución (mg/L)	Al solución original (mg/L)	Al Muestra (%)	Al ₂ O ₃ (%)	Desviación estándar	CV (%)	Error absoluto (±)
SAS 1	1,0003	0,057		24,7	0,25	0,93	0,03	3	0,03
SAS 2	1,0000	0,06		26,0	0,26	0,98			0,03
SAS 3	0,9999	0,058		25,1	0,25	0,95			0,03
SAS 4	0,9999	0,059		25,6	0,26	0,97			0,03
Promedio				25,3	0,25	0,96			0,03
SLRN 3.1	1,0002	0,088		38,773	0,39	1,5	0,1	8	0,1
SLRN 3.2	1,0007	0,099		43,773	0,44	1,7			0,1
SLRN 3.3	1,0006	0,086		37,864	0,38	1,4			0,1
SLRN 3.4	1,0005	0,104		46,045	0,46	1,7			0,1
Promedio				40,136	0,40	1,5			0,1
SLR 3.1	1,0006	0,116		51,500	0,51	1,9	0,2	11	0,2
SLR 3.2	1,0007	0,096		42,409	0,42	1,6			0,2
SLR 3.3	1,0004	0,116		51,500	0,51	1,9			0,2
SLR 3.4	1,0006	0,08		35,136	0,35	1,3			0,1
Promedio				48	0,48	1,8			0,2
LRN 1*	1,0000	0,0890	39,227	981	9,8	37,1	1	2	0,6
LRN 2*	1,0006	0,0920	40,591	1015	10,1	38,3			0,8
LRN 3*	1,0006	0,0900	39,682	992	9,9	37,5			0,7
LRN 4*	1,0003	0,1000	44,227	1106	11,1	41,8			0,8
Promedio			39,833	996	10,0	37,6			0,8
LR 1*	0,9999	0,097	42,864	1072	10,7	40,5	1	2	0,7
LR 2*	1,0005	0,096	42,409	1060	10,6	40,0			0,8
LR 3*	1,0003	0,099	43,773	1094	10,9	41,3			0,8
LR 4*	1,0000	0,0960	42,409	1060	10,6	40,1			0,8
Promedio			43,015	1075	10,8	40,6			0,8

*Muestras con un factor de dilución de 1/25

Tabla J6. Determinación de Al en los lixiviados de las muestras (réplicas y control sin planta).

Tiempo	Muestra	Absorción	Al Dilución (mg/L)	Absorción	Al solución original (mg/L)
	Lixiviado				
2	SAS 1				<9
	SAS 2				<9
	SAS 3				<9
	SAS 4				<9
2	SLRN 3.1				<9
	SLRN 3.2				<9
	SLRN 3.3*				<9
	SLRN 3.4				<9
3	SLRN 3.4				<9
2	SLR 3.1			0,132	59
	SLR 3.2				<9
	SLR 3.3*	0,011	3,773		38
	SLR 3.4			0,071	31
	Intervalo				[6,59]
3	SLR 3.1*	0,063	27,409		274
	SLR 3.2*	0,112	49,682		497
	SLR 3.3			0,044	19
	SLR 3.4			0,170	76
	Intervalo				[19,497]

*Muestras con un factor de dilución de 1/10

Tabla J7. Ecuaciones empleadas para calcular Al en la muestra.

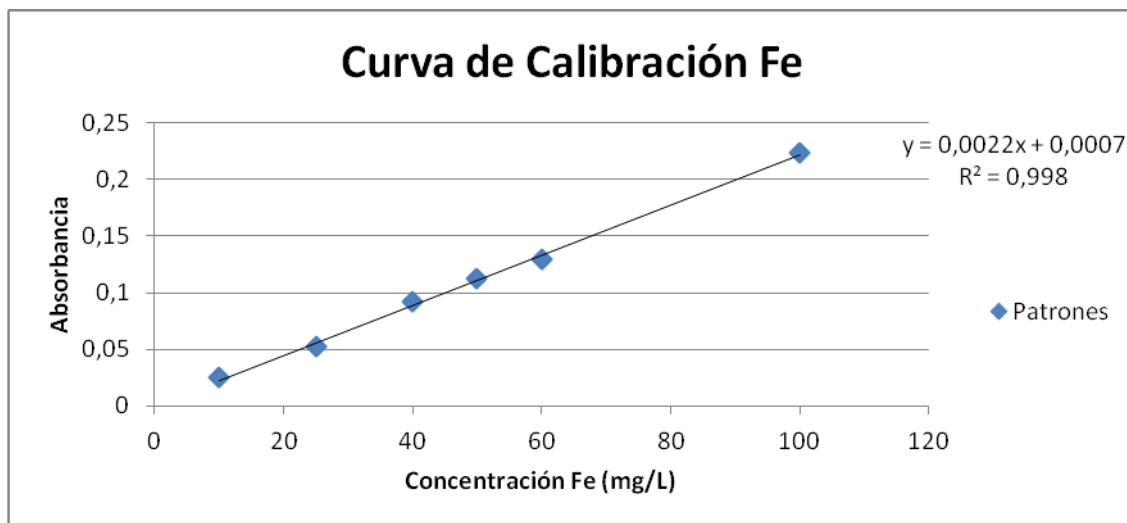
Análisis químico	Ecuaciones
Determinación de concentración elemental por absorción y emisión atómica.	$y = mx + b$ <p>Donde: y: señal del equipo. m: Pendiente de la curva de calibrado. x: Concentración del analito en la dilución. b: punto de intersección con el eje de las ordenadas.</p>
	$C_X = \frac{C_{XD} \times V_D}{V_A}$ <p>Donde: C_X: concentración del analito en la solución original. C_{XD}: concentración del analito en la dilución. V_D: volumen de la dilución. V_A: volumen de la alícuota.</p>

Análisis químico	Ecuaciones
Determinación de concentración elemental por absorción y emisión atómica.	$\% p/p = \frac{C_x \times V}{P_m} \times 100$ <p>Donde: C_A: Concentración del analito en solución. V: Volumen de la solución. P_m: Peso de la muestra.</p>

APÉNDICE K – Determinación de Fe en las muestras.

Tabla K1. Datos para elaborar la curva de calibración de Fe.

Patrón	Fe (mg/L)	Absorbancia
1	10	0,025
2	25	0,053
3	40	0,092
4	50	0,113
5	60	0,129
6	100	0,224



Gráfica K1. Curva de calibración para Fe.

Tabla K2. Valores de los blancos.

Blanco	Absorbancia	Promedio	Desviación
1	0,003	0,003	0,0007
2	0,002		

Tabla K3. Parámetros de calidad del método.

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)
0,002	0,005	1	1	4

Tabla K4. Determinación de Fe en un patrón certificado ALCOA SRC-6.

Patrón certificado	Masa ($\pm 0,0001$ g)	Absorbancia	Fe solución original (mg/L)	Fe muestra (%)	Fe ₂ O ₃ (%)	Promedio	Desviación estándar	CV (%)	Error (\pm)
1	0,4993	0,266	740,59	14,833	21,19	21,1	0,1	0,5	0,1
2	0,5052	0,268	746,47	14,776	21,11				
3	0,5012	0,265	737,65	14,718	21,03				

Valor teórico Fe₂O₃= 20,0%

Tabla K5. Determinación de Fe en muestras (réplicas y control sin planta).

Muestra	Tiempo 1								
	Masa (±0,0001)	Absorbancia	Fe Dilución(mg/L)	Fe solución original (mg/L)	Fe Muestra (%)	Fe ₂ O ₃ (%)	Desviación estándar	CV (%)	Error absoluto (±)
SAS 1	1,0006	0,119		53	0,53	1,51	0,05	3	0,05
SAS 2	1,0005	0,126		56	0,56	1,60			0,05
SAS 3	1,0001	0,125		56	0,55	1,59			0,05
SAS 4	1,0002	0,135		60	0,60	1,72			0,05
Promedio				55	0,55	1,56			0,05
SLRN 3.1	1,0008	0,165		74	0,74	2,1	0,2	10	0,2
SLRN 3.2	1,0007	0,142		63	0,63	1,8			0,2
SLRN 3.3	1,0006	0,17		76	0,76	2,2			0,2
SLRN 3.4	1,0002	0,22		99	0,99	2,8			0,3
Promedio				71	0,71	2,0			0,2
SLR 3.1	1,0002	0,281		126	1,3	3,6	0,8	30	1
SLR 3.2	1,0007	0,191		86	0,9	2,4			0,7
SLR 3.3	1,0005	0,161		72	0,7	2,1			0,6
SLR 3.4	1,0006	0,178		80	0,8	2,3			0,7
Promedio				95	0,9	2,7			0,8
LRN 1*	1,0000	0,1400	63	1582	15,8	45	3	6	3
LRN 2*	1,0001	0,124	56	1401	14,0	40			2
LRN 3*	1,0005	0,1360	61	1537	15,4	44			3
LRN 4*	1,0000	0,1270	57	1435	14,3	41			2
Promedio			60	1507	15,1	43			3
LR 1*	0,9999	0,18	81	2037	20,4	58	1	2	1
LR 2*	1,0007	0,183	83	2071	20,7	59			1
LR 3*	1,0009	0,177	80	2003	20,0	57			1
LR 4*	0,9999	0,189	86	2139	21,4	61			1
Promedio			81	2037	20,4	58			1

Muestra	Tiempo 2								
	Masa (±0,0001)	Absorbancia	Fe Dilución(mg/L)	Fe solución original (mg/L)	Fe Muestra (%)	Fe ₂ O ₃ (%)	Desviación estándar	CV (%)	Error absoluto (±)
SAS 1	1,0005	0,171		76	0,8	2,2	0,4	25	0,6
SAS 2	1,0005	0,126		56	0,6	1,6			0,4
SAS 3	1,0004	0,106		47	0,5	1,3			0,3
SAS 4	1,0007	0,132		59	0,6	1,7			0,4
Promedio				60	0,6	1,7			0,4
SLRN 3.1	1,0002	0,154		69	0,69	2,0	0,1	5	0,1
SLRN 3.2	1,0004	0,17		76	0,76	2,2			0,1
SLRN 3.3	1,0007	0,162		72	0,72	2,1			0,1
SLRN 3.4	1,0002	0,144		65	0,65	1,8			0,1
Promedio				72	0,72	2,1			0,1
SLR 3.1	1,0006	0,221		99	1,0	2,8	0,3	12	0,3
SLR 3.2	1,0007	0,184		82	0,8	2,4			0,3
SLR 3.3	1,0004	0,231		104	1,0	3,0			0,4
SLR 3.4	1,0006	0,172		77	0,8	2,2			0,3
Promedio				95	0,9	2,7			0,3
LRN 1*	1,0006	0,1360	61	1537	15,4	44	1	3	1
LRN 2*	1,0003	0,1380	62	1560	15,6	45			1
LRN 3*	1,0004	0,1300	59	1469	14,7	42			1
LRN 4*	1,0002	0,1460	66	1651	16,5	47			1
Promedio			61	1522	15,2	43			1
LR 1*	1,0007	0,191	86	2162	21,6	62	3	4	3
LR 2*	1,0000	0,1800	81	2037	20,4	58			2
LR 3*	1,0003	0,175	79	1980	19,8	57			2
LR 4*	1,0004	0,176	80	1991	19,9	57			2
Promedio			82	2060	20,6	59			2

Muestra	Tiempo 3								
	Masa (±0,0001)	Absorbancia	Fe Dilución(mg/L)	Fe solución original (mg/L)	Fe Muestra (%)	Fe ₂ O ₃ (%)	Desviación estándar	CV (%)	Error absoluto (±)
SAS 1	1,0003	0,123		55	0,55	1,6	0,1	7	0,1
SAS 2	1,0000	0,141		63	0,63	1,8			0,1
SAS 3	0,9999	0,127		56	0,56	1,6			0,1
SAS 4	0,9999	0,121		54	0,54	1,5			0,1
Promedio				58	0,58	1,7			0,1
SLRN 3.1	1,0002	0,154		69	0,69	2,0	0,07	7	0,1
SLRN 3.2	1,0007	0,163		73	0,73	2,1			0,1
SLRN 3.3	1,0006	0,154		69	0,69	2,0			0,1
SLRN 3.4	1,0005	0,162		72	0,72	2,1			0,1
Promedio				70	0,70	2,0			0,1
SLR 3.1	0,9999	0,185		83	0,8	2,4	0,3	13	0,3
SLR 3.2	1,0004	0,144		65	0,6	1,8			0,2
SLR 3.3	1,0002	0,167		75	0,7	2,1			0,3
SLR 3.4	0,9999	0,204		92	0,9	2,6			0,3
Promedio				74	0,7	2,1			0,3
LRN 1*	1,0000	0,1390	63	1571	16	45	3	7	3
LRN 2*	1,0006	0,1460	66	1651	16	47			3
LRN 3*	1,0006	0,1270	57	1435	14	41			3
LRN 4*	1,0003	0,1520	69	1719	17	49			3
Promedio			62	1552	16	44			3
LR 1*	0,9999	0,186	84	2105	21,1	60	2	4	2
LR 2*	1,0005	0,176	80	1991	19,9	57			2
LR 3*	1,0003	0,189	86	2139	21,4	61			2
LR 4*	1,0000	0,1800	81	2037	20,4	58			2
Promedio			83	2079	20,8	59			2

*Muestras con un factor de dilución de 1/25

Tabla K6. Determinación de Fe en el lixiviado de las muestras (réplicas y control sin planta).

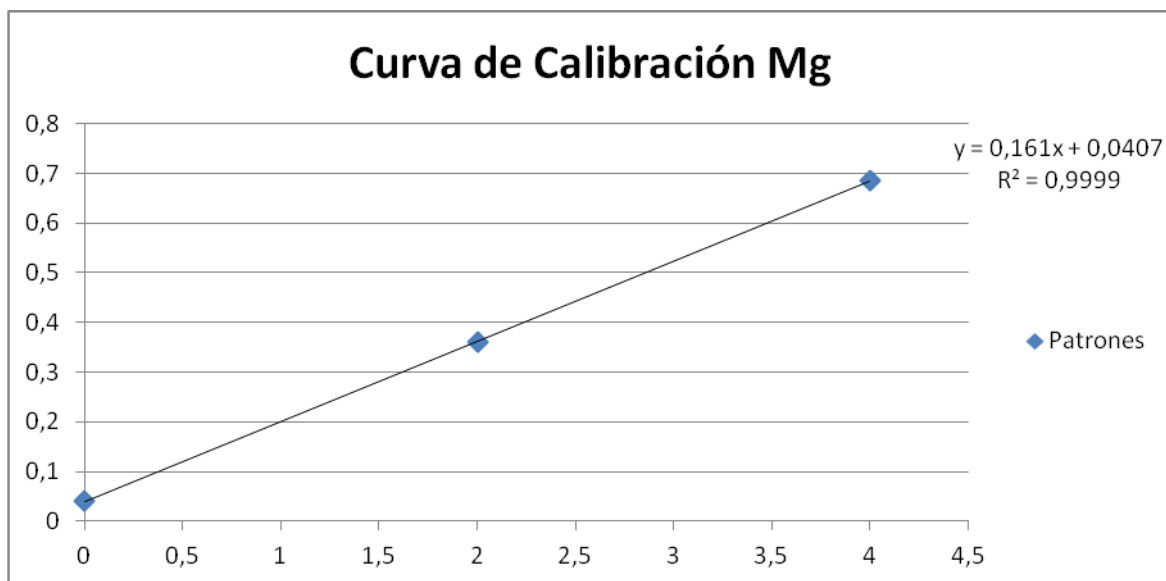
Tiempo	Muestra	Absorbancia	Fe Dilución(mg/L)	Absorbancia	Fe solución original (mg/L)
	Lixiviado				
2	SAS 1			0	<3,8
	SAS 2			-0,002	<3,8
	SAS 3			-0,001	<3,8
	SAS 4			0,003	<3,8
2	SLRN 3.1			0,008	<3,8
	SLRN 3.2			0,008	<3,8
	SLRN 3.3			0,007	<3,8
	SLRN 3.4			0,008	<3,8
3	SLRN 3.4			0,005	<3,8
2	SLR 3.1			0,182	82
	SLR 3.2			0,052	23
	SLR 3.3			0,133	60
	SLR 3.4			0,115	52
	Intervalo				[23,82]
3	SLR 3.1*	0,067	30,1363636		301
	SLR 3.2*			0,161	73
	SLR 3.3			0,166	75
	SLR 3.4			0,102	46
	Intervalo				[46,301]

*Muestra con un factor de dilución de 1/10

APÉNDICE L – Determinación de Mg en las muestras.

Tabla L1. Datos para elaborar la curva de calibración de Mg.

Patrón	Mg (mg/L)	Absorbancia
Blanco	0	0,042
1	2	0,36
2	4	0,686



Gráfica L1. Curva de calibración para Mg.

Tabla L2. Valores de los blancos.

Blanco	Absorbancia	Promedio	Desviación
1	0,04	0,03	0,02
2	0,01		

Tabla L3. Parámetros de calidad del método.

Sensibilidad de calibrado (S)	Mínima señal analítica distinguible (Sm)	Concentración mínima detectable (Cm) (mg/L)	Límite de detección (LD) (mg/L)
0,2	0,09	0,4	0,4

Tabla L4. Determinación de Mg en un patrón certificado ALCOA SRC-6.

Patrón certificado	Masa ($\pm 0,0001$ g)	Absorbancia	Mg solución original (mg/L)	Mg muestra (%)	MgO (%)	Promedio	Desviación estándar	CV (%)	Error (\pm)
1	0,4993	0,175	3,059	0,061	0,10	0,104	0,002	2	0,002
2	0,5052	0,18	3,208	0,063	0,11				
3	0,5012	0,178	3,148	0,063	0,10				

Valor teórico MgO= 0,18%

Tabla L5. Determinación de Mg en las muestras (réplicas y control sin planta).

Muestra	Tiempo 1								
	Masa ($\pm 0,0001$)	Absorbancia	Mg Dilución (mg/L)	Mg solución original (mg/L)	Mg Muestra (mg/Kg)	MgO (mg/Kg)	Desviación estándar	CV (%)	Error absoluto (\pm)
SAS 1	1,0006	0,063	/	0,14	14	23	8	26	6
SAS 2	1,0005	0,078	/	0,23	23	38			10
SAS 3	1,0001	0,068	/	0,17	17	28			7
SAS 4	1,0002	0,083	/	0,26	26	44			11
Promedio				0,18	18	30			8
SLRN 3.1	1,0008	0,299	/	1,6	160	266	82	29	77
SLRN 3.2	1,0007	0,246	/	1,3	127	211			61
SLRN 3.3	1,0006	0,402	/	2,2	224	372			108
SLRN 3.4	1,0002	0,792	/	5	467	774			224
Promedio				1,7	171	283			82
SLR 3.1	1,0002	0,083	/	0,26	26	44	3	7	3
SLR 3.2	1,0007	0,082	/	0,26	26	43			3
SLR 3.3	1,0005	0,088	/	0,29	29	49			3
SLR 3.4	1,0006	0,092	/	0,32	32	53			4
Promedio				0,27	27	45			3

Muestra	Tiempo 1								
	Masa (±0,0001)	Absorbancia	Mg Dilución (mg/L)	Mg solución original (mg/L)	Mg Muestra (mg/Kg)	MgO (mg/Kg)	Desviación estándar	CV (%)	Error absoluto (±)
LRN 1*	1,0000	0,6640	3,804	95	0,95	1,58	0,02	2	0,03
LRN 2*	1,0001	0,6600	3,780	95	0,95	1,57			0,03
LRN 3*	1,0005	0,6450	3,692	92	0,92	1,53			0,03
LRN 4*	1,0000	0,7030	4,033	101	1,01	1,67			0,03
Promedio			3,759	94	0,94	1,56			0,03
LR 1	0,9999	0,233	/	1,27	127	211	5	3	5
LR 2	1,0007	0,231	/	1,26	126	209			6
LR 3	1,0009	0,223	/	1,21	121	201			6
LR 4	0,9999	0,229	/	1,25	125	207			6
Promedio			/	1,25	125	207			6
Muestra	Tiempo 2								
	Masa (±0,0001)	Absorbancia	Mg Dilución (mg/L)	Mg solución original (mg/L)	Mg Muestra (mg/Kg)	MgO (mg/Kg)	Desviación estándar	CV (%)	Error absoluto (±)
SAS 1	1,0005	0,066	/	0,16	16	26	6	19	5
SAS 2	1,0005	0,076	/	0,22	22	36			7
SAS 3	1,0004	0,067	/	0,16	16	27			5
SAS 4	1,0007	0,068	/	0,17	17	28			5
Promedio			/	0,18	18	30			6
SLRN 3.1	1,0002	0,288	/	1,5	154	255	31	11	28
SLRN 3.2	1,0004	0,348	/	1,9	191	316			35
SLRN 3.3	1,0007	0,312	/	1,7	168	279			31
SLRN 3.4	1,0002	0,205	/	1,1	111	184			20
Promedio			/	1,7	171	283			31
SLR 3.1	0,9999	0,066	/	0,29	29	48	3	6	3
SLR 3.2	1,0004	0,071	/	0,32	32	53			3

Muestra	Tiempo 1								
	Masa (±0,0001)	Absorbancia	Mg Dilución (mg/L)	Mg solución original (mg/L)	Mg Muestra (mg/Kg)	MgO (mg/Kg)	Desviación estándar	CV (%)	Error absoluto (±)
SLR 3.3	1,0002	0,072	/	0,33	33	54			3
SLR 3.4	0,9999	0,067	/	0,30	30	49			3
Promedio			/	0,31	31	52			3
LRN 1*	1,0006	0,7400	4,250	106	1,06	1,8	0,1	8	0,1
LRN 2*	1,0003	0,6380	3,651	91	0,91	1,5			0,1
LRN 3*	1,0004	0,7130	4,092	102	1,02	1,7			0,1
LRN 4*	1,0002	0,6260	3,581	90	0,90	1,5			0,1
Promedio			3,998	100	1,00	1,7			0,1
LR 1	1,0007	0,231	/	1,26	126	209	10	5	10
LR 2	1,0000	0,213	/	1,16	116	192			10
LR 3	1,0003	0,229	/	1,25	125	207			10
LR 4	1,0004	0,230	/	1,26	125	208			10
Promedio			/	1,22	122	203			10
Muestra	Tiempo 3								
	Masa (±0,0001)	Absorbancia	Mg Dilución (mg/L)	Mg solución original (mg/L)	Mg Muestra (mg/Kg)	MgO (mg/Kg)	Desviación estándar	CV (%)	Error absoluto (±)
SAS 1	1,0003	0,072	/	0,19	19	32	2	7	2
SAS 2	1,0000	0,076	/	0,22	22	36			3
SAS 3	0,9999	0,072	/	0,19	19	32			2
SAS 4	0,9999	0,07	/	0,18	18	30			2
Promedio			/	0,20	20	34			2
SLRN 3.1	1,0002	0,3	/	1,6	161	267	36	14	36
SLRN 3.2	1,0007	0,334	/	1,8	182	302			42
SLRN 3.3	1,0006	0,264	/	1,4	139	230			32
SLRN 3.4	1,0005	0,289	/	1,5	154	256			36

Muestra	Tiempo 3								
	Masa (±0,0001)	Absorbancia	Mg Dilución (mg/L)	Mg solución original (mg/L)	Mg Muestra (mg/Kg)	MgO (mg/Kg)	Desviación estándar	CV (%)	Error absoluto (±)
Promedio				1,6	161	266			37
SLR 3.1	1,0006	0,084		0,27	27	45	12	22	10
SLR 3.2	1,0007	0,1		0,37	37	61			13
SLR 3.3									
SLR 3.4	1,0006	0,08		0,24	24	40			9
Promedio				0,32	32	53			12
LRN 1*	1,0000	0,6210	3,551	89	0,89	1,47	0,08	5	0,08
LRN 2*	1,0006	0,6090	3,481	87	0,87	1,44			0,07
LRN 3*	1,0006	0,6700	3,839	96	0,96	1,59			0,08
LRN 4*	1,0003	0,6010	3,434	86	0,86	1,42			0,07
Promedio			3,624	91	0,91	1,50			0,08
LR 1	0,9999	0,227		1,24	124	205	3	1	3
LR 2	1,0005	0,222		1,21	121	200			2
LR 3	1,0003	0,226		1,23	123	204			2
LR 4	1,0000	0,228		1,24	124	206			2
Promedio				1,23	123	203			2

*Muestras con un factor de dilución de 1/25.

Tabla L6. Determinación de Mg en los lixiviados de las muestras (réplicas y control sin planta).

Tiempo	Muestra	Absorbancia	Mg Dilución (mg/L)	Mg solución original (mg/L)	Desviación	CV (%)	Error absoluto (±)
	Lixiviado						
2	SAS 1 ^a	0,123	0,6	3,1	1	29	0,9
	SAS 2 ^a	0,145	0,8	4			1
	SAS 3 ^a	0,086	0,4	2,0			0,6
	SAS 4 ^a	0,128	0,7	3			1
	Promedio		0,6	3,0			0,9
2	SLRN 3.1 ^b	0,601	3,4	687	176	31	213
	SLRN 3.2 ^b	0,575	3,3	656			203
	SLRN 3.3 ^b	0,517	2,9	368			114
	SLRN 3.4 ^b	0,424	2,4	479			148
	Promedio		3,2	570			177
3	SLRN 3.4 ^b			226			70
2	SLR 3.1 ^a	0,267	1,5	7	2	39	3
	SLR 3.2 ^a	0,235	1,3	6			3
	SLR 3.3 ^c	0,07	0,3	3			1
	SLR 3.4 ^a	0,203	1,1	5			2
	Promedio		1,0	6			2
3	SLR 3.1 ^c	0,179	1,0	10	3	35	3
	SLR 3.2 ^c	0,094	0,5	5			2
	SLR 3.3 ^c	0,145	0,8	8			3
	SLR 3.4 ^a	0,118	0,6	3			1
	Promedio		0,7	7			3

^aMuestra con un factor de dilución de 1/5.

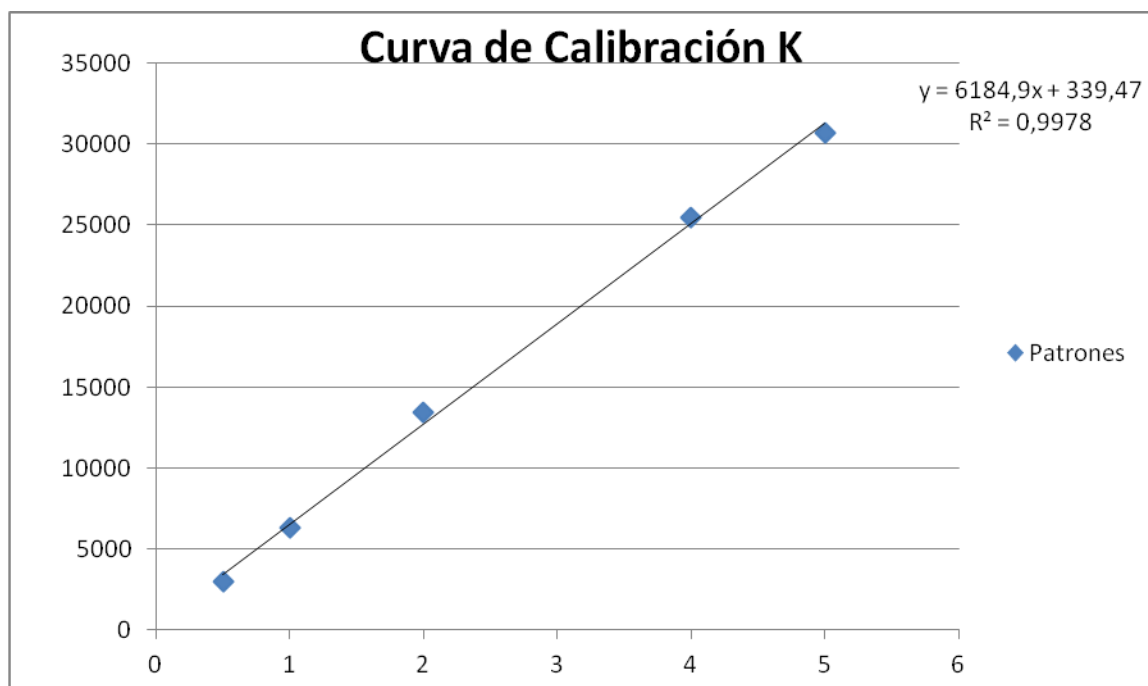
^bMuestra con un factor de dilución de 1/200.

^cMuestra con un factor de dilución de 1/10.

APÉNDICE M – Determinación de K en las muestras.

Tabla M1. Datos para elaborar la curva de calibración de K.

Patrón	K (mg/L)	Intensidad
1	0,5	3033
2	1	6303
3	2	13462
4	4	25502
5	5	30709



Gráfica M1. Curva de calibración para K.

Tabla M2. Valores de los blancos.

Blanco	Intensidad	Promedio	Desviación
1	238	147	129
2	56		

Tabla M3. Parámetros de calidad del método.

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)
3467	533	0,06	0,06	0,2

Tabla M4. Determinación de K en un patrón certificado ALCOA SRC-6.

Patrón certificado	Masa ($\pm 0,0001$ g)	Intensidad	K solución original (mg/L)	K muestra (%)	K ₂ O (%)	Promedio	Desviación estándar	CV (%)	Error (\pm)
1	0,4993	8166	1,326	0,027	0,032	0,035	0,002	6	0,002
2	0,5052	8887	1,483	0,029	0,035				
3	0,5012	8977	1,503	0,030	0,036				

Valor teórico K₂O= 0,062%

Tabla M5. Determinación de K en las muestras (réplicas y control sin planta).

Muestra	Tiempo 1								
	Masa ($\pm 0,0001$)	Intensidad	K Dilución (mg/L)	K solución original (mg/L)	K Muestra (mg/Kg)	K ₂ O (mg/Kg)	Desviación estándar	CV (%)	Error absoluto (\pm)
SAS 1	1,0006	8894	/	1,38	138	333	20	6	20
SAS 2	1,0005	9583	/	1,49	149	360		6	22
SAS 3	1,0001	8577	/	1,33	133	321		6	19
SAS 4	1,0002	9528	/	1,49	149	358		6	21
Promedio			/	1,40	140	338		6	20
SLRN 3.1	1,0008	11665	/	1,83	183	441	8	2	8
SLRN 3.2	1,0007	11397	/	1,79	179	430		2	9

Muestra	Tiempo 1								
	Masa (±0,0001)	Intensidad	K Dilución (mg/L)	K solución original (mg/L)	K Muestra (mg/Kg)	K ₂ O (mg/Kg)	Desviación estándar	CV (%)	Error absoluto (±)
SLRN 3.3	1,0006	11807		1,85	185	446		2	9
SLRN 3.4	1,0002	15050		2,38	238	573		2	11
Promedio				1,82	182	439		2	9
SLR 3.1	1,0002	9046		1,41	141	339	17	5	17
SLR 3.2	1,0007	8926		1,39	139	334		5	17
SLR 3.3	1,0005	9734		1,52	152	366		5	18
SLR 3.4	1,0006	10061		1,57	157	378		5	19
Promedio				1,44	144	346		5	17
LRN 1*	1,0000	8984	1,40	34,9	3494	8418	121	1	119
LRN 2*	1,0001	9144	1,42	35,6	3559	8573		1	86
LRN 3*	1,0005	9233	1,44	35,9	3593	8656		1	87
LRN 4*	1,0000	9572	1,49	37,3	3732	8991		1	90
Promedio			1,42	35,5	3549	8549		1	85
LR 1	0,9999	5818		0,89	89	213	3	1	3
LR 2	1,0007	5727		0,87	87	210		1	2
LR 3	1,0009	5688		0,86	86	208		1	2
LR 4	0,9999	5550		0,84	84	203		1	2
Promedio				0,87	87	210		1	2
Muestra	Tiempo 2								
	Masa (±0,0001)	Intensidad	K Dilución (mg/L)	K solución original (mg/L)	K Muestra (mg/Kg)	K ₂ O (mg/Kg)	Desviación estándar	CV (%)	Error absoluto (±)
SAS 1	1,0005	7534		1,16	116	280	20	7	18
SAS 2	1,0005	8508		1,32	132	318		7	22
SAS 3	1,0004	8252		1,28	128	308		7	22
SAS 4	1,0007	8731		1,36	136	327		7	23

Muestra	Tiempo 2								
	Masa (±0,0001)	Intensidad	K Dilución (mg/L)	K solución original (mg/L)	K Muestra (mg/Kg)	K ₂ O (mg/Kg)	Desviación estándar	CV (%)	Error absoluto (±)
Promedio				1,25	125	302		7	21
SLRN 3.1	1,0002	11152		1,7	175	421	29	7	29
SLRN 3.2	1,0004	12213		1,9	192	462		7	32
SLRN 3.3	1,0007	10751		1,7	168	405		7	28
SLRN 3.4	1,0002	8552		1,3	133	320		7	22
Promedio				1,8	178	430		7	30
SLR 3.1	0,9999	8101		1,25	126	302	20	6	19
SLR 3.2	1,0004	8819		1,37	137	330		6	20
SLR 3.3	1,0002	9111		1,42	142	342		6	20
SLR 3.4	0,9999	7623		1,18	118	284		6	17
Promedio				1,35	135	325		6	19
LRN 1*	1,0006	7727	1,2	30	2984	7190	1223	19	1352
LRN 2*	1,0003	5572	0,8	21	2114	5094		19	968
LRN 3*	1,0004	7771	1,2	30	3003	7234		19	1374
LRN 4*	1,0002	6172	0,9	24	2357	5679		19	1079
Promedio			1,1	27	2700	6506		19	1236
LR 1	1,0007	7823		1,21	121	291	11	4	11
LR 2	1,0000	7547		1,17	117	281		4	11
LR 3	1,0003	8107		1,26	126	302		4	12
LR 4	1,0004	6473		0,99	99	239		4	10
Promedio				1,21	121	292		4	12
Muestra	Tiempo 3								
	Masa (±0,0001)	Intensidad	K Dilución (mg/L)	K solución original (mg/L)	K Muestra (mg/Kg)	K ₂ O (mg/Kg)	Desviación estándar	CV (%)	Error absoluto (±)
SAS 1	1,0003	8771		1,36	136	328	10	3	10

Muestra	Tiempo 3								
	Masa (±0,0001)	Intensidad	K Dilución (mg/L)	K solución original (mg/L)	K Muestra (mg/Kg)	K ₂ O (mg/Kg)	Desviación estándar	CV (%)	Error absoluto (±)
SAS 2	1,0000	9073		1,41	141	340		3	10
SAS 3	0,9999	8546		1,33	133	320		3	10
SAS 4	0,9999	9191		1,43	143	345		3	10
Promedio				1,37	137	329		3	10
SLRN 3.1	1,0002	11086		1,7	174	419	23	6	23
SLRN 3.2	1,0007	11270		1,8	177	425		6	26
SLRN 3.3	1,0006	10186		1,6	159	383		6	23
SLRN 3.4	1,0005	10818		1,7	169	408		6	24
Promedio				1,7	170	409		6	25
SLR 3.1	1,0006	9807		1,53	153	369	19	5	18
SLR 3.2	1,0007	9857		1,54	154	370		5	19
SLR 3.3	1,0004	10675		1,67	167	402		5	20
SLR 3.4	1,0006	7427		1,15	115	276		5	14
Promedio				1,58	158	380		5	19
LRN 1*	1,0000	4968	0,75	19	1871	4507	416	9	409
LRN 2*	1,0006	4675	0,70	18	1751	4220		9	380
LRN 3*	1,0006	5518	0,84	21	2092	5040		9	454
LRN 4*	1,0003	5031	0,76	19	1896	4567		9	411
Promedio			0,76	19	1905	4589		9	413
LR 1	0,9999	6808		1,05	105	252	2	1	2
LR 2	1,0005	6691		1,03	103	247		1	2
LR 3	1,0003	6738		1,03	103	249		1	2
LR 4	1,0000	5725		0,87	87	210		1	2
Promedio				1,04	104	249		1	2

*Muestra con un factor de dilución de 1/25.

Tabla M6. Determinación de K en los lixiviados de las muestras (réplicas y control sin muestra).

Tiempo	Muestra Lixiviado	Intensidad	K Dilución (mg/L)	K solución original (mg/L)	Desviación	CV (%)	Error absoluto (±)
2	SAS 1 ^a	16554	2,62	13,1	0,2	2	0,2
	SAS 2 ^a	17093	2,71	13,5			0,3
	SAS 3 ^a	16679	2,64	13,2			0,3
	SAS 4 ^a	19070	3,03	15,1			0,3
	Promedio		2,66	13,3			0,3
2	SLRN 3.1 ^b	9581	1,5	299	32	11	32
	SLRN 3.2 ^b	10496	1,6	328			36
	SLRN 3.3 ^c	8527	1,3	265			29
	SLRN 3.4 ^b	6747	1,0	207			23
	Promedio		1,5	297			33
3	SLRN 3.4 ^b		0,5	96			11
2	SLR 3.1 ^a	36334	5,8	145	20	16	23
	SLR 3.2 ^a	29178	4,7	117			19
	SLR 3.3 ^d	14778	2,3	23			4
	SLR 3.4 ^a	29968	4,8	120			19
	Intervalo		4,3	[23,145]			21
3	SLR 3.1 ^d	28457	4,5	45	10	18	8
	SLR 3.3 ^d	12346	1,9	19			3
	SLR 3.4 ^a	20537	3,3	16			3
	Intervalo		3,2	[19,45]			9

^a Muestra con un factor de dilución de 1/5.

^b Muestra con un factor de dilución de 1/200.

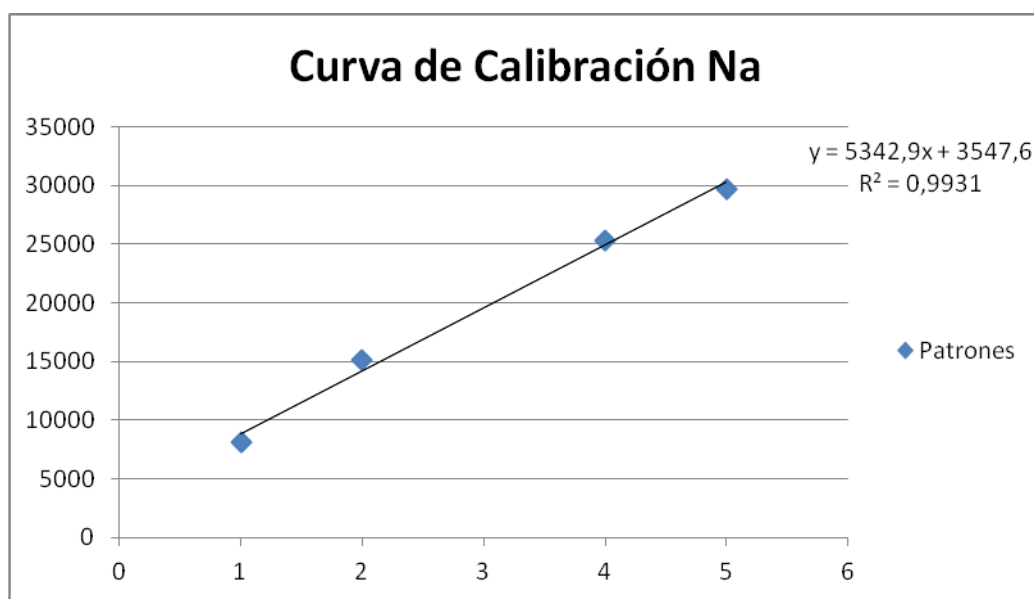
^c Muestra con un factor de dilución de 1/125.

^d Muestra con un factor de dilución de 1/10.

APÉNDICE N – Determinación de Na en las muestras.

Tabla N1. Datos para elaborar la curva de calibración de Na.

Patrón	Na (mg/L)	Intensidad
1	1	8089
2	2	15158
3	4	25351
4	5	29707



Gráfica N1. Curva de calibración para Na.

Tabla N2. Valores de los blancos.

Blanco	Intensidad	Promedio	Desviación
1	11253	10152	1557
2	9051		

Tabla N3. Parámetros de calidad del método.

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)
5343	14823	0,9	0,9	3

Tabla N4. Determinación de Na en un patrón certificado ALCOA SRC-6.

Patrón certificado	Masa ($\pm 0,0001$ g)	Intensidad	Na solución original (mg/L)	Na muestra (%)	Na ₂ O (%)	Promedio	Desviación estándar	CV (%)	Error (\pm)
1	0,4993	15032	1,061	0,021	0,029	0,031	0,002	7	0,002
2	0,5052	15479	1,158	0,023	0,031				
3	0,5012	15826	1,233	0,025	0,033				

Valor teórico Na₂O= 0,036%

Tabla N6. Determinación de Na en las muestras (réplicas y control sin planta).

Muestra	Tiempo 1								
	Masa ($\pm 0,0001$ g)	Intensidad	Na Dilución (mg/L)	Na solución original (mg/L)	Na muestra (mg/Kg)	Na ₂ O (%)	Desviación estándar	CV (%)	Error absoluto (\pm)
SLRN 3.1	1,0008	38287			7	650	0,18	37	0,06
SLRN 3.2	1,0007	35202			6	592	0,16		0,06
SLRN 3.3 ^a	1,0006	21584	3		11	1123	0,3		0,1
SLRN 3.4 ^b	1,0002	23260	4		18	1844	0,5		0,2
Promedio					8	788	0,21		0,08
SLR 3.1 ^c	1,0002	15040	2		5	538	0,10	33	0,03
SLR 3.2 ^d	1,0007	21537	3		8	841	0,23		0,07
SLR 3.3 ^d	1,0005	13388	2		5	460	0,12		0,04
SLR 3.4 ^d	1,0006	14383	2		5	507	0,14		0,05
Promedio			2		7	651	0,18		0,06
LRN 1 ^e	1,0000	13923	2		485	48548	13,1	0,8	0,1
LRN 2 ^e	1,0001	13803	2		480	47981	12,9		0,1
LRN 3 ^e	1,0005	13955	2		487	48673	13,1		0,1
LRN 4 ^e	1,0000	14937	2		533	53292	14,4		0,1

Muestra	Tiempo 1								
	Masa (±0,0001g)	Intensidad	Na Dilución (mg/L)	Na solución original (mg/L)	Na muestra (mg/Kg)	Na ₂ O (%)	Desviación estándar	CV (%)	Error absoluto (±)
Promedio			2	484	48401	13,0			0,1
LR 1 ^e	0,9999	14519	2	513	51341	13,8	0,2	2	0,2
LR 2 ^e	1,0007	14483	2	500	49973	13,5			0,3
LR 3 ^e	1,0009	13855	2	497	49663	13,4			0,3
LR 4 ^e	0,9999	14469	2	567	56732	15,3			0,3
Promedio			2	504	50326	13,6			0,3
Muestra	Tiempo 2								
	Masa (±0,0001g)	Intensidad	Na Dilución (mg/L)	Na solución original (mg/L)	Na muestra (mg/Kg)	Na ₂ O (%)	Desviación estándar	CV (%)	Error absoluto (±)
SLRN 3.1	1,0002	40053		7	683	0,18	0,03	16	0,03
SLRN 3.2 ^a	1,0004	16897	3	8	832	0,22		16	0,04
SLRN 3.3	1,0007	35872		6	605	0,16		16	0,03
SLRN 3.4	1,0002	28550		5	468	0,13		16	0,02
Promedio				7	706	0,19		16	0,03
SLR 3.1 ^d	0,9999	21765	3	9	852	0,23	0,03	14	0,03
SLR 3.2 ^d	1,0004	20149	3	8	776	0,21		14	0,03
SLR 3.3 ^d	1,0002	25186	4	10	1012	0,27		14	0,04
SLR 3.4 ^d	0,9999	20044	3	8	772	0,21		14	0,03
Promedio			4	9	880	0,24		14	0,03
LRN 1 ^e	1,0006	13689	2	475	47424	13	2	19	2
LRN 2 ^e	1,0003	10875	1	343	34275	9		19	2
LRN 3 ^e	1,0004	14019	2	490	48977	13		19	3
LRN 4 ^e	1,0002	10819	1	340	34017	9		19	2
Promedio			2	436	43559	12		19	2

Muestra	Tiempo 2								
	Masa (±0,0001g)	Intensidad	Na Dilución (mg/L)	Na solución original (mg/L)	Na muestra (mg/Kg)	Na ₂ O (%)	Desviación estándar	CV (%)	Error absoluto (±)
LR 1 ^e	1,0007	14235	2	500	49973	13	1	8	1
LR 2 ^e	1,0000	14171	2	497	49708	13		8	1
LR 3 ^e	1,0003	15671	2	567	56710	15		8	1
LR 4 ^e	1,0004	15242	2	547	54697	15		8	1
Promedio			2	521	52130	14		8	1
Muestra	Tiempo 3								
	Masa (±0,0001g)	Intensidad	Na Dilución (mg/L)	Na solución original (mg/L)	Na muestra (mg/Kg)	Na ₂ O (%)	Desviación estándar	CV (%)	Error absoluto (±)
SLRN 3.1	1,0002	37213		6	630	0,17	0,01	7	0,01
SLRN 3.2	1,0007	37605		6	637	0,17		7	0,01
SLRN 3.3	1,0006	33327		6	557	0,15		7	0,01
SLRN 3.4	1,0005	31177		5	517	0,14		7	0,01
Promedio				6	608	0,16		7	0,01
SLR 3.1 ^d	1,0006	28908	5	12	1186	0,32	0,04	12	0,04
SLR 3.2 ^d	1,0007	25091	4	10	1007	0,27		12	0,03
SLR 3.3 ^d	1,0004	31096	5	13	1289	0,35		12	0,04
SLR 3.4 ^d	1,0006	19212	3	7	733	0,20		12	0,02
Promedio			5	12	1161	0,31		12	0,04
LRN 1 ^e	1,0000	10123	1	308	30767	8	1	16	1
LRN 2 ^e	1,0006	9681	1	287	28682	8		16	1
LRN 3 ^e	1,0006	11740	2	383	38310	10		16	2
LRN 4 ^e	1,0003	9649	1	285	28541	8		16	1
Promedio			1	326	32586	9		16	1
LR 1 ^e	0,9999	13671	2	474	47373	12,8	0,2	1	0,2
LR 2 ^e	1,0005	13456	2	464	46339	12,5		1	0,1

Muestra	Tiempo 3								
	Masa (±0,0001g)	Intensidad	Na Dilución (mg/L)	Na solución original (mg/L)	Na muestra (mg/Kg)	Na ₂ O (%)	Desviación estándar	CV (%)	Error absoluto (±)
LR 3 ^e	1,0003	13700	2	475	47490	12,8		1	0,1
LR 4 ^e	1,0000	14176	2	497	49731	13,4		1	0,1
Promedio			2	471	47067	12,7		1	0,1

^a Muestra con un factor de dilución de 1/3,33.

^b Muestra con un factor de dilución de 1/5.

^c Muestra con un factor de dilución de 1/10.

^d Muestra con un factor de dilución de 1/2,5.

^e Muestra con un factor de dilución de 1/250.

Tabla N6. Determinación de Na en los lixiviados de las muestras (réplicas y control sin planta)

Tiempo	Muestra	Intensidad	Na Dilución (mg/L)	Na solución original (mg/L)
	Lixiviado			
2	SAS 1 ^a	11919	1,57	8
	SAS 2 ^a	19372	2,96	15
	SAS 3 ^a	11419	1,47	7
	SAS 4 ^a	13165	1,80	9
	Intervalo			[7,15]
2	SLRN 3.1 ^b	23453	3,73	3726
	SLRN 3.2 ^b	26471	4,29	4290
	SLRN 3.3 ^c	23178	3,67	2296
	SLRN 3.4 ^b	19434	2,97	2973
	Intervalo			[2296,4290]
3	SLRN 3.4 ^b	11404	1,57	1470
2	SLR 3.2 ^d	22239	3,50	1746
	SLR 3.4 ^d	22415	3,53	1743
3	SLR 3.1 ^d	35093	5,90	1476
	SLR 3.2 ^d	28222	4,62	1155
	SLR 3.3 ^d	32908	5,50	1374
	SLR 3.4 ^d	25311	4,07	1018
	Intervalo			[1018,1476]

^a Muestra con un factor de dilución de 1/5.

^b Muestra con un factor de dilución de 1/1000.

^c Muestra con un factor de dilución de 1/625.

^d Muestra con un factor de dilución de 1/250.

