

**UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE CIENCIAS QUÍMICAS Y FARMACIA**

**Determinación de la liberación de fosfatos en tres tipos de suelos artificiales
(arenoso, franco y arcilloso) tratados con arcillas pilareadas de hidróxidos
de doble capa.**

Diégo Rodolfo Roesch Martínez

Químico

Guatemala, Junio de 2017

**UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE CIENCIAS QUÍMICAS Y FARMACIA**

**Determinación de la liberación de fosfatos en tres tipos de suelos artificiales
(arenoso, franco y arcilloso) tratados con arcillas pilareadas de hidróxidos
de doble capa.**

Informe de Tesis

**Presentado por
Diégo Rodolfo Roesch Martínez**

Para optar al título de

Químico

Guatemala, Junio de 2017

JUNTA DIRECTIVA

Dr. Rubén Dariel Velásquez Miranda	Decano
M.A. Elsa Julieta Salazar Meléndez de Ariza	Secretaria
MSc. Miriam Carolina Guzmán Quilo	Vocal I
Dr. Juan Francisco Pérez Sabino	Vocal II
Lic. Carlos Manuel Maldonado Aguilera	Vocal III
Br. Andreina Delia Irene López Hernández	Vocal IV
Br. Carol Andrea Betancourt Herrera	Vocal V

Agradecimientos

A la Universidad de San Carlos de Guatemala, en especial a la Facultad de Ciencias Químicas y Farmacia y la Escuela de Química

Por el conocimiento y enseñanzas brindadas que han sido cimiento en mi formación académica y profesional.

Al Departamento de Química General

Por todo el apoyo y soporte que me brindó durante el desarrollo de este trabajo de tesis, ya que sin sus instalaciones y equipo la realización de este trabajo no hubiera sido posible.

Al Departamento de Bioquímica

Por todo el apoyo y soporte que me brindó durante el desarrollo de este trabajo de tesis, ya que sin sus instalaciones y equipo la realización de este trabajo no hubiera sido posible.

A la Unidad de Análisis Instrumental –UAI-

Por el apoyo que me brindó con el préstamo de equipo para el desarrollo de la parte experimental de este trabajo.

Al Departamento de Análisis Inorgánico

Por brindarme todo su apoyo y darme la oportunidad de trabajar con ellos.

Al Lic. Oswaldo Martínez

Por ser un excelente asesor de tesis, por el tiempo y apoyo en el desarrollo de este trabajo de tesis.

Al Licenciado Christian Farfán y a la Licda. Flor de María

Por su apoyo, ayuda e interés mostrado en mi trabajo de tesis.

A Cementos Progreso S.A

Por el gran apoyo con el desarrollo de esta investigación.

A todos mis catedráticos

Por brindarme su apoyo y conocimiento en mi formación profesional.

A mi familia y amigos

Por su presencia en mi vida y su apoyo incondicional en todo momento.

Dedicatoria

A Dios que hizo posible todo esto, por darme todas las herramientas, guía y apoyo que he necesitado para cumplir esta meta, por nunca abandonarme y permitirme salir de cada situación triunfante y seguir adelante.

A mi amada madre Olga Martínez, que sin ella nada de esto sería posible, por ser un gran apoyo incondicional en todo momento. Por todos los sacrificios que has hecho por mí para que yo pueda salir adelante en la vida y alcanzar mis sueños, por nunca dejar de apoyarme para alcanzar esta meta y enseñarme que sin importar que suceda en esta vida nunca hay que rendirse y por enseñarme a ser un hombre de bien. Madre mía este triunfo es tuyo, te amo mucho.

A mi hermano por su apoyo y enseñanzas en esta vida.

A mis abuelos que sin ellos no hubiera sido posible recorrer este camino, gracias por su apoyo en todo momento.

A mi novia Gabriela García que me has dado tu total apoyo y ayuda en todo momento, gracias por siempre estar para mí y por toda tu ayuda incondicional.

A todos mis amigos de trabajo como auxiliares, Juan Carlos, Julia, Gabriel, Luis, Jessica, Jennifer y Javier por ser grandes amigos y un gran apoyo en el trayecto universitario, por los buenos tiempos que pasamos, por todas las risas y sobre todo por su gran amistad, los quiero a todos.

A todos mis amigos de la universidad, Glenda, Ricardo, Tocko, Fermin, Cuellar, papa, Sarai, Rosa, Rony, Ale, Omar, gracias por su amistad y apoyo. Se les quiere mucho.

Índice

Página

I.	Resumen	1
II.	Introducción.....	3
III.	Marco teórico.....	6
A.	Fertilizantes.....	6
1.	Agricultura en Guatemala y su demanda en fertilizantes.....	6
2.	Fertilizantes.....	7
3.	Fertilizantes su uso y rendimiento	9
4.	Nutrientes principales: Fósforo, nitrógeno y potasio	10
5.	Fertilizantes de liberación controlada	13
6.	Impacto ambiental del uso de fertilizantes.....	14
B.	Suelos.....	15
1.	Generalidades del suelo	15
2.	Los componentes del suelo, su textura y estructura	18
3.	Retención y liberación de nutrientes en el suelo	20
4.	Suelo artificial.....	22
C.	Materiales sintéticos inorgánicos.....	23
1.	Materiales inorgánicos de tipo arcillas	23
2.	Arcillas pilareadas de hidróxidos de doble capa.....	25
3.	Arcillas pilareadas de hidróxidos de doble capa como vehículo para fertilizantes de liberación controlada.	27
4.	Síntesis de hidrotalcitas de fosfato.....	28
IV.	Antecedentes.....	30
V.	Justificación.....	32
VI.	Objetivos.....	34
A.	General.....	34

	B.	Específicos.....	34
VII.		Hipótesis.....	35
VIII.		Materiales y métodos.....	36
	A.	Campo de trabajo.....	36
	B.	Materiales y equipo:.....	36
	1.	Reactivos.....	36
	2.	Cristalería.....	37
	3.	Materiales varios y equipo.....	37
	C.	Diseño de investigación.....	39
	D.	Procedimiento.....	42
	1.	Síntesis de arcillas inorgánicas de hidróxido de doble capa con fosfatos.....	42
	2.	Caracterización de la arcilla de tipo hidrotalcita.....	43
	3.	Preparación de suelos.....	43
	4.	Caracterización de suelos por el método de Bouyoucos.....	44
	5.	Aplicación de la arcilla inorgánica y su evaluación.....	45
	6.	Análisis de fosfatos.....	48
	7.	Tratamiento de datos.....	49
IX.		Resultados.....	50
X.		Discusión de resultados.....	59
XI.		Conclusiones.....	67
XII.		Recomendaciones.....	68
XIII.		Referencias bibliográficas.....	69
XIV.		Anexos.....	75

I. Resumen

Las arcillas pilareadas de hidróxidos de doble capa presentan un gran potencial como matriz de fertilizantes de liberación controlada, ya que poseen propiedades químicas y físicas que las hacen muy versátiles para ser dopadas con diferentes nutrientes como los fosfatos. Además poseen bajos costos de producción, convirtiéndose en una posible opción para todo agricultor que requiere mejores rendimientos de parte de un fertilizante. Estas arcillas son más amigables con el ambiente ya que no permiten que se lixivien tan fácilmente los fosfatos generando contaminación en cuerpos de agua aledaños.

En el presente estudio se determinó el comportamiento de estas arcillas dopadas con fosfatos en tres tipos de suelos artificiales, con el fin de determinar si son aptas para su uso como fertilizantes de liberación controlada bajo el efecto de diferentes texturas, siendo éste uno de los principales factores que afectan la distribución y disponibilidad de nutrientes en el suelo.

Para asegurar que las arcillas pilareadas estuvieran correctamente preparadas se caracterizaron por medio de difracción de rayos X, fluorescencia de rayos X y termogravimetría, donde se confirmó que efectivamente las arcillas cumplieron con todos los parámetros esperados, asegurando así su identidad.

El estudio se desarrolló durante 5 días en macetas con suelos artificiales de textura franco, arenoso y arcilloso bajo un riego controlado una vez al día, recogiendo el lixiviado y determinando el comportamiento de liberación y retención de fosfatos a través del mismo. Para el análisis de fosfatos lixiviados se utilizó el método del ácido ascórbico, logrando así cuantificar la presencia de fosfatos en cada lixiviado para evaluar el grado de retención de cada textura.

El suelo franco fue el que presentó mayor capacidad de retención de fosfatos y por ende un mejor comportamiento de liberación controlada en éste suelo, esto fue principalmente gracias a las características de la textura que presenta una

distribución más homogénea en los tamaños de partícula de su composición y por ende la distribución interna para una mejor retención y manejo de nutrientes. En segundo lugar se tuvo al suelo arcilloso que presentó una retención menor al suelo franco pero todavía fue considerable de manera que las arcillas pilareadas de hidróxidos de doble capa presentaron un comportamiento de liberación controlada efectivo en estos dos tipos de suelo. Para el suelo arenoso se observó que la mayor parte de nutrientes se lixiviaron a partir del tercer día y continuó aumentando drásticamente hasta alcanzar el quinto día, por lo que se determinó que esta textura presentó baja retención generando un comportamiento de liberación controlada pobre, ya que éste suelo contiene una mayor proporción de partículas de mayor tamaño haciendo que no sea capaz de retener nutrientes de forma efectiva.

Se concluye que las arcillas pilareadas de hidróxidos de doble capa son aptas para su aplicación como fertilizantes de liberación controlada de fosfatos en suelos con textura arcillosa y franco, ya que éstos fueron capaces de retener de una forma eficiente los nutrientes permitiendo así remanencia de nutrientes que están disponibles para la planta. En el caso del suelo con textura arenosa se obtuvo una retención poco efectiva, sin embargo puede ser aplicado en periodos cortos de 2 días en donde si existe retención. Por lo tanto si se necesitara aplicar en suelos de textura arenosa, donde es pobre la liberación y retención, se debe espaciar el riego.

Los costos de la producción de las arcillas pilareadas e hidróxidos de doble capa no es elevado, ya que no se requiere de equipos de alto costo de funcionamiento o de alto costo de adquisición, ni de reactivos de alto precio, por lo que si se desea preparar a pequeña escala el costo para 1 kilogramo oscila en promedio de Q 350.00 y si este se preparara a gran escala los precios se reducen ya que la compra al por mayor permite obtener mejores rendimientos económicos.

II. Introducción

El incremento constante de la población mundial y como en el caso de la población guatemalteca (Instituto Nacional de Estadística [INE], 2014), ha generado nuevas demandas alimenticias. Esto es un reto a la agricultura para proporcionar un mayor número de alimentos, tanto en cantidad como en calidad.

Para alcanzar el reto de poder incrementar la producción agrícola para abastecer a la población e impulsar la economía guatemalteca, únicamente existen dos posibles factores: aumentar las superficies de cultivo, posibilidad cada vez más limitada, ya que resultaría en el deterioro de las grandes masas forestales; o proporcionar a los suelos fuentes de nutrientes adicionales en formas asimilables por las plantas, para incrementar los rendimientos de los cultivos siendo esta última la más viable a través de la aplicación de fertilizantes.

Entre otras opciones que se ha observado en los últimos años, son los cultivos genéticamente modificados. Éstos presentan una posibilidad de aumentar producción y disminuir las pérdidas por plagas en su producción. Sin embargo, éstos han tenido un rechazo considerable en la sociedad ya que se consideran no naturales, peligrosos y los campesinos han puesto resistencia ya que éstos les afecta en su economía al intentar competir con ellos. Debido a lo anteriormente expuesto, a pesar que ya existen plantaciones a nivel mundial, todavía no son una opción viable por cuestiones sociopolíticas y económicas (Dibb, Roberts, Welch, 2005; Massieu, 2009).

En Guatemala el aumento de la población ha sido considerable en los últimos años ya que en un período de 8 años ha ocurrido un aumento del 18% (INE, 2014). Siendo el principal problema de este crecimiento desproporcionado en la población del país, la incapacidad de satisfacer las necesidades alimenticias. Ya que el sector agrícola conforma más de un cuarto de la economía guatemalteca (Ministerio de Agricultura Ganadería y Alimentación [MAGA], 2015), la necesidad de una optimización de la

agricultura que no involucre aumentar las superficies de cultivos es un factor crítico para el país.

Estas nuevas exigencias para la agricultura guatemalteca hacen necesaria la implementación de nuevos fertilizantes que permitan un mayor rendimiento a largo plazo y menor costo. Siendo los fertilizantes de entrega controlada una de las mejores y más viables opciones para satisfacer dicha demanda. Para ello, la preparación de arcillas de tipo hidrotalcitas que permiten una liberación controlada presentan múltiples ventajas, desde alta eficiencia hasta un costo bajo de producción y un consumo más moderado de agua, haciendo estos materiales inorgánicos viables para la fertilización de los suelos (Rose, Haase & Arellano, 2004; Wu, Liu & Liang, 2008), y otorgando así una nueva herramienta al agricultor guatemalteco para aumentar su producción agrícola a bajo costo.

Es necesario trabajar con medios controlados para poder comprender el comportamiento que los materiales de tipo hidrotalcitas tienen en suelos, para lo cual el uso de suelos artificiales es la mejor opción ya que permite controlar todas las variables que un medio tan variado como el suelo presenta además de ser un método y opción emergente debido a que son muy utilizados en la actualidad para el desarrollo de cultivos, por lo cual se hizo uso de los suelos artificiales preparados por adaptaciones de los métodos establecidos por la OECD (The organization for economic co-operation and development).

Este trabajo consistió en la evaluación de las arcillas de tipo hidrotalcitas como matriz de fertilizantes para la liberación controlada de fosfatos, en diferentes tipos de suelos sintéticos que se encuentran comúnmente en Guatemala, tales como los suelos arenosos, francos y arcillosos.

Buscando poder aplicar estos nuevos fertilizantes en la agricultura de Guatemala, lo cual provee una fuente de ayuda al agricultor guatemalteco para mejorar sus

cultivos y el rendimiento de los mismos a menores costos, beneficiando así la economía y nutrición del país.

El análisis de la retención de fosfatos se realizó en tres tipos de suelos artificiales tratados con 2, 4 y 6 gramos de arcillas inorgánicas de tipo arcillas pilareadas de hidróxidos de doble capa (hidrotalcitas) sintetizadas en laboratorio por el investigador basados en el método de coprecipitación, esto a través de experimentos en macetas con tres suelos artificiales diferentes: Arcillosos, francos y arenosos preparados según la guía de clasificación de suelos regido por Bouyoucos y la preparación de la OECD. Esta clasificación permitió determinar la proporción de limo, arena y arcilla necesaria para generar los tres suelos deseados, a los cuales se les aplicó riego controlado por un período de tiempo de 5 días, y se analizó el lixiviado por análisis UV visible, por medio del método para fosfatos del ácido ascórbico establecido en APHA, AWWA & WPCF (2012).

III. Marco teórico

A. Fertilizantes

1. Agricultura en Guatemala y su demanda en fertilizantes

La agricultura sigue siendo el sector productivo con mayor importancia para Guatemala donde el 61% de la población habita en el área rural y depende de esta actividad para satisfacer sus necesidades de ingresos y alimentación. La población agrícola económicamente activa constituye el 58.6% del total, lo que representa un aproximado de 1.86 millones de personas que laboran y dependen de esta actividad, a pesar que el 70% de todo el consumo nacional se origina en la producción de pequeños agricultores y que representan a 3 millones de personas, este sector carece de apoyo y recursos porque no se han creado mecanismos legales e institucionales efectivos para fomentar y promover la agricultura familiar, ni programas específicos para atender las necesidades del campesino que subsiste gracias a la armonía milenaria con la tierra y la cosecha que de ella obtienen. Irónicamente, quienes producen los alimentos en el país, padecen hambre y desnutrición producto del empobrecimiento y abandono por parte de las autoridades designadas a supervisar y apoyar el desarrollo de los mismos (Caballeros, 2013).

Esto hace que la necesidad de técnicas y herramientas que aumenten la producción y rendimientos de la cosechas sea latente y con cada año que pasa de mayor importancia, para lo cual la herramienta más viable y adecuada debido a la carencia de mayores extensiones de tierra para la siembra, es la implementación de fertilizantes de mayor rendimiento que los que ya se encuentran en el mercado y que sean de precio accesible para el pequeño agricultor de Guatemala.

Como un intento de combatir estas situaciones de pobreza y precariedad en el año 2014 el gobierno de Guatemala inició un programa para repartir fertilizantes orgánicos a los agricultores pequeños que conforman entre la pobreza y pobreza extrema el 74.2 % de la población, logrando así un aumento considerable en la producción del maíz, pero aún así la cantidad de fertilizante repartido no superó el 35% de la necesidad que estos grupos presentan (MAGA, 2015). Adicionalmente el

costo de estos fertilizantes resulta muy alto, por lo que el campesino no puede adquirirlo al menos que éste sea donado por entidades estatales. Dicha situación hace necesario impulsar búsquedas por fertilizantes alternos de bajo costo que permitan a este campesino agricultor satisfacer las demandas mínimas en su producción.

Entre los fertilizantes de mayor uso y demanda en Guatemala se encuentran los fertilizantes fosfatados, los cuales han sido utilizados inicialmente en ingenios para mejorar el rendimiento de la caña de azúcar hasta ser generalizado para la mayor parte de cultivos. Las dosis utilizadas en Guatemala varían desde 45-256 kilogramos de P_2O_5 por hectárea, generalmente aplicado en múltiples tipos de cultivos. En Guatemala se consume un promedio de 114,000 toneladas de fertilizantes fosfatados anualmente, lo cual consiste en una inversión promedio de 75,000,000 de quetzales, esta demanda es cubierta en parte por el gobierno de Guatemala y sus programa de fertilizantes (MAGA, 2015), pero no logra satisfacer la demanda total.

2. Fertilizantes

Los fertilizantes son cualquier sustancia orgánica o inorgánica, natural o sintética que aporte a las plantas uno o varios de los elementos nutritivos indispensables para su desarrollo vegetativo normal (Sánchez & Gándara, 2011, p.128).

Los fertilizantes son sustancias preparadas para el abastecimiento y suministro de nutrientes químicos para el suelo de manera que las plantas puedan absorberlos y por lo tanto nutrirse, para lo cual existen varios tipos de fertilizantes, pero se pueden clasificar en dos grandes ramas: los inorgánicos y los orgánicos. Los fertilizantes orgánicos provienen de fuentes naturales, como desechos de otros seres vivos y/o plantas, estos trabajan en un proceso de sinergia con microorganismos, generan compuestos químicos que proveen de los elementos necesarios para el desarrollo y nutrición de las plantas. Por otra parte se tienen los fertilizantes inorgánicos, que son preparados sintéticamente, generalmente en forma de sales y recientemente

en forma de arcillas; estos deben contener al menos un elemento químico que la planta necesita para su desarrollo y nutrición como el fósforo, nitrógeno o potasio entre muchos otros. La característica más importante de cualquier fertilizante es que debe tener una solubilidad máxima en agua para que, de este modo, pueda disolverse en el agua de riego, ya que los nutrientes entran en forma pasiva y activa en la planta, a través del flujo del agua (Morel, 1971; Food & Agriculture [FAO], 2002).

Los elementos químicos o nutrientes que los fertilizantes deben de contener, en especial los inorgánicos que son diseñados en laboratorio, caen en dos clasificaciones: macro elementos y micro elementos, donde los macro elementos principales son nitrógeno, fosforo, potasio, calcio, magnesio y azufre, mientras que los microelementos principales son hierro, zinc, cobre, manganeso, molibdatos, boro y cloruros (Universidad Nacional Abierta y a Distancia [UNAD], 2013).

Para que éstos puedan ser aprovechados por las plantas deben de estar presentes en formas químicas que sean asimilables, comúnmente para nutrientes como el nitrógeno, se asimilan en forma de nitratos y amonio, en el caso del potasio y calcio éstos se encuentran como iones provenientes de diferentes sales como KCl y CaCO_3 , esto dependerá de la casa que los produzca y para el fósforo, éstos se asimilan como fosfatos y ortofosfatos (Salazar & Navarro, 2014).

La asimilación de los nutrientes por parte de las plantas se ve afectado tanto por la forma química en la que se encuentra el nutriente como por el pH del suelo en el que es agregado, ya que los fertilizantes son capaces de alterar el pH del suelo, esto depende principalmente de: 1) El perfil acidificante de la composición química del fertilizante 2) De su carácter descalcificante o calcificante y 3) De la capacidad tampón del suelo (Fuentes & Yagüe, 1999).

3. Fertilizantes su uso y rendimiento

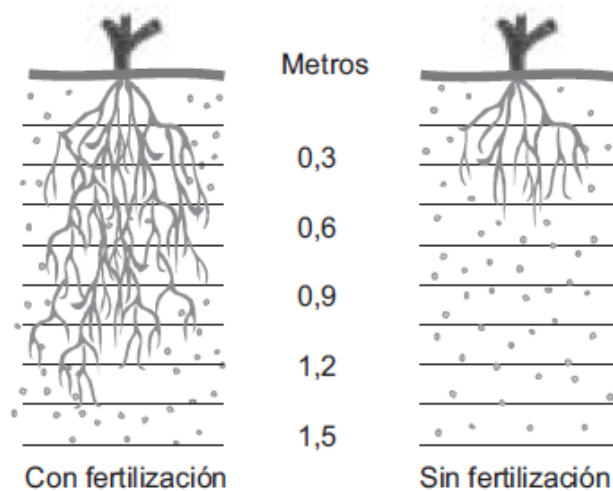
Para que los cultivos tengan un mejor crecimiento y mayor producción, los suministros de nutrientes en el suelo deben de ser amplios. Se debe tomar en consideración que si uno solo de los nutrientes necesarios es escaso, el crecimiento de las plantas es limitado y los rendimientos de los cultivos son reducidos ya que dependiendo del tipo de cultivo y las características propias de cada suelo la demanda de nutrientes es diferentes, no siempre se necesitan fertilizantes 15/15/15 que tienen la misma proporción de nitrógeno, fósforo y potasio (NPK). Para evitar que exista una deficiencia en uno o varios nutrientes los fertilizantes se han convertido en un requisito casi indispensable para la agricultura. Con los fertilizantes, los rendimientos de los cultivos pueden a menudo duplicarse o más aún triplicarse. Los resultados de miles de demostraciones y de ensayos llevados a cabo en las fincas de los agricultores bajo el primer Programa de Fertilizantes de la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura conocida mundialmente como FAO, que cubrió un período de 25 años en 40 países, mostró que el aumento promedio ponderado del mejor tratamiento de fertilizantes para ensayos de trigo era alrededor del 60 por ciento. El aumento de los rendimientos variaba, por supuesto, de acuerdo a la región por ejemplo debido a la falta de humedad, cultivo y país (FAO, 2002; FAO, 2000).

La eficiencia de los fertilizantes no depende directa y estrictamente de la composición química de estos, sino también de la forma en que es manejado, ya que para poder determinar cuál es la necesidad real de nutrientes en los cultivos es necesario realizar evaluaciones de la capacidad de abastecimiento nutricional que poseen los suelos como la demanda en particular del cultivo de interés de forma constante, para poder así aplicar solamente la cantidad y tipo de fertilizante necesario lo cual no solo disminuye los costos si no la contaminación que estos puedan causar. Estas son consideraciones muy importantes cuando las lluvias son escasas o los cultivos tienen que ser irrigados, en cuyo caso el rendimiento por unidad de agua usada puede ser más que duplicado (Navarro & Navarro, 2014).

Los beneficios de los fertilizantes se pueden apreciar de diferentes formas, no sólo el rendimiento de la cosecha, sino también en el desarrollo de la planta, un indicador de esto según FAO (2002) es la longitud y profundidad de las raíces, ya que al ser más profundas, tienen un mayor campo de absorción de nutrientes pudiendo así aprovechar todos los recursos que el suelo provee, esto se puede observar en la figura # 1.

Figura # 1: Profundidad de Raíces

En suelos de baja fertilidad, los fertilizantes aumentarán la profundidad a la cual las raíces crecen.



Fuente: Food & Agriculture org [FAO]. (2002). Los fertilizantes y su uso: una guía de bolsillo para los oficiales de extensión. Roma: Asociación Internacional de la Industria de los Fertilizantes.

4. Nutrientes principales: Fósforo, nitrógeno y potasio

Las plantas toman todos los nutrientes de la mezcla heterogénea del suelo. Estos se dividen en dos categorías:

Los macronutrientes, divididos en nutrientes primarios y secundarios; y los micronutrientes o micro elementos.

Para lograr una buena salud en las plantas, los macronutrientes se necesitan en grandes cantidades para la producción continua y eficaz de los cultivos por lo que deben ser aplicados si el suelo es deficiente en uno o más de ellos. Dependiendo

de la región y características propias del área los suelos pueden ser naturalmente pobres en nutrientes, o pueden llegar a ser deficientes por el exceso de cultivo o por cosechas de alto rendimiento, adicionalmente también los micronutrientes son requeridos pero sólo en cantidades mínimas para el crecimiento correcto de las plantas y tienen que ser agregados en cantidades muy pequeñas cuando no pueden ser provistos por el suelo (Navarro, 2014).

Dentro del grupo de los macronutrientes necesarios para el crecimiento de las plantas que se requieren en grandes cantidades, se encuentran: el nitrógeno, fósforo, calcio, magnesio y potasio, donde el fósforo (P) es uno de los nutrientes esenciales para el crecimiento de las plantas ya que sus funciones no pueden ser realizadas o remplazadas por ningún otro nutriente por lo tanto es necesario un adecuado suplemento de fósforo para que la planta crezca y se reproduzca en forma óptima (Navarro, 2014).

Algunas de las funciones esenciales del fósforo en la planta son su participación en la fotosíntesis y otros procesos químico-fisiológicos. Es indispensable para la diferenciación de las células y para el desarrollo de los tejidos, que forman los puntos de crecimiento de la planta (FAO, 2000).

Una vez dentro de la raíz, el fósforo puede quedarse almacenado en esta área o puede ser transportado a las partes superiores de la planta. A través de varias reacciones químicas el fósforo se incorpora a compuestos orgánicos como ácidos nucleicos ADN y ARN, fosfoproteínas, fosfolípidos, enzimas y compuestos fosfatados ricos en energía como la adenosina trifosfato (ATP). El fósforo se mueve en la planta en forma de iones ortofosfato y como fósforo incorporado en los compuestos orgánicos formados (FAO, 2000).

El efecto más acentuado de la falta de fósforo es la reducción en el crecimiento de la hoja así como en el número de hojas. El crecimiento de la parte superior es más afectado que el crecimiento de la raíz. Sin embargo, el crecimiento de la raíz también se reduce marcadamente en condiciones de deficiencia de fósforo, produciendo menor masa radicular para explorar el suelo por agua y nutrientes. Generalmente, la deficiencia de fósforo deprime los procesos de utilización de carbohidratos, aun

cuando continúa la producción de estos compuestos por medio de la fotosíntesis. Esto resulta en una acumulación de carbohidratos y el desarrollo de un color verde oscuro en las hojas. En algunos cultivos, las hojas deficientes en fósforo desarrollan un color púrpura, ejemplos son el tomate y el maíz como se observa en la figura # 2 (s.n., 1999).

Figura # 2: Maíz con hoja púrpura por deficiencia de fósforo



Fuente: s.n. (1999). FUNCIONES DEL FOSFORO EN LAS PLANTAS. Bettercrops 83(1), 6-7

Otros efectos de la deficiencia de P en la planta incluyen el retraso de la madurez, mala calidad de forrajes, frutas, hortalizas y granos así como una reducción de la resistencia de las plantas a las enfermedades (s.n., 1999).

El nitrógeno es otro de los nutrientes esenciales para el desarrollo y crecimiento correcto de las plantas, ya que éste interviene en el crecimiento de la planta, el número de hojas y su maduración como la producción de la flor y fruto.

El nitrógeno es un elemento biogénico el cual se encuentra incorporado en moléculas orgánicas que desempeñan funciones vitales para toda célula como aminoácidos, ácidos nucleicos, azúcares aminadas, proteínas y enzimas, donde todas estas moléculas son parte esencial del metabolismo celular, influyendo en los ciclos de vida de toda la planta (Bolaños, 2008).

La deficiencia de nitrógeno genera un cambio en la coloración amarilla en las hojas, lo cual se debe al movimiento de nitrógeno de tejidos viejos a tejidos nuevos donde se necesita para el crecimiento, generando así que la planta se defolie y se torne raquítica degenerando así la calidad parcial o totalmente de la planta (Bolaños, 2008).

Entre los nutrientes principales también se encuentra el potasio, éste tiene la función de controlar y regular el mecanismo de control de apertura y cierre de estomas en las plantas, además de ser un cofactor para más de 40 enzimas que regulan el crecimiento de la planta. Si la planta tiene la cantidad adecuada de potasio se mejora la resistencia a patógenos haciendo que no sea tan susceptible a múltiples plagas como la Fusariosis.

La deficiencia de potasio en la planta afecta en su primera etapa a tejidos viejos como hojas viejas, generando clorosis la cual ocurre cuando las hojas no producen suficiente clorofila generando un color amarillo pálido, lo cual hace que la planta no sea capaz de sintetizar carbohidratos por fotosíntesis, pudiendo causar la muerte de la planta ya que esto genera necrosis del tejido vegetal (Bolaños, 2008).

5. Fertilizantes de liberación controlada

El crecimiento de las plantas y su calidad son principalmente una función de la cantidad de fertilizante y agua, por lo que es muy importante para mejorar la utilización de los recursos hídricos y fertilizantes como fuente de nutrientes. Un método para reducir pérdidas de nutrientes al aplicar fertilizantes es el uso de fertilizantes de liberación lenta o controlada. El término “liberación controlada” es usado para describir fertilizantes que no liberan el 100% de los nutrientes disponibles al momento de la aplicación (Rose, Haase & Arellano, 2004, p.89).

Hay tres tipos principales de estos fertilizantes: materiales poco solubles, tales como urea-formaldehído; materiales para la colocación en profundidad, como urea en supergránulos; y fertilizantes recubiertos (Wu & Mingzhu, 2007).

Los fertilizantes recubiertos se preparan a través del recubrimiento de fertilizantes convencionales con diversos materiales que reducen su velocidad de disolución. Un ejemplo de esto son arcillas inorgánicas. Las velocidades de liberación y disolución de fertilizantes solubles en agua dependen de los materiales de recubrimiento, la entrega de los nutrientes es variable según el producto y depende de los niveles de humedad y pH del suelo, la temperatura y/o la actividad microbiológica (Wu & Mingzhu, 2007).

El objetivo final de los fertilizantes de entrega controlada es entregar nutrientes a una tasa que coincida con la demanda de la planta y de esa forma evitar pérdidas. Esto trae como consecuencia una máxima eficiencia en su utilización al optimizar la calidad de la planta, disminuyendo la frecuencia en la fertilización y las pérdidas por lixiviación (Rose, Haase & Arellano, 2004, p.90).

6. Impacto ambiental del uso de fertilizantes

“La contaminación por fertilizantes se produce cuando éstos se utilizan en mayor cantidad de la que pueden absorber los cultivos, o cuando se eliminan por acción del agua o del viento de la superficie del suelo antes de que puedan ser absorbidos. Los excesos de nitrógeno y fosfatos pueden infiltrarse en las aguas subterráneas o ser arrastrados a cursos de agua. Esta sobrecarga de nutrientes provoca la eutrofización de lagos, embalses y estanques y da lugar a una explosión de algas que suprimen otras plantas y animales acuáticos. Los métodos agrícolas, forestales y pesqueros y su alcance son las principales causas de la pérdida de biodiversidad del mundo. Los costos externos globales de los tres sectores pueden ser considerables” (González, 2011).

“La producción agropecuaria tiene unos profundos efectos en el medio ambiente en conjunto. Son la principal fuente de contaminación del agua por nitratos, fosfatos y plaguicidas. También son la mayor fuente antropogénica de gases responsables del

efecto invernadero, metano y óxido nitroso, y contribuyen en gran medida a otros tipos de contaminación del aire y del agua” (González, 2011).

“La agricultura afecta también a la base de su propio futuro a través de la degradación de la tierra, la salinización, el exceso de extracción de agua y la reducción de la diversidad genética agropecuaria. Sin embargo, las consecuencias a largo plazo de estos procesos son difíciles de cuantificar” (González, 2011).

B. Suelos

1. Generalidades del suelo

El suelo es la capa superficial de la tierra, la que ha sido transformada muy despacio por la descomposición a través de la acción meteorológica, la acción de la vegetación y del ser humano. El material original del cual un suelo se forma puede ser la roca subyacente o los depósitos de los ríos y de los mares (suelos aluvionales) y del viento (suelos eólicos, tales como el loess) o suelos de cenizas volcánicas (FAO, 2002, p.12).

La materia prima de la cuales se forman los suelos se conocen como rocas ígneas, sedimentarias y metamórficas agregado a la contribución de restos fósiles animales y plantas, estas rocas se forman a través de un proceso conocido como el ciclo de las rocas, este ciclo inicia con el magma, que en esencia es una masa de rocas fundida que se encuentra en las capas más profundas de la Tierra a muy elevada temperatura y presión. Con el paso del tiempo el magma se enfría y se solidifica a través de un proceso conocido como cristalización, el proceso de enfriamiento ocurre en capas superiores al lugar donde estaba originalmente, y generalmente este alcanza la superficie a través de erupciones volcánicas, una vez el magma se enfrió se denomina roca ígnea (Belart, 2008).

Las rocas ígneas que se encuentran en la superficie sufren un proceso de meteorización que es la descomposición de minerales y rocas cuando éstos entran en contacto con la atmósfera, hidrósfera y la biósfera. Los materiales formados por la meteorización son transportados a diferentes áreas por efectos de gravedad y factores ambientales, hasta que son captados por agentes erosivos como agua de ríos , glaciares, vientos fuertes, donde finalmente se depositan y sufren litificación, que es básicamente la conversión de estos materiales en rocas sedimentarias (Belart, 2008).

Algunas rocas quedan sepultadas profundamente en la tierra, generando así un entorno de alta presión y alta temperatura, llevándola a un nuevo proceso de transformación donde alcanza un estado conocido como roca metamórfica (Belart, 2008).

Uno de los factores a tomar en consideración cuando se habla de suelos es su metaestabilidad, ya que si se desea utilizar una extensión de tierra para cultivos se debe de tomar en consideración qué tan estable será para su manejo a la hora de invertir en la siembra de diferentes cultivos, ya que su metaestabilidad está relacionada con sus propiedades intrínsecas como los tipos de suelos (según su textura franco, arcilloso, etc.) y la interacción con otros componentes químicos que pueden llegar a influir en su estabilidad, como fertilizantes agregados durante el desarrollo de los cultivos (Redolfi, 2007).

El suelo da soporte a las plantas en forma de una capa permeable para las raíces y es un depósito para los nutrientes y el agua. Dependiendo de su composición, los suelos difieren en su capacidad para proveer los diferentes nutrientes (Navarro & Navarro, 2013) por lo que para ser utilizado como campo de cultivo es necesario complementar y enriquecer la cantidad de nutrientes que éstos tienen.

El suelo presenta una respuesta óptima ante los fertilizantes, si éste tiene un nivel alto de fertilidad, la cual se refiere a la capacidad de retención y distribución de

nutrientes para que la planta pueda disponer de ellos. Los principales factores determinantes de la fertilidad del suelo son: la materia orgánica incluyendo la biomasa microbiana, la textura, la estructura, la profundidad, el contenido de los nutrientes, la capacidad de almacenamiento y de adsorción y la ausencia de los elementos tóxicos como el aluminio libre (Navarro & Navarro, 2013). Los suelos difieren ampliamente en estos factores por lo cual generalmente es necesario conocer los aspectos químicos y físicos del suelo con el que se cuenta para el trabajo de agricultura.

La Capacidad de Intercambio Catiónico (CIC) del suelo es una medida de cantidad de cargas negativas presentes en las superficies de los minerales y componentes orgánicos del suelo (arcilla, materia orgánica o sustancias húmicas) y representa la cantidad de cationes como Ca^{+2} , Mg^{+2} , Na^+ , K^+ , NH_4^+ , que las superficies pueden retener o intercambiar. Estos serán intercambiados por otros cationes o iones presentes en la solución del suelo y liberados por las raíces. El nivel de CIC indica la habilidad de suelos a retener cationes, disponibilidad y cantidad de nutrientes a la planta, su pH potencial entre otras. Un suelo con bajo CIC indica baja habilidad de retener nutrientes, arenoso o pobre en materia orgánica. La unidad de medición de CIC es en centimoles de carga por kg de suelo cmol/kg o meq/100g de suelo (FAO, 2007).

El pH del suelo determina el grado de adsorción de iones (H^+) por las partículas del suelo e indica si un suelo está ácido o alcalino. Es el indicador principal en la disponibilidad de nutrientes para las plantas, influyendo en la solubilidad, movilidad, disponibilidad y de otros constituyentes y contaminantes inorgánicos presentes en el suelo. El valor del pH en el suelo oscila entre 3,5 (muy ácido) a 9,5 (muy alcalino). Los suelos muy ácidos ($<5,5$) tienden presentar cantidades elevadas y tóxicas de aluminio y manganeso. Los suelos muy alcalinos ($>8,5$) tienden a dispersarse. La actividad de los organismos del suelo es inhibida en suelos muy ácidos y para los cultivos agrícolas el valor del pH ideal se encuentra en 6,5 (FAO, 2007).

Los organismos del suelo descomponen toda la materia muerta transformándola a Materia Orgánica del Suelo (MOS). La MOS se encuentra en diferentes grados de descomposición y se distingue en distintas fracciones como lábiles (compuestas de hidratos de carbono, ligninas, proteínas, taninos, ácidos grasos) o fracciones húmicas (ácidos fúlvicos, ácidos húmicos y huminas). Las fracciones lábiles son transformadas mucho más rápido que otras por los microorganismos, lo cual genera que su permanencia en el suelo sea más corta y por ende exista una menor disponibilidad de las mismas con el paso del tiempo. Las fracciones húmicas se encapsulan en los agregados del suelo y son más difíciles para acceder (FAO, 2007).

El Carbono Orgánico del Suelo (COS) mejora las propiedades físicas del suelo, aumenta la Capacidad de Intercambio Catiónico, la retención de humedad y contribuye con estabilidad de suelos arcillosos al ayudar a aglutinar las partículas para formar agregados. La MOS está compuesta en mayoría de carbono, tiene una capacidad de retener una gran proporción de nutrientes, cationes y oligoelementos esenciales para el crecimiento de las plantas. Gracias a la MOS la lixiviación de nutrientes se inhibe y es integral a los ácidos orgánicos que pone a disponibilidad los minerales para las plantas y regulador del pH del suelo (FAO, 2007).

2. Los componentes del suelo, su textura y estructura

El suelo está compuesto de partículas minerales de varios tamaños, procedentes de la alteración del material original y de materia orgánica (por ejemplo residuos de plantas y de animales), así como de cantidades variables de agua y de aire. Según el tamaño las partículas sólidas y el sistema unificado de clasificación de suelos (SUCS) son clasificadas de la siguiente forma: piedra y grava (de más de 2 mm de diámetro), arena (de 2,0 a 0,02 mm), limo (de 0,02 a 0,002 mm) y arcilla (menos de 0,002 mm) por lo que la composición del suelo a la que llamamos textura se refiere a las proporciones relativas de arena, limo y arcilla contenidas en el suelo. Dependiendo de su textura, los suelos son descritos como arenas, francos

arenosos, francos, francos arcillosos, arcillas, entre otros como se observa en la figura # 3 donde se clasifican por Bouyoucos, un ejemplo de esto sería un suelo franco arcilloso que estaría compuesto por arena, arcilla y limo en proporciones 50/50/60. Los suelos pueden también ser denominados «ligeros» (por ejemplo arenas y francos arenosos), «medios» (por ejemplo francos) o «pesados» (por ejemplo francos arcillosos y arcillas) basados en su facilidad de laboreo (Hernández, Bojórquez, Morell, Cabrera, Ascanio, García & Nájera, 2010).

La textura del suelo y su estructura son de importancia preponderante para la fertilidad del suelo y, consecuentemente, para el crecimiento de las plantas. Los suelos gruesos (o arenosos) no retienen bien el agua y los nutrientes. Se deben tener cuidados especiales cuando se aplican los fertilizantes para evitar la lixiviación de nutrientes (nitrógeno y potasio). Los suelos arcillosos, por otra parte, pueden acumular humedad y nutrientes, pero pueden tener drenaje y aireación inadecuados y los suelos francos tienen textura suelta lo que ayuda con su laboreo, alta fertilidad y una adecuada retención de humedad (FAO, 2002).

Para preparar y definir la textura de los suelos se utiliza la clasificación de Bouyoucos la cual se muestra en la figura # 3, esta clasificación se basa en determinar el tipo de suelo por la proporción de arcillas, limo y arena. Si se quisiera preparar un suelo franco arcilloso limoso se necesitaría mezclar arena, arcilla y limo en proporciones 40/80/60.

Figura # 3: Escala para suelos en el método de Bouyoucos



Fuente: Gobierno Bolivariano de Venezuela (s.f). Método de Bouyoucos. Sistema de información del gobierno Bolivariano de Venezuela. Recuperado de:
http://www.sian.inia.gob.ve/repositorio/manuales_suelos/analisis_suelos_fertiidad/2.1.pdf

3. Retención y liberación de nutrientes en el suelo

Durante la formación del suelo existen procesos de descomposición donde dependiendo del grado de ésta, así serán la cantidad de nutrientes liberados a través del suelo, en este caso las arcillas (que son minerales) y la materia orgánica tienen la capacidad de retener nutrientes en forma que estén disponibles para la plantas, es decir los nutrientes están ligados a estos componentes del suelo lo cual se conoce como complejo de adsorción nutriente-suelo (FAO, 2002). Dependiendo de la capacidad de retener nutrientes (almacenamiento, capacidad de adsorción y/o absorción) determina la fertilidad natural de un suelo.

Los nutrientes son especies químicas generalmente con carga (cationes y aniones) lo cual permite que sean atraídos e interaccionen con el suelo a través de los materiales arcillosos que lo conforman.

Podemos considerar al suelo como una disolución heterogénea, donde los nutrientes se distribuyen dentro de esta disolución y de esta forma están disponibles para ser absorbidos por la planta, donde la raíz de la planta es el conducto por el cual sucede la absorción de nutrientes, esta es capaz de absorber los nutrientes solo si éstos están en forma disuelta. De allí que dichos nutrientes deben ser liberados del complejo de adsorción en la disolución del suelo para estar efectivamente disponibles para la planta (FAO, 2002, p.14).

Existe un equilibrio entre los nutrientes adsorbidos en las partículas del suelo y los nutrientes liberados en la solución del suelo. Si este equilibrio es alterado, como sucede por la absorción de los nutrientes a través de las raíces de las plantas, los nutrientes son liberados del complejo de adsorción para establecer un nuevo equilibrio. Este equilibrio consiste en intercambio de los cationes de interés como NH_4^+ , K^+ , por Ca^{2+} , Mg^{2+} procedentes del material sólido (nutrientes no disueltos) o por iones H^+ , mientras los aniones son reemplazados por OH^- . Los nutrientes liberados se mueven de forma osmótica donde parten del complejo de adsorción que tiene alta concentración de nutrientes a la solución de más baja concentración en la vecindad de las raíces. Este proceso de transporte se le denomina difusión pasiva (FAO, 2002).

El proceso de la adsorción de los nutrientes y la liberación en la solución del suelo es muy importante. En particular la diferencia en la fuerza de adsorción de los cationes y aniones tiene una influencia importante en cómo y cuándo aplicar fertilizantes (en particular fertilizantes nitrogenados) a fin de recibir la mayor eficiencia y evitar la pérdida por lixiviación (FAO, 2002, p.17).

4. Suelo artificial

El suelo artificial se define como un producto manufacturado, elaborado para realizar funciones específicas del suelo, producido mediante la mezcla de materiales naturales, residuos o materiales manufacturados, y la adición de nutrientes u otros aditivos según sea la aplicación del mismo agregado a que permite el anclaje y soporte del sistema reticular para el desarrollo de la vegetación (Bao, s.f).

El desarrollo de suelos artificiales es una de las nuevas corrientes más importantes de los últimos tiempos, ya que éstos son hechos a medida con materiales residuales con el fin de resolver problemas concretos como: pH problemático en terrenos, eutrofización, contaminación con metales pesados como arsénico, suelos con daños irreversibles que ya no son útiles para cultivos entre muchos otros. Estos suelos artificiales son capaces de realizar funciones ambientales y productivas de modo similar a los suelos naturales. Están diseñados para ser utilizados en situaciones de deterioro lo cual es difícilmente reversible (Tan, 2009).

Para lograr que el suelo artificial tenga un buen desempeño es necesario conocer las condiciones necesarias de cada aplicación en conjunto a las características de los materiales residuales utilizados y su evolución en el tiempo (Bao, s.f).

Ventajas del uso de residuos en la formulación de suelo artificial

- Recuperación de espacios degradados, creando numerosas zonas verdes y espacios útiles para explotaciones forestales y agrícolas.
- Costos muy bajos en la recuperación de terrenos (el mayor costo se deriva del transporte de grandes cantidades de materia residual necesaria).
- Alternativa en la gestión y valorización de los residuos, y consiguiente ahorro de recursos naturales (Bao, s.f).

Preparación de suelos artificiales Guía 207 OECD

Para lograr que un estudio sea adecuada es necesario el control de la mayor cantidad de variables que sea posible, para ello el uso de un material establecido con características particulares es necesario, para lo cual la OECD establece los métodos y formulaciones para estos suelos según su aplicación.

Para los estudios de interacción de los suelos con agentes químicos como lo son fertilizantes se hace uso de la guía 207, la cual estipula que el suelo artificial debe contener materiales que al mezclarlos proporcione el soporte correcto, en particular en esta guía se maneja la parte de arcilla como caolinita, la fuente de arena es material comercial para construcción (arena industrial) y la parte de limo puede ser cualquier material sintético inorgánico que no afecte o altere las propiedades química de los otros como lo pueden ser sales de silicatos, y para el ajuste del pH se utiliza carbonato de calcio (OECD, 1984).

C. Materiales sintéticos inorgánicos

1. Materiales inorgánicos de tipo arcillas

“Las arcillas son minerales muy abundantes en la naturaleza, las cuales han sido utilizadas por el hombre desde hace más de veinticinco mil años (Fetter & Castillo, 2005). Nuestros antiguos pobladores de Mesoamérica ya las empleaban en la preparación de vasijas y casas de adobe. Actualmente, la aplicación de las arcillas es muy importante debido a su gran abundancia en la naturaleza. Sus materiales son tan versátiles pues presentan gran estabilidad térmica e inocuidad, además de tener capacidades adsorbentes y absorbentes. Dichas propiedades permiten la aplicación de las arcillas en todos los campos de la ciencia y la tecnología, como la medicina, la biología, la química de materiales y por supuesto, la agronomía (Carretero, 2002; Choy et. al., 2007; Dasgupta & Torok, 2008)” (Prado, Mora, Millán & Sampieri, 2011).

En general, las arcillas se pueden clasificar en dos grandes grupos: en arcillas catiónicas y arcillas aniónicas.

Arcillas catiónicas

“Este tipo de arcillas presentan una estructura laminar conformada por silicatos de aluminio y magnesio hidratados, es decir, Si, O, Al, Mg y H₂O, principalmente. Aunque por lo general presentan otros metales en menor proporción, como el hierro. Debido a su porosidad interna y a su carga electrostática, las arcillas permiten la sorción (adsorción y absorción) de cationes simples, como, por ejemplo, potasio, magnesio y amonio, los cuales pueden liberarse o intercambiarse en medio ácido (Kloprogge et al., 1999., Zhang et al., 2010)” (Prado, Mora, Millán & Sampieri, 2011).

Arcillas aniónicas

“Las arcillas aniónicas poseen una estructura cristalina hexagonal u octaédrica. Constan de láminas de cationes metálicos cargadas positivamente, donde las superficies de las láminas están ocupadas por grupos hidroxilo, aniones y moléculas de agua” (Martínez & Carbajal, 2012, p.87).

Se pueden preparar arcillas aniónicas de magnesio y de aluminio con nitratos o con fosfatos como aniones compensadores de carga. Además, se emplea también una montmorillonita para retener los cationes de amonio, procedente del hidróxido de amonio (NH₄OH), que se emplea durante la síntesis de las hidrotalcitas. La hidrotalcita es el mineral más representativo entre ellas. Es una arcilla natural resultante de las variaciones isomórficas de capas tipo brucita [Mg(OH)₂] cuando se sustituyen cationes Mg²⁺ por cationes Al³⁺ (Prado, Mora, Millán & Sampieri, 2011). Estas sustituciones confieren la carga positiva a las láminas. En la hidrotalcita, el anión carbonato es el anión predominante.

“La hidrotalcita es un mineral cuya fórmula química estructural es $[Mg_6Al_2(OH)_{16}](CO_3) \cdot 4H_2O$. Este mineral pertenece al grupo de las arcillas aniónicas. La estructura de la hidrotalcita es similar a la de la brucita, $Mg(OH)_2$, en la cual el magnesio se encuentra coordinado octaédricamente a seis grupos hidroxilo (OH^-) (Li y Duan, 2006; Lima, 2004). Estos octaedros forman láminas bidimensionales. Cuando algunos cationes Mg^{2+} se reemplazan por Al^{3+} , se forma la hidrotalcita y el arreglo laminar adquiere cargas excedentes positivas. Para compensar esta carga se requiere de un anión; en el caso de la hidrotalcita, son los carbonatos CO_3^{2-} que se localizan en región interlaminar, junto con moléculas de agua. Las hidrotalcitas o arcillas aniónicas pueden sintetizarse fácilmente en el laboratorio. La variedad de familias de compuestos tipo hidrotalcita (HT) que se puede preparar es enorme y la fórmula general que los representa es: $M^{2+}_{1-x} M^{3+}_x (OH)_2 A^{n-}_{x/n} \cdot yH_2O$ en donde M^{2+} y M^{3+} son cationes metálicos divalentes y trivalentes, respectivamente, mientras que A^{n-} representa un anión de carga n-. Este anión interlaminar puede ser intercambiado por muchos otros en medio acuoso u orgánico (Li & Duan, 2006). El valor de x representa la fracción de cationes del metal trivalente, usualmente esta fracción se encuentra entre 0.20 y 0.35” (Prado, Mora, Millán & Sampieri, 2011).

2. Arcillas pilareadas de hidróxidos de doble capa

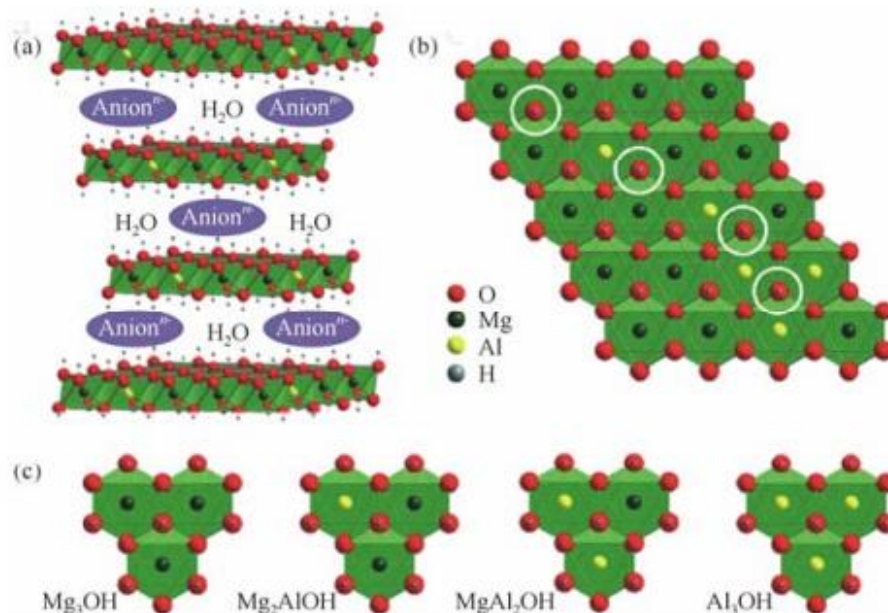
Los hidróxidos dobles laminares (HDL) son estructuras sintéticas formadas por láminas de hidróxidos metálicos cargadas positivamente que son estabilizadas con aniones interlaminares. La presencia de grupos hidroxilo en las superficies de sus láminas y los aniones intercambiables los hace compuestos ideales para preparar productos de funcionalización con moléculas orgánicas permitiendo la obtención de nuevos materiales en escala nanométrica que cubren una gama amplia de aplicaciones, desde materiales biológicamente compatibles hasta catalizadores o materiales para remediación ambiental (Zhang, Zhou, Tong & Yu, 2010).

“Una forma de clasificar a las arcillas laminares es en función de su capacidad de intercambio iónico y, relacionado con esto, la carga neta que presentan las láminas metálicas. Si la carga neta superficial de la lámina es negativa, en la región

interlaminar se encontrarán cationes apoyando en el balance de las cargas clasificándolas como catiónicas. Siguiendo esta misma lógica, las láminas cargadas positivamente contendrán aniones balanceando las cargas del mineral clasificándolas como aniónicas” (Martínez & Carbajal, 2012, p.87).

“Los hidróxidos dobles laminares son compuestos sintéticos con estructuras análogas a la hidrotalcita, por lo que en la literatura científica se les conoce también como compuestos tipo hidrotalcita, arcillas aniónicas o arcillas sintéticas cuya estructura se puede observar en la figura # 4. Estos HDLs son una de las familias de arcillas más llamativas, gracias a su alta capacidad de adsorción, funcionalización, estabilidad química relativa y térmica, de síntesis sencilla y económica, excelente biocompatibilidad, y por ello, con un gran potencial para su aplicación como fertilizantes de liberación controlada” (Martínez & Carbajal, 2012, p.88).

Figura # 4: Estructura general de hidrotalcitas.



Fuente: Zhang, D; Zhou, C; Lin, C; Tong, D; Yu, W. (2010). "Synthesis of clay minerals". Applied Clay Science, 50(1), 1

El funcionamiento general de las arcillas inorgánicas de tipo de hidróxidos pilareados de doble capa se ejemplifica en la figura # 5. El principio bajo el cual estas funcionan, es el intercambio de los nutrientes como nitratos o fosfatos por moléculas orgánicas del suelo, liberando así gradualmente los nutrientes al entrar en contacto con el agua de riego (Zhang, Zhou, Tong & Yu, 2010).

3. Arcillas pilareadas de hidróxidos de doble capa como vehículo para fertilizantes de liberación controlada.

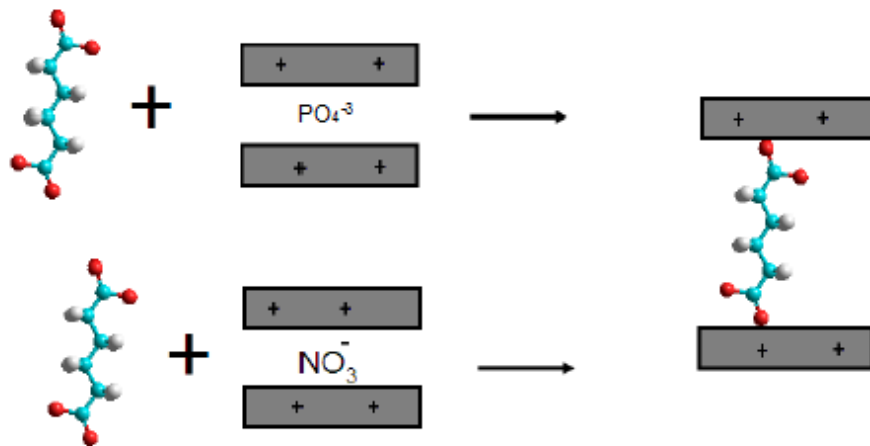
Las hidrotalcitas tienen potencial como fertilizantes de liberación controlada gracias a sus propiedades intrínsecas que cumplen con las características de un fertilizante de entrega controlada, entre las cuales se tiene que el nutriente debe estar protegido del medio por algún tipo de barrera como lo son las láminas de la estructura de la hidrotalcita, los materiales necesitan tener baja solubilidad para regular la interacción entre el material con el agua para que no se pierda todo el nutriente con un solo riego, lo cual sucede con los materiales de hidrotalcita, ya que la desorción de los nutrientes se da por un proceso de intercambio catiónico y de hidratación del material logrando una liberación regulada del anión interlamina. El intercambio aniónico que se da sobre el material de hidrotalcita se ve influenciado por temperatura, pH, tamaño de partícula como en los fertilizantes de liberación controlada reportados y disponibles comercialmente (Rose, Haase & Arellano, 2004; Rose, 2002).

Por lo tanto los materiales de tipo hidrotalcita cuentan con todas las características necesarias para ser utilizados como fertilizantes de liberación controlada.

El comportamiento de las arcillas pilareadas de hidróxidos dobles dopadas con fosfato, se analiza a través de los fosfatos que se retienen en el suelo y los fosfatos

que son lixiviados, siendo éstos los no liberados, de manera que a través de estos factores se determina el comportamiento de desorción de los fosfatos en función del tiempo y contacto con agua como la interacción con los componentes del suelo.

Figura # 5: Liberación de nutrientes por arcillas hidrotalcitas.



Fuente: Zhang, D; Zhou, C; Lin, C; Tong, D; Yu, W. (2010). "Synthesis of clay minerals". Applied Clay Science, 50(1), 1

4. Síntesis de hidrotalcitas de fosfato

La síntesis de la arcilla aniónica con fosfatos (Hidrotalcita PO_4^{3-}) se prepara siguiendo el método de coprecipitación propuesto por Olanrewaju y otros (2000). Éste consiste en precipitar, de manera simultánea, una solución acuosa que contiene sales de fosfatos de aluminio y de magnesio, una solución de hidróxido de amonio como fuente de hidróxidos (agente precipitante) y solución acuosa de fosfato diácido de amonio $[(\text{NH}_4)\text{H}_2\text{PO}_4]$. Con el fin de asegurar la mayor concentración posible de fosfatos interlaminares, la relación molar $x = \text{Al}^{3+}/(\text{Al}^{3+} + \text{Mg}^{2+})$ debe de ser de 0.33. Esto también contribuye a una estructura laminar estable de la arcilla aniónica. La adición de las dos soluciones (sales e hidróxido) se lleva a cabo lenta y simultáneamente a un recipiente en agitación constante, manteniendo

un pH de 9 en todo el proceso. Durante este procedimiento, las sales de Mg y de Al precipitan, se caracterizan porque presentan un color blanco lechoso.

Una vez adicionada la totalidad de ambas soluciones se deja agitar durante 72 horas. Con este tiempo se permite que los hidróxidos de Mg^{2+} y Al^{3+} , se reordenen dando la estructura deseada a través del proceso de envejecimiento, y se ordenen para formar la estructura laminar característica de una hidrotalcita (proceso conocido como condensación estructural), en cuya región interlaminar se disponen los aniones compensadores de cargas, es decir, los fosfatos (PO_4^{-3}) (Prado, Mora, Millán & Sampieri 2011).

Después de la agitación, el sólido de color blanco se separa por decantación del exceso de solución, se lava para eliminar el remanente de fosfatos, y se seca a $60^{\circ}C$ durante 1 hora, una vez seco el material está terminado y listo para uso. La ventaja de este método es que los PO_4^{-3} contenidos en las sales de Al y de Mg son ahora los aniones compensadores de cargas que posteriormente serán liberados como fertilizantes.

IV. Antecedentes

Existen múltiples estudios en diferentes campos de aplicaciones para la utilidad de materiales inorgánicos de tipo hidrotalcitas, también relacionados al campo de la agricultura con relación a fertilizantes, lo cual demuestra que es un tema con gran potencial, por lo cual se mencionan algunas de estas investigaciones demostrando el interés por este tema.

- Komarneni, Newalkar, Li & Gheyi (2003) sintetizaron diferentes arcillas iónicas como potenciales fertilizantes de liberación controlada para nitrógeno, donde se logró generar una arcilla de liberación lenta, donde los aniones sulfato y carbonato son los mejores para asistir el proceso de liberación de nitratos.
- García (2005) realizó el estudio para la síntesis de diferentes materiales de tipo hidrotalcitas por medio de combustión, aprovechando la propiedad del efecto memoria que estas arcillas presentan, permitiendo así un proceso en el cual se pueden realizar modificaciones a su estructura para diferentes usos, logrando así un método versátil para su producción.
- Gillman (2006) propone el uso de arcillas cargadas para tratar desechos de comida para engorde de corral, como una opción muy viable para recuperar una amplia gama de nutrientes para ser utilizadas como fertilizantes y simultáneamente como tratamiento para todos estos desechos reduciendo costos y recursos.
- Ofs, Torres-Dorante, Eckelt & Kosslick (2009) sintetizaron hidróxidos pilareados de doble capa en forma de nitrato basados en el método de coprecipitación, variando las condiciones de síntesis como el uso de solución amoniacal o hidróxido de potasio como fuente de hidroxilos para el control de pH y formación de las láminas. Variando las proporciones entre el aluminio y el magnesio, simultáneamente se estudió su capacidad como fertilizantes, logrando demostrar que el uso de hidróxido de potasio otorga la mejor

estructura para la aplicación en suelos. Esto da el mejor intercambio con la amplia variedad de aniones que se encuentra en la solución de suelo.

- Ureña-Amate, Boutarbouch, Socias-Viciano & Gonzáles (2011) desarrollaron la investigación para sistemas basados en liberación controlada de nitratos a través de hidrotalcitas para reducir la contaminación ambiental derivada del uso excesivo de fertilizantes nitrogenados, para lo cual se sintetizó una resina tipo hidrotalcita modificada con metil celulosa, a través de lo cual se determinó que se puede controlar efectivamente la liberación de nitratos al suelo jugando con las proporciones en la que se prepara, siendo mas efectivo en forma de tabletas que en forma granular.
- Martínez & Carbajal (2012) analizaron las características químicas y estructurales de las arcillas de hidróxidos dobles laminares con las cuales se pueden producir diferentes materiales en escala nanométrica, los cuales por la presencia de los de grupos hidroxilo en la superficie de las láminas y sus aniones intercambiables son aptas para múltiples aplicaciones, entre éstas se encontraron materiales biológicamente compatibles hasta catalizadores o materiales para remediación ambiental.
- Alvarado (2013) Se desarrolló un método de análisis por Fluorescencia de Rayos X por Reflexión Total (FRXT) para la determinación simultánea multielemental cualitativa y cuantitativa de diferentes elementos químicos en fertilizantes, obteniéndose límites de detección del orden de ppm y ppb.
- López (2014) se desarrolló la evaluación de fertilizantes de liberación controlada en el crecimiento de palma aceitera (*Elaeis guineensis*), para lograr optimizar el aporte de nutrientes a la plantas en desarrollo, así como maximizar la eficiencia de absorción del producto y reducción de la cantidad de mano de obra utilizada, logrando mejorar la altura y diámetro de las plantas.

V. Justificación

Guatemala es un país que necesita del desarrollo de nuevas tecnologías agrícolas que se fundamenten en la composición y propiedades químicas de nuevos fertilizantes. Especialmente para los sectores de pequeña y mediana producción que son los que cuentan con menor cantidad de recursos económicos a diferencia de los grandes productores como ingenios que tienen la capacidad económica de adquirir todo el fertilizante que necesiten, lo cual no solo pone en desventaja al campesino guatemalteco, si no representa un riesgo por la contaminación que el uso excesivo de fertilizantes genera en el ecosistema.

Debido que el cambio climático en Guatemala provee extremos climáticos, tales como sequías prolongadas o exceso de lluvia en épocas de cosecha, propicia una mayor demanda de nutrientes de parte de los cultivos, esto conlleva a un consumo excesivo de fertilizantes en las actividades agrícolas generando diferentes consecuencias: en el aspecto económico los costos de producción aumentan considerablemente haciendo que todo productor pequeño o mediano pierda la mayor parte de sus cultivos, y en el aspecto ambiental genera mayor contaminación de los cuerpos de agua por el uso excesivo de fertilizantes, dada esta situación se requiere de alternativas que ayuden a dosificar la cantidad de nutrientes al suelo haciendo que el proceso de fertilización sea más eficiente. Debido a lo anterior, y con el objeto de definir un mejor uso de los fertilizantes, se ha propuesto el empleo de fertilizantes de lenta liberación con base de arcillas aniónicas, conocidas como hidrotalcitas, que no solo presentan una liberación controlada, permitiendo así que el agricultor se vea beneficiado con un producto de buen rendimiento y bajo costo, ya que el gobierno de Guatemala invierte varios millones en el programa de fertilizantes sin lograr obtener resultados tangibles (MAGA, 2014), por lo que al disminuir estos costos y el rendimiento se lograría alcanzar la meta de una producción lo suficientemente alta como para estabilizar la demanda alimenticia del país y la economía local que depende de la actividad agrícola, ayudando al desarrollo agrícola de Guatemala y el mantenimiento del ecosistema.

En relación a toda la problemática expuesta anteriormente en el campo agrícola de Guatemala, la síntesis y prueba de una arcilla pilareada de hidróxidos de doble capa que provee de una nutrición adecuada, provee de elementos nutricionales esenciales al suelo para propiciar la seguridad alimentaria y el desarrollo agrícola de los pequeños y medianos campesinos en Guatemala.

Se sabe que Guatemala no cuenta con extensiones de tierra con composición uniforme a través de toda su área geográfica (MAGA, 2000). Por lo cual es necesario trabajar con más de un tipo de suelo de manera que se pueda obtener un panorama más amplio del efecto de las diferentes texturas en el comportamiento de los nutrientes y arcillas al momento de aplicar las hidrotalcitas como fertilizantes en diferentes tipos de suelo.

Para poder determinar la eficiencia de las hidrotalcitas como una opción de fertilizantes, es necesario realizar un análisis donde se controle todas las variables para lo cual, el uso de suelos artificiales es la mejor opción ya que otorga un control de su estructura y propiedades permitiendo así el estudio puro de la interacción de la hidrotalcita con este medio.

VI. Objetivos

A. General

Determinar el comportamiento de liberación del ion fosfato en tres tipos de suelos artificiales (franco, arenoso y arcilloso) tratados con arcillas pilareadas de hidróxidos de doble capa (hidrotalcitas).

B. Específicos

- i. Sintetizar la hidrotalcita por el método de coprecipitación.
- ii. Sintetizar los suelos artificiales según la guía de preparación de suelo estándar de la OECD.
- iii. Preparar suelos artificiales de textura franco, arenoso y arcilloso, según la guía de composición de suelos regida por el método de Bouyoucos. Utilizando las proporciones de arena, limo y arcilla: 40/40/20 para franco, 80/10/10 para arenoso y 40/20/40 para arcilloso.
- iv. Determinar la retención de fosfatos en los suelos artificiales tratados con arcillas de tipo hidrotalcitas por medio del lixiviado.

VII. Hipótesis

El presente estudio es de carácter exploratorio descriptivo, por lo que busca determinar el comportamiento del material de tipo hidrotalcitas fosfatadas en función de la disponibilidad del fosfato para la planta en diferentes texturas de suelo artificial. Debido a que no existen estudios previos que constituyan una línea base de su comportamiento más que de su síntesis. Este estudio no busca predecir ningún comportamiento, por lo tanto no se establece una hipótesis.

VIII. Materiales y métodos

A. Campo de trabajo

- **Universo:**
 - Suelos artificiales.
- **Población:**
 - Suelos sintéticos: arcilloso, franco y arenoso.
- **Muestras:**
 - 150 g de suelo artificial arcilloso, 150 g de suelo artificial franco, 150 g de suelo artificial arenoso.
- **Unidad Muestral**
 - Cada suelo artificial (franco, arenoso y arcilloso) con 2, 4 y 6 g de arcilla inorgánicas de tipo hidróxidos de doble capa.

B. Materiales y equipo:

1. Reactivos

- Ácido sulfúrico concentrado, H_2SO_4
- Molibdato de amonio tetrahidratado, $(\text{NH}_4)_6\text{Mo}_7\text{O}_{24}\cdot 4\text{H}_2\text{O}$
- Tartrato de antimonio y potasio, $\text{C}_8\text{H}_4\text{K}_2\text{O}_{12}\text{Sb}_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$
- Ácido ascórbico $\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_6$
- Fosfato ácido de sodio Na_2HPO_4 (Estándar)
- Solución amoniacal al 35% $\text{NH}_4(\text{OH})$
- Nitrato de magnesio $\text{Mg}(\text{NO}_3)_2$
- Nitrato de aluminio $\text{Al}(\text{NO}_3)_3$
- Fosfato diácido de amonio $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$
- Caolinita $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$
- Carbonato de sodio Ca_2CO_3
- Oxido de silicio
- Hidróxido de aluminio
- Agua desmineralizada

* Todas las sustancias son grado reactivo

2. Cristalería

- Tubos de ensayo con rosca (2.5 x 15 cm)
- Balones aforados 25 mL
- Balones aforados 100 mL
- Balón aforado 1000 mL
- Balón aforado 250 mL
- Erlenmeyer 250 mL
- Vaso de precipitado 1 L
- Vaso de precipitado 2 L
- Botellas de polietileno de alta densidad de 500 mL
- Vaso de precipitado 500 mL
- Vaso de precipitado 50 mL
- Varilla de agitación
- Embudo de vidrio
- Probeta 10 mL
- Probeta 25 mL
- Cápsula de porcelana

3. Materiales varios y equipo

- Gradillas para tubos de ensayo
- Estufa eléctrica con agitación
- Agitador magnético
- Macetas plásticas (Botellas plásticas con capacidad de 255 mL)

- Pipetas automáticas de volumen ajustable.
 - 2-10 mL
 - 100-1000 μ L
 - 20-200 μ L
- Puntas para pipetas automáticas varios volúmenes
 - 2-10 mL
 - 100-1000 μ L
 - 20-200 μ L
- Espectrofotómetro Spectronic 200 UV-Visible
- Celda de espectrofotómetro de 1 cm
- Vortex
- Balanza analítica.
- Espátulas
- Aspersor de botella plástico de 500 mL
- Papel filtro Wattman número 44
- Soporte universal
- Anillo de metal
- Marcador permanente negro
- Maskin tape de 1 pulgada
- Cinta adhesiva transparente
- Horno eléctrico con capacidad mínima para 10 crisoles
- Bata de trabajo
- Lentes de seguridad
- Guantes desechables de nitrilo
- Arena industrial

C. Diseño de investigación

Investigación descriptiva, para el comportamiento de arcillas sintéticas inorgánica de hidróxidos de doble capa como fertilizantes de fosfatos de liberación controlada, trabajado en macetas con suelos franco, arcilloso y arenoso, bajo condiciones controladas.

Muestreo:

El muestreo fue a conveniencia (las muestras fueron tomadas a partir de la arcilla sintetizada), ya que se utilizaron 150 g de arcillas inorgánicas de hidróxidos de doble capa sintetizadas y caracterizadas por el investigador por difracción de rayos X, las cuales cumplieron con las características necesarias para el estudio siendo éstas: Buena cristalinidad, concordancia entre difractogramas de la hidrotalcita reportada en bibliotecas de materiales de tipo arcilla y la preparada, y el espacio intersticial del material, en conjunto a la presencia de fosfatos dentro de las capas de la arcilla preparada por medio de fluorescencia de rayos X y un comportamiento reportado en la descomposición térmica de la hidrotalcita por medio de un análisis termogravimétrico.

Diseño:

Las arcillas inorgánicas de tipo hidróxidos de doble capa fueron preparadas por el método de coprecipitación reportado por Olanrewaju y otros (2000).

Para corroborar que la resina esté correctamente preparada, se caracterizó por medio de difracción de rayos X, comparando su difractograma contra el difractograma de una hidrotalcita tradicional registrada en la base de datos de Cementos Progreso, donde presentó picos en posiciones muy similares adicional a los propios de la arcilla preparada y la distancia intersticial deberá ser mayor a 7.8 Å (Theiss, 2012) y la presencia de los fosfatos analizados se comprobó por medio de fluorescencia de rayos X.

Los suelos preparados fueron artificiales de manera que no existió interferentes y fueron un medio controlado, para ello se utilizó una adaptación de la guía de preparación de suelos de la OECD guía 207 para la prueba de químicos y la guía para la clasificación de suelos de Bouyoucos, donde los suelos preparados fueron tres: franco, arenoso y arcilloso. Para esto se prepararon 1.2 kg de cada suelo para el estudio.

Los suelos fueron caracterizados por medio del método de Bouyoucos para asegurar que la textura preparada fue la esperada.

Se aplicaron 2, 4 y 6 gramos de arcilla tipo hidrotalcita en tres macetas con 150 g de cada suelo respectivamente, esto por duplicado generando así 18 macetas para el estudio, adicionalmente se manejaron 3 blancos, uno por cada suelo, los cuales fueron tratados de igual forma pero en ausencia de la arcilla inorgánica.

La evaluación de la liberación controlada se hizo a través de un sistema de riego controlado el cual consta de un sistema por aspersion utilizando 100 mL de agua destilada, esto se realizó al inicio del día durante 5 días, ya que según Prado et. al. (2011) el tiempo máximo reportado para la liberación de los fosfatos en agua es de 24 horas, analizando así los fosfatos lixiviados en cada maceta.

Cada maceta tuvo un recipiente para recibir el lixiviado generado por el riego, este fue almacenado cada día de manera individual para cada maceta durante los 5 días del experimento en frascos de polietileno de alta densidad. Donde los fosfatos lixiviados fueron los que no quedan disponibles para ser aprovechados por la planta ya que no se retuvieron en el suelo. No se consideró que fosfatos queden retenidos en la HDL-P, ya que según Prado et. al. (2011) los fosfatos se liberan en su totalidad en medio acuoso y al hidratarse la hidrotalcita esta no permite un intercambio inverso con los fosfatos, adicional a que existe una mayor afinidad por otros iones del medio como lo fue el agua, liberando así todos los fosfatos, lo cual sucedió con cada riego progresivamente.

El lixiviado de cada maceta se filtró por gravedad para eliminar cualquier residuo sólido de suelo que pueda arrastrar, el filtrado se sometió al análisis de fosfatos.

Para determinar el comportamiento de liberación de fosfatos de la hidrotalcita en medio acuoso se tomaron 5 gramos de arcilla preparada y fueron colocados en un recipiente de 250 mL con agua destilada y agitación constante durante 1, 24 y 72 horas para que liberara todos los fosfatos, para posteriormente realizar la cuantificación de fosfatos y determinar así el comportamiento de desorción de la hidrotalcita y la cantidad de fosfatos originales disponibles para ser liberados en la arcilla preparada (Prado et. al., 2011).

El análisis de fosfatos en lixiviados, se realizó a través del método 4500-P E de ácido ascórbico reportado por APHA, AWWA & WPCF (2012).

Análisis de resultados:

Dada la naturaleza descriptiva del estudio se utilizó parámetros de estadística descriptiva, los cuales incluyeron la media del porcentaje de fosfatos lixiviados en cada suelo proveniente del análisis de cada maceta por duplicado, para así poder calcular la desviación estándar y su porcentaje de coeficiente de variación, esto permitió determinar si existe un factor ajeno adicional a los no controlados (concentración de resina) que afecte la interacción del suelo y la HDL-P.

Los valores se determinaron para el conjunto total de fosfatos retenidos en los 5 días de experimentación para cada suelo y concentración de resina aplicada, y se les restaron los valores obtenidos de los blancos para cada tipo de suelo, logrando así determinar la presencia de fosfatos proveniente exclusivamente de las arcillas inorgánicas aplicadas.

D. Procedimiento

El procedimiento para preparar todos los reactivos se puede consultar en la sección de anexos

1. Síntesis de arcillas inorgánicas de hidróxido de doble capa con fosfatos

Método: Síntesis arcillas inorgánicas de hidróxidos de doble capa por el método de coprecipitación reportado por Olanrewaju et al (2000).

1. Colocar un vaso de precipitado de 2 L con agitador magnético sobre una estufa con agitación y agregar 400 mL de hidróxido de amonio (2 M).
2. Mezclar 250 mL de la solución de nitrato de aluminio (la cual contiene 1 mol) con 500 mL de nitrato de magnesio (la cual contiene 2 moles) en un vaso de precipitado de 1 L, e identificar esta mezcla como solución A.
3. Agregar lentamente al vaso de precipitado de 2 L que contiene el hidróxido de amonio, la solución A y simultáneamente 100 mL de fosfato diácido de amonio que contiene 0.66 moles.
 - a. La adición debe de ser lenta y con agitación constante.
 - b. Las sales de Mg y de Al precipitan, se caracterizan porque presentan un color blanco lechoso.
4. Controlar el pH de la solución durante todo el proceso, ya que este debe de mantenerse en pH 9.
 - a. Para mantener el pH 9 se agrega hidróxido de amonio.
5. Una vez se complete la mezcla, se deja en agitación por 72 horas.
 - a. Con este tiempo se permite que los hidróxidos de Mg y Al se reordenen en las capas en un proceso de envejecimiento, para formar la estructura laminar característica de una hidrotalcita proceso conocido como condensación estructural
6. Una vez cumplidas las 72 horas, se separa el sólido de color blanco por centrifugación.
7. Decantar y desechar el sobrenadante y lavar el sólido blanco con agua destilada 5 veces.

8. Colocar en el sólido en una cápsula de porcelana y secar en horno a 60 °C durante 1 hora.
9. Una vez está seco, se tritura y se tamiza a una medida de 2 mm.
10. Luego éste se empaca en frascos de polietileno de alta densidad y se almacena a temperatura ambiente.

2. Caracterización de la arcilla de tipo hidrotalcita

El análisis para caracterizar la hidrotalcita, se realiza a través de difracción de rayos X, fluorescencia de rayos X y análisis termogravimétrico en la empresa Cementos Progreso S.A, en la unidad de investigación CETEC.

3. Preparación de suelos

La preparación de suelos se realizó a través de la guía de métodos estandarizados reportados por OECD (1984), donde se mezcla: caolinita que es la parte de arcilla, arena industrial, y una mezcla de óxido de silicio con óxido de aluminio, donde la mezcla se tritura y se tamiza (0,0039-0,0625 mm) para que ésta sea el limo y el pH será ajustado a 7 ± 0.5 con carbonato de calcio si es necesario. Las proporciones para cada tipo de suelo se rigen por la guía de clasificación de Bouyoucos.

Tratamiento y preparación de materiales:

La arena industrial que puede ser adquirida en cualquier ferretería de confianza, se debe de lavar, para lo cual será dejada en remojo con agua destilada por 24 horas, para posteriormente ser lavada 5 veces con agua destilada y secada a temperatura ambiente durante 48 horas,

El limo se preparó a través de una mezcla de óxido de silicio y óxido de aluminio, éstos se colocan en agua destilada en proporción 50/50 y se mezclan en su totalidad por medio de una licuadora o batidora para formar una pasta.

Procedimiento:

1. Pesar 500 g de óxido de silicio y de óxido de aluminio.
2. Colocar ambas sales en un vaso de precipitado de 1 L con 750 mL de agua destilada.
3. Mezcla en licuadora o batidora hasta formar una pasta uniforme.
4. Secar en horno durante 4 horas a 100 °C.
5. Una vez seca la mezcla se tritura y tamiza a un tamaño de partícula de 0.05 mm.
6. Luego se almacena en un recipiente de polietileno de alta densidad.

Preparación de suelos artificiales:

Se preparó 3 suelos por el método de Bouyoucos: franco, arenoso y arcilloso

Suelo Franco:

Procedimiento:

1. Para suelo franco: mezclar 480 g de arena, 480 g Limo y 240 g de arcilla y homogenizar.
2. Para suelo arenoso: mezclar 960 g de arena, 120 g de Limo y 120 g de arcilla
3. Para suelo arcilloso: mezclar 480 g de arena, 240 g de limo y 480 g de arcilla

4. Caracterización de suelos por el método de Bouyoucos

1. Preparar 50 mL de solución dispersante de fosfatos al 5% (K_2HPO_4 / KH_2PO_4) pH 7.
2. Pesar 50 gramos exactos de suelo a caracterizar.
3. Mezclar los 50 gramos de suelo en 400 mL de agua destilada y agregar 5 mL de solución dispersante.
4. Colocar la mezcla en una licuadora y licuar por 1 minuto.
5. Trasvasar el contenido de la licuadora a una probeta de 1 L y aforar a este volumen.

6. Tapar la boca de la probeta con parafilm y agitar invirtiendo la probeta al menos 5 veces.
7. Una vez agitada la probeta colocar sobre una superficie estable y colocar el hidrómetro dentro de la probeta y esperar 40 segundos y tomar la lectura del hidrómetro.
8. Se deja sin mover la probeta durante 2 horas y se lee nuevamente con el hidrómetro.
9. Calcular las proporciones de arena, limo y arcilla según las lecturas del hidrómetro y el triángulo de texturas según Bouyoucos.
10. Repetir pasos 1-9 para cada suelo.

5. Aplicación de la arcilla inorgánica y su evaluación

1. Preparar 3 macetas plásticas por duplicado generando 6 macetas en total para cada tipo de suelo del estudio, con salida inferior para lixiviado. Preparar 1 maceta plástica adicional por cada tipo de suelo generando 3 macetas en total los cuales serán utilizados como blancos. Cada maceta se combina con un recipiente de boca ancha de polietileno de alta densidad para recibir lixiviado.
2. Identificar las macetas y recipientes para recolección del lixiviado por medio de rotulado según su tipo de suelo, dosis de arcilla, día de experimento y repetición o si es un blanco según los siguientes códigos:
 - a. Macetas
 - i. Suelo arenoso abreviación AN, repetición A o B y cantidad de gramos 2, 4 o 6.
 - ii. Suelo arcilloso abreviación AC, repetición A o B y cantidad de gramos 2, 4 o 6.
 - iii. Suelo franco abreviación F, repetición A o B y cantidad de gramos 2, 4 o 6.
 - iv. Blancos se agrega la abreviación BL antes del código y no se coloca la dosis.
 - v. Ejemplos:

1. Arenoso, 2 gramos y repetición A: ANA2,
 2. Arcilloso, 6 gramos y repetición B: ACB6,
 3. Franco, 4 gramos y repetición A: FA4.
 4. Blanco, arenoso: BLARN
- b. Recipientes de polietileno de alta densidad para recibir lixiviado
 - i. Suelo arenoso abreviación AN, día de experimento 1-5, repetición A o B y cantidad de gramos 2, 4 o 6.
 - ii. Suelo arcilloso abreviación AC, día de experimento 1-5, repetición A o B y cantidad de gramos 2, 4 o 6.
 - iii. Suelo franco abreviación F, día de experimento 1-5, repetición A o B y cantidad de gramos 2, 4 o 6.
 - iv. Blancos se agrega la abreviación BL antes del código y no se coloca la dosis.
 - v. Ejemplos:
 1. Arenoso, día 1, 2 gramos y repetición A: AN1A2,
 2. Arcilloso, día 3, 6 gramos y repetición B: AC3B6,
 3. Franco, día 5, 4 gramos y repetición A: F5A4.
 4. Blanco, arenoso y día 2: BLARN2
3. Agregar a las macetas 150 g de cada suelo según su código generando así 7 macetas para suelo franco, 7 macetas para suelo arenoso y 7 macetas para el suelo arcilloso.
4. Agregar arcilla de tipo hidrotalcita preparada a cada maceta de la siguiente forma:
 - a. Agregar 2 g de forma esparcida en la superficie del suelo, en dos macetas de cada suelo
 - b. Agregar 4 g de forma esparcida en la superficie del suelo, en dos macetas de cada suelo.
 - c. Agregar 6 g de forma esparcida en la superficie del suelo, en dos macetas de cada suelo
5. Agregar 100 mL de agua destilada a cada maceta, incluyendo los blancos, cada día durante 5 días consecutivos.

6. Recoger y almacenar el lixiviado cada día en recipientes de polietileno de alta densidad los cuales fueron previamente identificados como se indicó en el inciso 2 de esta sección.
 - a. Agregar 1 mL de ácido sulfúrico al 50% a cada muestra previo a almacenamiento para evitar el crecimiento de algas o bacterias

6. Análisis de fosfatos

Método: Ácido ascórbico.

Procedimiento:

Preparación de reactivos: Reactivo combinado:

- Para 100 mL se debe mezclar los siguientes reactivos en el orden indicado en las proporciones indicadas:
 - Se mezcla 50 mL de ácido sulfúrico 5 N con 5 mL de la solución de tartrato de antimonio y potasio 0.004 M, luego se mezcla con 15 mL de solución de molibdato de amonio 0.03 M y luego 30 mL de solución de ácido ascórbico 0.1 M. se agita y homogeniza bien.
- El reactivo combinado tiene un tiempo de vida máximo de 4 horas (APHA, AWWA & WPCF, 2012).

*El proceso de preparación de reactivos se puede consultar en la sección de anexos.

Curva de calibración:

1. Preparar una curva de calibración con 9 puntos, a partir de una solución estándar de fosfatos de 1 000 mg / L.
 - a. Blanco: (Reactivo combinado más agua destilada)
 - b. Punto 1: 0.00390625 mg/L (ppm)
 - c. Punto 2: 0.0078125 mg/L (ppm)
 - d. Punto 3: 0.0156250 mg/L (ppm)
 - e. Punto 4: 0.0312500 mg/L (ppm)
 - f. Punto 5: 0.0625000 mg/L (ppm)
 - g. Punto 6: 0.1250000 mg/L (ppm)
 - h. Punto 7: 0.2500000 mg/L (ppm)
 - i. Punto 8: 0.5000000 mg/L (ppm)
 - j. Punto 9: 1.0000000 mg/L (ppm)
 - k. El coeficiente de determinación mínimo aceptado será $R^2 = 0.9991$

Muestra:

1. Filtrar por gravedad el lixiviado a trabajar utilizando papel filtro Whatman 44
2. Agregar 2 mL de lixiviado en un tubo de ensayo limpio.
3. Añadir 0.5 mL de reactivo combinado.
 - a. Agitar en el vortex por al menos 30 segundos.
4. Dejar las muestras reposar por 15 minutos para que desarrollen color.
5. Determinar la absorbancia en el espectrofotómetro a 880 nm.
6. Realizar los pasos 1-6 para la muestra control de arcilla en medio acuoso para la determinación de la liberación máxima de fosfatos en la arcilla preparada.

7. Tratamiento de datos

1. Se calculó la concentración de fosfatos lixiviados en cada muestra por medio de la curva de calibración.
2. Se calculó la media de fosfatos lixiviados para cada suelo, y se calcula la desviación estándar y su coeficiente de variación de manera que se pudo observar si el efecto de liberación controlada se vió afectado por la textura del suelo.
 - a. El criterio para determinar si no existe algún factor externo a los controlados sobre la liberación y retención de los fosfatos es que el porcentaje de coeficiente de variación sea $\leq 3\%$ (APHA, AWWA, WPCF, 2000).

IX. Resultados

Tabla # 1: Análisis de suelo sintético arcilloso

Análisis de Bouyoucos	
Clasificación teórica de suelo: Arcilloso	
Lectura hidrómetro	
40 segundos	1.018
2 horas	1.018
Proporciones calculadas	
Arena	40
Limo	20
Arcilla	40
Clasificación	Arcilloso
pH	7

Fuente: Datos experimentales obtenidos en laboratorio No 1, Edificio T10, Facultad Ciencias Químicas y Farmacia.

Tabla # 2: Análisis de suelo sintético arenoso

Análisis de Bouyoucos	
Clasificación teórica de suelo: Arenoso	
Lectura hidrómetro	
40 segundos	1.006
2 horas	1.028
Proporciones calculadas	
Arena	80
Limo	10
Arcilla	10
Clasificación	Arenoso
pH	7

Fuente: Datos experimentales obtenidos en laboratorio No 1, Edificio T10, Facultad Ciencias Químicas y Farmacia.

Tabla # 3: Análisis de suelo franco

Análisis de Bouyoucos	
Clasificación teórica de suelo: Franco	
Lectura hidrómetro	
40 segundos	1.018
2 horas	1.025
Proporciones calculadas	
Arena	40
Limo	40
Arcilla	20
Clasificación	Franco
pH	7

Fuente: Datos experimentales obtenidos en laboratorio No 1, Edificio T10, Facultad Ciencias Químicas y Farmacia.

Tabla # 4: Cantidad de fosfatos teóricos en hidrotalcitas fosfatadas.

Cantidad disponible de fosfatos para ser liberados	
Dosis	Cantidad ppm
2 g	50
4 g	100
6 g	150

ppm: partes por millón

Fuente: Datos experimentales obtenidos en laboratorio No 1, Edificio T10, Facultad Ciencias Químicas y Farmacia.

Tabla # 5: Volumen de lixiviado en suelos con 2, 4 y 6 gramos de hidrotalcitas fosfatadas.

Volumen de lixiviados en los tres tipos de suelos con diferentes dosis de HDL												
D*	Franco			Arenoso			Arcilloso					
	Mx*	2 g	4 g	6 g	Mx*	2 g	4 g	6 g	Mx*	2 g	4 g	6 g
1	F1A	50 mL	50 mL	49 mL	AN1A	73 mL	71 mL	65 mL	AC1A	35 mL	39 mL	39 mL
	F1B	50 mL	49 mL	52 mL	AN1B	70 mL	68 mL	69 mL	AC1B	40 mL	40 mL	42 mL
	BLF1	46 mL	46 mL	50 mL	BLAN1	68 mL	66 mL	68 mL	BLAC1	35 mL	37 mL	41 mL
2	F2A	100 mL	100 mL	100 mL	AN2A	95 mL	100 mL	96 mL	AC2A	100 mL	100 mL	95 mL
	F2B	100 mL	100 mL	100 mL	AN2B	98 mL	95 mL	98 mL	AC2B	100 mL	100 mL	97 mL
	BLF2	100 mL	100 mL	100 mL	BLAN2	93 mL	92 mL	98 mL	BLAC2	100 mL	100 mL	100 mL
3	F3A	100 mL	100 mL	100 mL	AN3A	95 mL	100 mL	99 mL	AC3A	100 mL	100 mL	100 mL
	F3B	100 mL	100 mL	100 mL	AN3B	98 mL	97 mL	96 mL	AC3B	100 mL	100 mL	100 mL
	BLF3	100 mL	100 mL	100 mL	BLAN3	95 mL	95 mL	95 mL	BLAC3	100 mL	100 mL	100 mL
4	F4A	98 mL	100 mL	100 mL	AN4A	100 mL	100 mL	97 mL	AC4A	100 mL	100 mL	100 mL
	F4B	100 mL	100 mL	100 mL	AN4B	99 mL	100 mL	97 mL	AC4B	100 mL	100 mL	100 mL
	BLF4	100 mL	100 mL	100 mL	BLAN4	98 mL	98 mL	94 mL	BLAC4	98 mL	98 mL	98 mL
5	F5A	97 mL	100 mL	95 mL	AN5A	100 mL	100 mL	98 mL	AC5A	98 mL	100 mL	100 mL
	F5B	100 mL	98 mL	98 mL	AN5B	98 mL	98 mL	100 mL	AC5B	96 mL	100 mL	98 mL
	BLF5	100 mL	100 mL	100 mL	BLAN5	96 mL	96 mL	96 mL	BLAC5	100 mL	100 mL	100 mL

*Mx: Muestra codificada. *D: Día de experimento.

Fuente: Datos experimentales obtenidos en laboratorio No 1, Edificio T10, Facultad Ciencias Químicas y Farmacia.

Gráfico # 1: Comportamiento de la liberación de fosfatos en suelo arenoso en diferentes dosis de hidrotalcitas fosfatadas.



Fuente: Datos experimentales obtenidos en laboratorio de Bioquímica, Edificio T12, Facultad Ciencias Químicas y Farmacia.

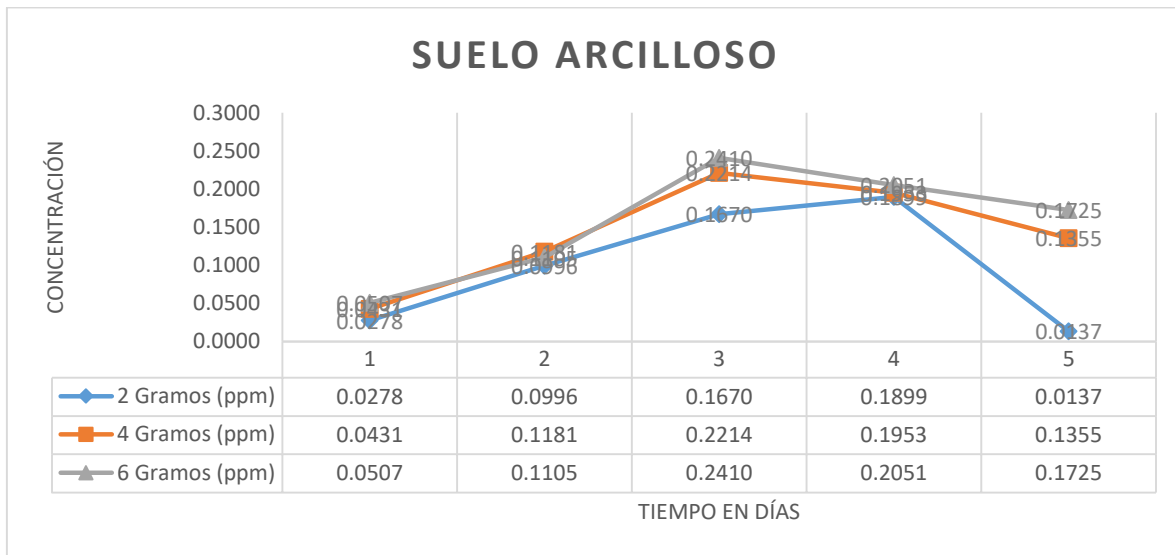
Tabla # 6: Análisis estadístico del comportamiento de liberación de fosfatos en suelo arenoso con diferente dosis de hidrotalcita fosfatada.

Suelo arenoso			
Día	Concentración ppm PO ₄		
	6 gramos HDL-P	4 gramos HDL-P	2 gramos HDL-P
1	0.17899	0.29535	0.07590
2	0.49543	0.68900	0.07786
3	12.71422	10.25663	2.77512
4	13.58417	12.21401	5.53719
5	18.73858	19.86951	10.16964
Porcentaje en lixiviado	30.47 %	43.32 %	37.42 %
Estadísticos			
Media	9.14228	8.66490	3.72714
Desviación estándar	8.36192	8.28157	4.25256
% Coeficiente de variación	91.46427	95.57603	114.09720

ppm: Partes por millón.

Fuente: Datos experimentales obtenidos en laboratorio de Bioquímica, Edificio T12, Facultad Ciencias Químicas y Farmacia.

Gráfico # 2: Comportamiento de liberación de fosfatos en suelo arcilloso con diferente dosis de hidrotalcita fosfatada.



Fuente: Datos experimentales obtenidos en laboratorio de Bioquímica, Edificio T12, Facultad Ciencias Químicas y Farmacia.

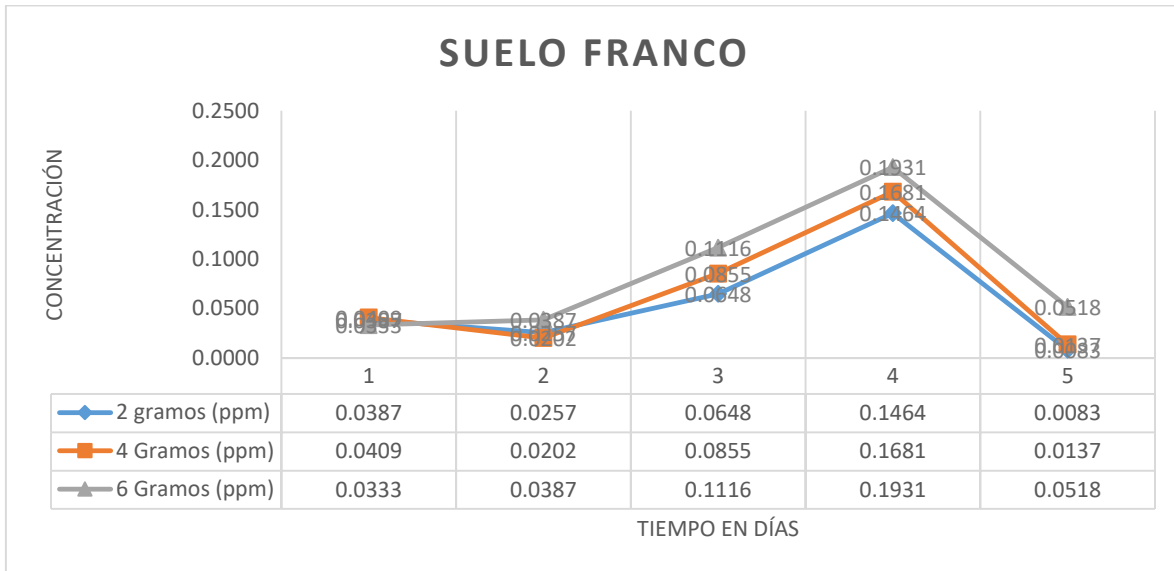
Tabla # 7: Análisis estadístico del Comportamiento de liberación de fosfatos en suelo arcilloso con diferente dosis de hidrotalcita fosfatada.

Suelo arcilloso			
Día	Concentración ppm PO₄		
	6 gramos HDL-P	4 gramos HDL-P	2 gramos HDL-P
1	0.05067	0.04306	0.02784
2	0.11048	0.11809	0.09961
3	0.24097	0.22140	0.16703
4	0.20509	0.19530	0.18987
5	0.17247	0.13549	0.01370
Porcentaje en lixiviado	0.52 %	0.71 %	0.99%
Estadísticos			
Media	0.15594	0.14267	0.09961
Desviación estándar	0.07594	0.06990	0.07941
% Coeficiente de variación	48.69831	48.99616	79.72090

ppm: Partes por millón.

Fuente: Datos experimentales obtenidos en laboratorio de Bioquímica, Edificio T12, Facultad Ciencias Químicas y Farmacia.

Gráfico # 3: Comportamiento de liberación de fosfatos en suelo franco con diferente dosis de hidrotalcita fosfatada.



Fuente: Datos experimentales obtenidos en laboratorio de Bioquímica, Edificio T12, Facultad Ciencias Químicas y Farmacia.

Tabla # 8: Análisis estadístico del Comportamiento de liberación de fosfatos en suelo franco con diferente dosis de hidrotalcita fosfatada.

Suelo franco			
Día	Concentración ppm PO₄		
	6 gramos HDL-P	4 gramos HDL-P	2 gramos HDL-P
1	0.03328	0.04089	0.03871
2	0.03871	0.02023	0.02566
3	0.11157	0.08547	0.06481
4	0.19313	0.16812	0.14637
5	0.05176	0.01370	0.00826
Porcentaje en lixiviado	0.29 %	0.33 %	0.56 %
Estadísticos			
Media	0.08569	0.06568	0.05676
Desviación estándar	0.06767	0.06377	0.05418
% Coeficiente de variación	78.97370	97.09292	95.44357

ppm: Partes por millón.

Fuente: Datos experimentales obtenidos en laboratorio de Bioquímica, Edificio T12, Facultad Ciencias Químicas y Farmacia.

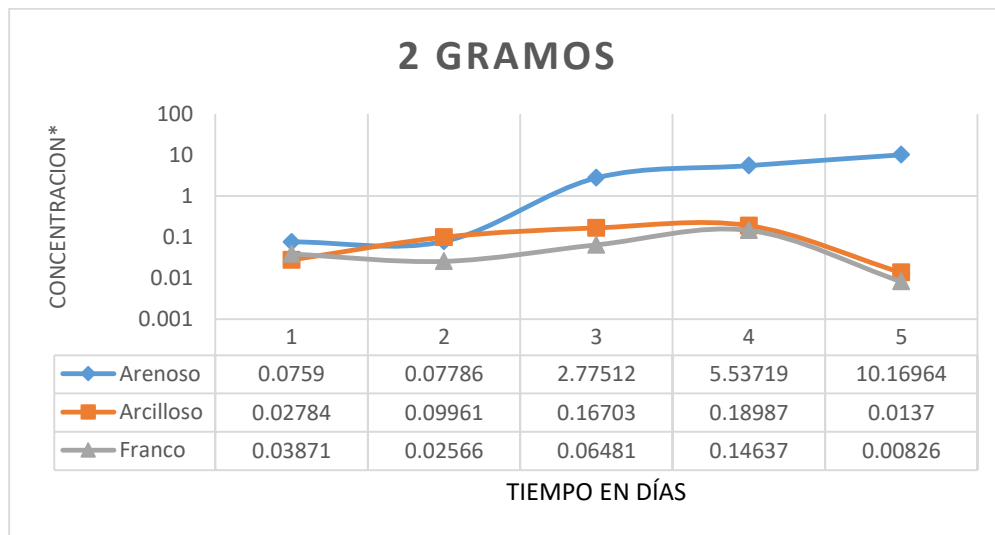
Tabla # 9: Análisis de la liberación máxima de fosfatos de hidrotalcitas fosfatadas en medio acuoso en rango de 1 a 72 horas.

Tiempo en horas	Concentración ppm
	5 gramos HDL-P
1	21.33056
24	21.70016
72	39.48718

Ppm: Partes por millón.

Fuente: Datos experimentales obtenidos en laboratorio de Bioquímica, Edificio T12, Facultad Ciencias Químicas y Farmacia.

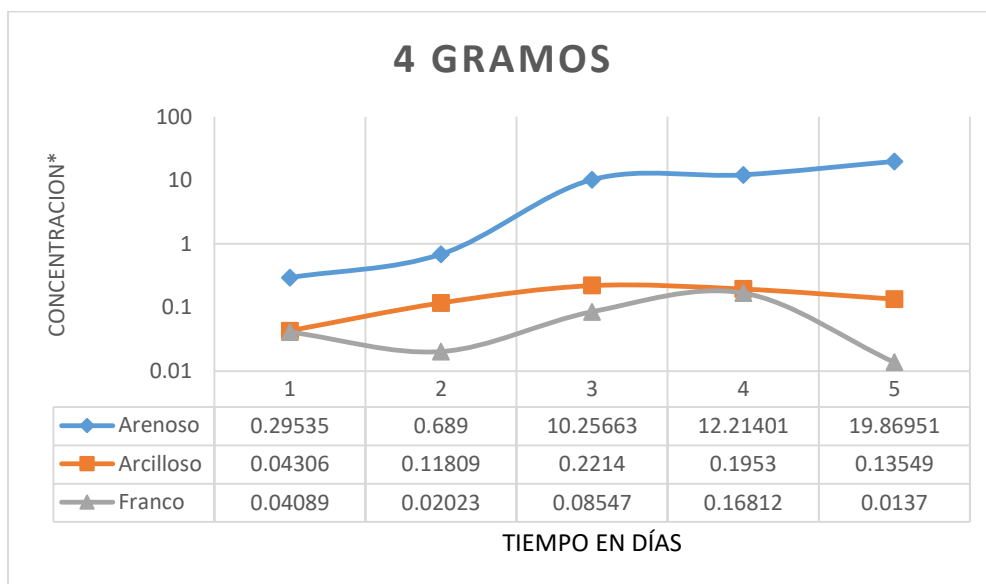
Gráfico # 4: Comparación de la liberación de fosfatos entre suelo franco, arenoso y arcilloso con 2 gramos de hidrotalcita fosfatada.



*Escala logarítmica

Fuente: Datos experimentales obtenidos en laboratorio de Bioquímica, Edificio T12, Facultad Ciencias Químicas y Farmacia.

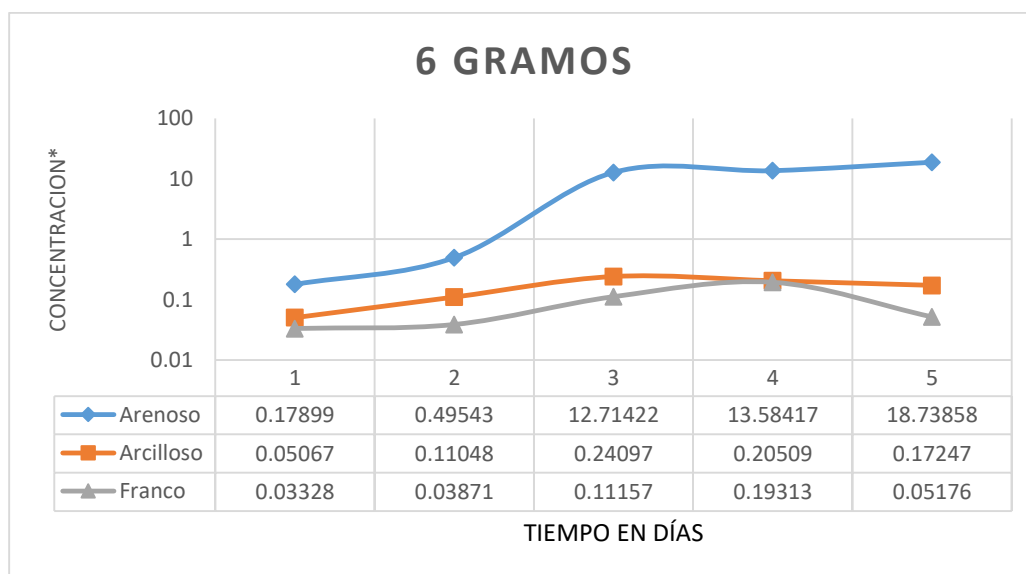
Gráfico # 5: Comparación de la liberación de fosfatos entre suelo franco, arenoso y arcilloso con 4 gramos de hidrotalcita fosfatada.



*Escala logarítmica

Fuente: Datos experimentales obtenidos en laboratorio de Bioquímica, Edificio T12, Facultad Ciencias Químicas y Farmacia.

Gráfico # 6: Comparación de la liberación de fosfatos entre suelo franco, arenoso y arcilloso con 6 gramos de hidrotalcita fosfatada.



*Escala logarítmica

Fuente: Datos experimentales obtenidos en laboratorio de Bioquímica, Edificio T12, Facultad Ciencias Químicas y Farmacia.

Tabla # 10: Caracterización por difracción de rayos X de la hidrotalcita fosfatada.

Difracción de rayos X			
Pico	Posición	Intensidad	Distancia intersticial (Å)
1	10.1628	7338.76	8.69693
2	18.0842	4445.87	4.90135
3	22.5770	7810.21	3.93513
4	32.9862	10739.37	2.71328

Fuente: Datos experimentales obtenidos en laboratorio CETEC de cementos progreso.

Tabla # 11: Análisis termogravimétrico de la hidrotalcita fosfatada.

Análisis termogravimétrico		
Etapa	Temperatura °C	% Masa perdida
1	118.83	5.83
2	240.67	6.72
3	307.83	53.3
4	391.33	8.21

Fuente: Datos experimentales obtenidos en laboratorio CETEC de cementos progreso.

Tabla # 12: Análisis por fluorescencia de rayos X de la hidrotalcita fosfatada.

Fluorescencia de rayos X	
Compuesto	Porcentaje %
Al₂O₃	5.74
MgO	8.96
P₂O₅	7.04
Pérdida por calcinación	76.95

Fuente: Datos experimentales obtenidos en laboratorio CETEC de cementos progreso.

X. Discusión de resultados

Las arcillas de hidróxidos de doble capa fosfatadas (HDL-P) son arcillas aniónicas dopadas con fosfatos en sus espacios intersticiales.

La capacidad como fertilizantes de liberación controlada de las HDL-P es afectada directamente por su interacción con el suelo en presencia de un riego constante o esporádico. Dicha interacción depende principalmente de la textura del suelo, la cual se determina en función de las diferentes proporciones en las que están presentes sus diferentes partículas (limo, arena y arcilla), siendo las texturas los principales factores que afectan la difusión, retención y flujo de nutrientes a través del suelo con la finalidad de que las plantas que estén presentes tengan disponibles todos los nutrientes necesarios para su desarrollo (Comerford, 2005).

Los suelos artificiales para el estudio fueron preparados y caracterizados a través del método de Bouyoucos donde según los resultados observados en las tablas # 1, 2 y 3 se obtuvo las texturas de tipo Franco, Arcilloso y Arenoso respectivamente, lo cual cumple con lo esperado. Asimismo se obtuvo un pH neutro para todos los suelos, asegurando que es un medio controlado para la interacción con la HDL-P.

El análisis para la caracterización de HDL-P por difracción de rayos X (DRX) permitió determinar que la HDL-P es en efecto una arcilla pilareada de hidróxidos de doble capa y que tiene alta cristalinidad, ya que el espectro observado en Anexo # 4 presentó picos muy bien definidos a través del espectro y en posiciones muy similares al patrón sin fosfato de HDL que se observa en el anexo # 7, donde la presencia de los 4 picos señalados en sus respectivas posiciones como se observa en la tabla # 10 permiten determinar que la estructura de hidrotalcita está presente, y las pequeñas diferencias en el desplazamiento pueden explicarse por el efecto de la presencia del ión fosfato en la estructura de la HDL-P, ya que éste al ser un anión de mayor tamaño en comparación al carbonato que es el anión

tradicional en las hidrotalcitas patrón del anexo # 6 la estructura sufre un pequeño grado de deformación haciendo que exista un desplazamientos en los picos mencionados al igual que su intensidad. La cristalinidad se determinó primero por la presencia de los picos reportados en la Tabla # 10, ya que si el material no tuviera un buen grado de cristalinidad no se obtendrían dichos picos que son las señales de las reflexiones constructivas dentro de la estructura, donde éstas reflexiones son armónicas de la reflexión basal del pico # 1 (Martínez & Carbajal, 2012). En conjunto a este aspecto, el pico # 1 permitió determinar por la ley de Bragg la distancia intersticial entre láminas donde se retiene el ión fosfato la cual fue de 8.69 Å como se observó en la Tabla # 10, ya que el valor del espacio intersticial es superior a 7.8 Å que es el valor típico para las HDL tradicionales (Theiss, 2012), indicando así que hubo una expansión en éste espacio debido a la presencia de anión interlaminar como lo fue el fosfato, y en conjunto a la presencia de los picos mencionados se logró determinar que la HDL-P fue sintetizada exitosamente.

Como complemento a la caracterización de la HDL-P, se utilizó un análisis termogravimétrico (TGA), el cual otorgó los resultados observados en la Tabla # 11 y la curva de descomposición observada en el Anexo # 3. Ésta presentó un comportamiento tradicional de descomposición térmica para las HDL tradicionales. El proceso de descomposición consta de 4 etapas, donde las dos primeras etapas corresponden a un proceso de deshidratación. La presencia de agua se debe a que la síntesis de la HDL-P se realiza en medio acuoso más el carácter higroscópico del material, hace que algunas moléculas de agua se adhieran a las láminas superficiales. Otra razón es por el proceso de reestructuración de los grupos hidroxilo y finalmente, por ser una molécula que puede alojarse en las capas interlaminares, esta queda atrapada dentro de la estructura, de manera que esto coincide con los porcentajes de masa perdidos que no son superiores al 15 % siendo este porcentaje el promedio típico de agua retenida por hidratación en este tipo de materiales. En la tercera etapa se observa una pérdida de masa equivalente a la mitad de toda la HDL-P. Dicha etapa se debe al proceso de deshidroxilación donde se pierde gran parte de los hidroxilos dentro de la estructura y posiblemente

parte de los fosfatos interlaminares en conjunto a los adheridos en la superficie, pero a pesar del proceso de deshidroxilación la estructura interlaminar no se destruye por completo, permitiendo que los fosfatos interlaminares restantes permanezcan, por lo que la cuarta etapa es la pérdida de estos fosfatos remanentes, ya que la destrucción total y pérdida del aluminio y magnesio requieren temperaturas superiores a los 1 000 °C, logrando así caracterizar la HDL-P, ya que el comportamiento de deshidratación-deshidroxilación-pérdida de iones interlaminares, es típica de materiales tipo HDL (Palmer, Spratt & Frost, 2008; Pérez-Ramírez & Abelló, 2008; Rey & Fornés, 1992; Petrova, 1999; Theiss, 2012).

La caracterización para comprobar la composición elemental en la estructura de la HDL-P se realizó a través de fluorescencia de rayos X, donde se obtuvo que existe la presencia de aluminio, magnesio, fósforo e hidroxilos. Esto se puede comprobar en la Tabla # 12, en la cual se observa que la estructura de la HDL-P está efectivamente compuesta por las sustancias esperadas. Las proporciones observadas fueron las esperadas ya que la relación catiónica del magnesio y aluminio cumple con la proporción de 0.3 para la estructura de la hidrotalcitas y la cantidad esperada de fosfato fue acorde ya que se esperaba un 7 por ciento de fosfatos por gramo de hidrotalcita. Los hidroxilos se reportaron como los componentes perdidos por calcinación ya que éstos no pueden ser analizados como especie individual por esta técnica ya que se liberan como diversos óxidos de tipo espinela a temperaturas cercanas a los 1000 °C (Hudson, Carlino & Apperley, 1995).

El comportamiento de liberación y retención de fosfatos en suelos de textura franco presentó una buena retención reflejando así un buen proceso de liberación controlada de parte de la HDL-P. Este comportamiento permitió observar varios aspectos reflejados en la Tabla # 8, entre los cuales se puede mencionar en primera instancia que no es posible hacer uso del coeficiente de variación, ya que el valor de la media es muy cercano a cero, esto genera un problema matemático que al dividir entre un valor muy cercano a cero, el valor del coeficiente de variación se

eleva drásticamente dejando de ser representativo (Rey & Ramil, 2007). Otro aspecto que se considera es la distribución de las concentraciones de fosfatos, ya que ésta es similar en cada variación de cantidad agregada de HDL-P. Esto se observó a través de la desviación estándar donde los valores son muy cercanos entre sí para 2, 4 y 6 gramos de HDL-P, lo que nos permitió determinar que la distribución del fosfato en el suelo franco al agregar cualquiera de estas cantidades es semejante. Por lo tanto el factor de "cantidad agregada" no genera problema de interacción ni afecta el proceso de liberación controlada, determinando así que la liberación se ve influenciada directamente por la textura del suelo, ya que se observó un aumento en la concentración de fosfatos con el paso de cada día. Estos resultados son los esperados, debido a que entre más tiempo y más riegos haya, ocurre un proceso de liberación controlada que aumenta la cantidad de fosfatos en el suelo progresivamente, donde al no estar presente una planta que pueda hacer uso de los nutrientes disponibles en el suelo, estos fueron lixiviados, razón por la cual se observó el aumento continuo en el lixiviado, de manera que en sistema con plantas ocurre la permanencia del nutriente disponibles en el suelo.

La tendencia observada para la liberación de fosfatos en suelo franco fue la esperada, ésta se muestra en el Gráfico # 3 donde el comportamiento presenta varios aspectos; primero se observa un aumento notable en la concentración de fosfatos con cada día que transcurre, indicando así un proceso de liberación controlada. Sin embargo, existen algunos cambios de interés en el día 2 y 5, ya que en lugar de aumentar la concentración se observaron disminuciones en la misma, y esto se debe en principio a la textura del suelo. En la tabla # 3 se observó que este suelo tiene proporciones mayoritarias de arena y limo, lo cual genera un estructura donde los poros son de tamaño intermedio y una estructura más diversa, lo cual permite el paso y distribución de aire y agua en toda la estructura, dando lugar así a varias zonas para acumulación de nutrientes, tales como el fosfato. Debido a esto, después del primer día estos espacios aún no han sido saturados, ya que el 50% del agua de riego aplicada en el día 1, quedó retenida dando lugar a un medio para que los fosfatos se disuelvan y distribuyan por toda la estructura del suelo, a

diferencia de los otros días que no se retiene agua como se observa en la tabla # 5, permitiendo así que a través del riego del segundo día los fosfatos liberados se acumulen y continúe el proceso de difusión por todo el suelo creando un equilibrio osmótico entre la solución del suelo que contiene el agua retenida con los fosfatos disueltos (fase acuosa del suelo o solución de suelo) y los fosfatos adheridos al suelo (fase sólida del suelo) (Mariamma, 2010; Espinoza, Slaton & Mozaffari, 2012; Dalgliesh & Foale, 2005). Dicho fenómeno ocurre en cada día pero, una vez el suelo está saturado con cada riego, el agua que viaja a través del mismo arrastra fosfatos libres en la solución del suelo y se lixivian. Dicho proceso genera la disminución observada para el día 5, ya que en el día 4 se alcanza el pico de saturación y debido a que la liberación de fosfatos continua el riego en este día arrastra mayor cantidad de fosfatos de la solución del suelo, liberando así espacios disponibles para nuevos fosfatos que son retenidos en el riego del día 5, disminuyendo así la cantidad de fosfatos lixiviados. De esta forma se observó que a través del riego se logra mantener una disponibilidad de fosfatos en el suelo que se renueva y mantiene a través de un proceso de liberación controlada.

La retención en suelo arcilloso presentó un buen comportamiento de liberación y retención de fosfatos donde se observó dos aspectos principales. Primero se tiene el problema de que las medias siguen siendo bajas como se observa en la tabla # 7, de manera que el coeficiente de variación obtenido no es representativo, sin embargo se puede observar que existe una semejanza entre los valores de la desviación estándar entre las tres cantidades de HDL-P agregada, demostrando que para la textura arcillosa la variación de HDL-P agregada no altera el proceso de liberación controlada. Segundo, se observa un comportamiento esperado ya que la concentración de fosfatos aumenta con el paso de los días y con el aumento de la cantidad de HDL-P agregada, dando así un comportamiento uniforme y de liberación controlada. A través del comportamiento observado se pudo observar como la textura influencia el proceso de liberación en función de su capacidad de retención de nutrientes.

Se observó una tendencia esperada para el suelo arcilloso donde, según el Gráfico # 2, el aumento de la concentración de fosfatos es constante en los primeros tres días. Luego, en el día 4 y día 5 se observó una disminución de concentración, esto se debe en esencia a la textura arcillosa del suelo, ya que esta textura al tener en mayor proporción arcilla como se muestra en la tabla # 1, el tamaño de partícula es menor, lo que permite que esta textura sea más compacta y por lo tanto los poros ocupados por agua y aire son de menor tamaño. Esto genera un proceso de difusión lenta en el suelo que dificulta la dispersión de los nutrientes (Towhid, 2013; Mariamma, 2010), por lo tanto se alcanza un pico de saturación en menor tiempo, como el que se observó en el día 3 por la falta de movimiento de nutrientes, generando así un mayor lixiviado en este día y liberando así los espacios disponibles, favoreciendo la difusión de nutrientes restantes en la solución de suelo, y permitiendo el flujo de nuevos nutrientes en el día 4 y 5. Un aspecto a considerar en este caso es que cuando se utiliza solamente 2 gramos de HDL-P el proceso de saturación tiene el mismo comportamiento que con 4 y 6 gramos pero toma un poco más de tiempo, ya que la cantidad de fosfatos es menor, lo cual explica la diferencia entre el pico de saturación de 2 gramos en el cuarto día, pero en el quinto disminuye como se esperaba. Por lo tanto la disminución de concentración demuestra que se logra mantener a los nutrientes disponibles por medio de una liberación controlada para la acumulación de nutrientes en el suelo en cada caso.

El comportamiento para la retención y liberación de nutrientes en suelo de tipo arenoso presentó un efecto severo de parte de la textura del suelo, esto se observó a través del coeficiente de variación en la tabla # 6, donde los valores obtenidos son altos para las tres cantidades de HDL-P agregadas, lo que nos reflejó claramente que el efecto de esta textura es la baja retención de nutrientes, donde dicha retención disminuye conforme transcurre el tiempo y se observó que entre menor es la cantidad de HDL-P agregada mayor es el efecto de la textura, esto se observó tanto en el valor tan alto del coeficiente de variación como en la desviación estándar, ya que presenta un comportamiento de dispersión diferente al de los casos donde se aplicó 4 y 6 gramos de HDL-P. Este comportamiento observado presentó un

proceso de liberación controlada reflejado en el aumento progresivo de la liberación de nutrientes en cada día pero de baja efectividad ya que no se logran retener los nutrientes más de dos días debido a la textura.

El Gráfico # 1 muestra el comportamiento y tendencia observados para la liberación y retención de fosfatos en suelos de textura arenosa, donde con el paso del tiempo la concentración de fosfatos lixiviados fue aumentando de manera drástica, en especial en el día 5, donde la concentración liberada es casi la totalidad de los fosfatos liberados por la HDL-P, ya que según la tabla # 9 estos valores acumulados a través de los días equivalen a la mayoría de fosfatos dentro de la HDL-P. Este comportamiento se debe a que la textura arenosa contiene en su estructura una mayor proporción de arena lo cual se observa en la tabla # 2, esto genera que el tamaño de los poros sea mayor y por ende pierda la capacidad de retención, ya que el tamaño de poro afecta directamente el movimiento y flujo de aire, agua y nutrientes, de manera que la distribución y capacidad de retener nutrientes es pobre (Mariamma, 2010; Rawls, Gish & Brakensiek, 1991). La pobre retención presentada se observó en conjunto a la baja capacidad de retener agua en el suelo, donde se observó en la Tabla # 5 que retuvo en promedio un 30% al inicio y no retuvo más agua en otros riegos posteriores, lo cual generó un proceso de lavado de todos los nutrientes en cada riego.

El análisis de retención y liberación controlada en los tres tipos de suelos presentaron resultados esperados, donde las diferencias importantes se observaron en los Gráficos # 4, 5 y 6. Entre las diferencias se determinó que el agregar 2, 4 o 6 gramos de HDL-P no afectó el comportamiento de la liberación controlada más allá de la cantidad de fosfatos que esta puede liberar al medio, ya que los tres gráficos tienen el mismo comportamiento.

La diferencia más importante entre los tres tipos de suelo fue la capacidad de retención del nutriente donde se observó claramente que de los tres suelos el menos efectivo para retener y promover la liberación controlada es el suelo arenoso, como

se observa en las líneas de color azul en los Gráficos # 4, 5 y 6, donde la retención fue casi nula ya que entre mayor la concentración de lixiviado menor retención, a diferencia de los suelos franco y arcilloso que presentaron mayor retención reflejado como menor concentración en lixiviados. Estos dos suelos presentaron un comportamiento similar pero se determinó que el suelo que retuvo mayor cantidad de nutrientes fue el franco en todos los casos. Esto se debe a que el suelo arcilloso por ser una textura más compacta por la arcilla, el trayecto que recorre el agua con nutrientes hace que se distribuyan más lentamente por toda la estructura, por lo tanto la difusión de los nutrientes es más lenta y por ende con cada riego se arrastra una mayor cantidad de nutrientes al estar acumulados en menos puntos, a diferencia del suelo franco que es una textura intermedia entre arenoso y arcilloso, esto hace que el tamaño de los poros y variedad de tamaño en partículas permita una mejor difusión de nutrientes en su estructura, ya que el agua y aire en el suelo se distribuye de una mejor forma, acelerando el movimiento y fijación de los nutrientes en su estructura sin permitir que sean lavados tan fácilmente por el riego.

Las variaciones entre las dosificaciones de 4 y 6 gramos observadas en es especial en el grafico # 1, donde hubo un traslape de las líneas de tendencia se debió al efecto de la ausencia de homogenización entre la HDL-P y el suelo artificial, ya que la HDL-P fue esparcida solamente en la superficie, de manera que pudieron formarse acumulaciones por el movimiento natural de la misma con los riegos generando así una liberación un poco diferente a las otras observadas.

La liberación controlada de fosfatos a través de un riego controlado en los tres tipos de suelos con HDL-P presentó resultados esperados, logrando determinar su comportamiento, donde se observó que estas son capaces de liberar cantidades adecuadas de fosfato progresivamente en todos los suelos.

XI. Conclusiones

1. El comportamiento de liberación de fosfatos en suelos franco, arenoso y arcilloso no fue alterado por la cantidad de HDL-P agregada. Este factor solamente influencia en la cantidad de fosfatos liberados al suelo en relación a la dosis aplicada.
2. La textura del suelo es un factor que influencia directamente el comportamiento de liberación controlada de fosfatos a través de su capacidad de retención.
3. El comportamiento de la liberación controlada para los tres suelos es progresiva con el paso del tiempo y permite un flujo constante de nutrientes que están disponibles para ser aprovechados evitando su pérdida por lixiviado.
4. Las arcillas de hidróxidos de doble capa presentaron un comportamiento funcional como fertilizantes de liberación controlada en los tres tipos de suelo, siendo el suelo franco el más apto para su aplicación, ya que éste fue capaz de retener la mayor cantidad de fosfatos en su estructura.
5. Las HDL-P son aptas como fertilizantes de liberación controlada en suelos arenosos para períodos cortos que no excedan los dos días debido a la poca efectividad del fertilizante por la baja retención de nutrientes en este suelo.
6. La síntesis de la arcillas pilareadas de hidróxidos de doble capa dopadas con fosfatos fue exitosa, ya que presentó alta cristalinidad, estructura laminar y presencia de fosfatos interlaminares.

XII. Recomendaciones

1. Realizar estudios posteriores donde se incluya materia orgánica en el suelo para poder determinar el efecto que ésta tendrá en el comportamiento de la liberación de fosfatos a partir de las arcillas pilareadas de hidróxidos de doble capa dopadas con fosfatos.
2. Espaciar el tiempo de riego en dos días para permitir una mejor difusión de nutrientes en el suelo franco y arcilloso para optimizar la liberación de nutrientes de parte de las HDL-P
3. Espaciar el riego al menos en tres días si desea hacer uso de las arcillas de hidróxidos de doble capa en suelos arenosos, de manera que se logre un mejor rendimiento de parte de las arcillas.
4. Preferiblemente aplicar en suelos franco y arcilloso para aprovechar la capacidad de las HDL-P como fertilizantes de liberación controlada.
5. Homogenizar el suelos artificiales con la HDL-P para mejorar la distribución de fosfatos en el suelo.
6. Hacer uso de un blanco positivo, donde se utilice fosfato monobásico de potasio en lugar de HDL para comparar la diferencia en su comportamiento dentro de las diferentes texturas.

XIII. Referencias bibliográficas

- Alvarado, C. (2013). Análisis Multielemental de Fertilizantes (mezclas físicas) por Fluorescencia de Rayos X por Reflexión Total.(Tesis de licenciatura). Universidad de San Carlos de Guatemala. Guatemala.
- APHA (American Public Health Association), AWWA (Water Works Association), & WEF (Water Environment Federation). (2012). *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (22nd ed.). Washington: American Public Health Association.
- APHA, AWWA & WPCF. (2000). Métodos normalizados para el análisis de aguas potables y residuales. Estados Unidos:Editorial Días Santos.
- Bao, M. (2008). Formulación de suelos artificiales para terrenos degradados. Santiago de Compostela: Universidad de Santiago de Compostela.
- Belart, C. (2008). Biología y Geología. Madrid:Editex.
- Bolaños, A. (2008). Introducción a la olericultura. Costa Rica: EUNED.
- Caballeros, A. (2013). Agricultura familiar, soberanía alimentaria y buen vivir: alternativas y desafíos en Guatemala. Guatemala: Coordinación de ONG y Cooperativas.
- Carretero, M. (2002). Clay minerals and their beneficial effects upon human health. A review. *Applied Clay Science*. 21(1).155-163
- Choy, J.-H., Choi, S.-J., Oh, J.-M., & Park, T. (2007). "Clay minerals and layered double hydroxides for novel biological applications". *Applied Clay Science*, 36(1-3), 122.
- Comerford, N. (2005). *Soil Factors Affecting Nutrient Bioavailability*. Berlin:Springer-Verlag.
- Dalgliesh N. & Foale, M. (2005). *Soil matters: Monitoring soil water and nutrients in dryland farming*. Australia:Cranbook press
- Dasgupta, S. & Torok, B. (2008). "Application of clay catalysts in organic synthesis. A review". *Organic Preparations and Procedures International*, 40(1)

- Dibb, D., Roberts, T., & Welch, R. (2005). De la cantidad a la calidad: la importancia de los fertilizantes en la alimentación humana. *Informaciones Agronómicas*, 60(1), 2-9.
- DISAGRO. (s.f). Conceptos básicos de fertilizantes y rellenos. Recuperado de <http://www.disagro.com/sites/default/files/downloads/Conceptosbasicosfertilizantesyllenos.pdf>
- Espinoza, L., Slaton, N. & Mozaffari, M. (2012). Cómo Interpretar los Resultados de los Análisis de Suelos. División de agricultura. Universidad de Arkansas.
- Fetter, G., & Castillo, P. (2005). "Catalizadores tipo arcillas pilareadas". *Materiales Avanzados*, vol. 4: 19.
- Food & Agriculture org. (2000). Estrategias en materia de fertilizantes. Roma: Asociación Internacional de la Industria de los Fertilizantes
- Food & Agriculture org. (2002). Los fertilizantes y su uso: una guía de bolsillo para los oficiales de extensión. Roma: Asociación Internacional de la Industria de los Fertilizantes.
- Food & Agriculture org. (2007). Portal de Suelos de la FAO: Propiedades Químicas. Roma: Asociación Internacional de la Industria de los Fertilizantes.
- Fuentes & Yagüe. (1999). El suelo y sus fertilizantes (5a ed.). España: Mundi-Prensa.
- García, V. (2005). "Nuevos compuestos tipo hidrotalcita sintetizados por combustión: Su efecto memoria". (Tesis de licenciatura). Universidad Autónoma Metropolitana-Iztapalapa. México
- Gillman, G. (2006). Converting feedlot waste to fertilizer using charged clays: Environmental and economic benefits. *Environmental Quality Management*, 16(2), 73-80.
- Gobierno Bolivariano de Venezuela (s.f). Método de Bouyoucos. Sistema de información del gobierno Bolivariano de Venezuela. Recuperado de: http://www.sian.inia.gob.ve/repositorio/manuales_suelos/analisis_suelos_ferriidad/2.1.pdf

- González, F. (2011). Contaminación por fertilizantes: un serio problema mundial. Medio Ambiente y Desarrollo sostenible. Recuperado de <http://fgonzalesh.blogspot.com/2011/01/contaminacion-por-fertilizantes-un.html>
- Guatemala. Ministerio de Agricultura, Ganadería y alimentación. Unidad de políticas e Información estratégica [UPIE-MAGA] y Programa de emergencia por desastres naturales [MAGA-BID]. (2000). Primera aproximación al mapa de clasificación taxonómica de los suelos de la República de Guatemala, a escala 1:250, 000. Guatemala: MAGA
- Hernández, A., Bojórquez I., Morell, F., Cabrera, A., Ascanio, M., García, J... Nájera, O. (2010). Fundamentos de la estructura de suelos tropicales. México: Universidad Autónoma de Nayarit.
- Hudson, M., Carlino, S. & Apperley, D. (1995). Thermal Conversion of a Layered (Mg/Al) Double Hydroxide to the Oxide. *J. Mater. Chem.* 5(2). 323-329.
- INE [Instituto nacional de Estadística]. (2014). Caracterización, República de Guatemala. Gobierno de Guatemala, 5-6. Recuperado de <http://www.ine.gob.gt/sistema/uploads/2014/02/26/L5pNHMXzxy5FFWmk9NHCrK9x7E5Qqvvy.pdf>
- Kloprogge, J. T., Komarneni, S., & Amonette, J. E. (1999). "Synthesis of smectite clay minerals: A critical review". *Clays and Clay Minerals*, 47(5), 529-554
- Komarneni, S., Newalkar, B., Li, D & Gheyi, T. (2003). Anionic Clays as Potential Slow-Release Fertilizers: Nitrate Ion Exchange. *Journal of Porous Materials*. 10. 243-248.
- Li, F., & Duan, X. (2006). "Layered Double Hydroxides: Applications of Layered Double Hydroxides". *Struct. Bond*, 193
- López, S. (2014). Evaluación de fertilizantes de liberación controlada en el crecimiento de palma aceitera (*Elaeis guineensis*. Jacq, var. Ghana) en la fase de vivero, diagnóstico y servicios realizados, en la finca el canaleño, Raxruhá, Alta Verapaz, Guatemala, C.A. (Tesis de licenciatura). Guatemala: Universidad de San Carlos de Guatemala.

- MAGA [Ministerio de Agricultura, Ganadería y alimentación]. (2015). El Agro en Cifras 2014. Gobierno de Guatemala. p. 8-11. Recuperado de <http://web.maga.gob.gt/download/1agro-cifras14.pdf>
- Mariamamma, J. (2010). A study on the water retention characteristics of soils and their improvements (tesis de doctorado). Cochín University of Science and Technology.
- Martínez, D. & Carbajal, G. (2012). Hidróxidos dobles laminares: arcillas sintéticas con aplicaciones en nanotecnología. *Avances en Química*, 7(1), 87-99
- Navarro, G. & Navarro S. (2013). *Química agrícola, química del suelo y de nutrientes esenciales*. Madrid: Mundi-Prensa Libros.
- Navarro, G. & Navarro, S. (2014). *Fertilizantes: química y acción*. Madrid: Ediciones Paraninfo, S.A.
- OECD [The organization for economic co-operation and development]. (1984). *Guideline for Testing Chemicals No.207. Earthworm, Acute Toxicity Tests*. Paris: Organization for Economic Co-operation and Development.
- Olf, H., Torres-Dorante, L., Eckelt, R. & Kosslick, H. (2009). Comparison of different synthesis routes for Mg–Al layered double hydroxides (LDH): Characterization of the structural phases and anion exchange properties. *Applied Clay Science*, 43, 459-464.
- Olanrewaju, J., Newalkar, B. L., Mancino, C. & Komarneni, S. (2000). "Simplified synthesis of nitrate form of layered double hydroxide". *Materials Letters*, 45(6). p. 307
- Palmer, S., Spratt, H. & Frost, R. (2008). Thermal decomposition of hydrotalcites with variable cationic ratios. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*. 1(95). 123-129
- Pérez-Ramírez, J. & Abelló, S. (2006). Thermal decomposition of hydrotalcite-like compounds studied by a novel tapered element oscillating microbalance (TEOM) comparison with TGA and DTA. *Thermochimica*. 444(1). 75-82.
- Petrova, N. (1999). Thermal Decomposition products of hydrotalcite-like compounds: low-temperature metaphases. *Journal of materials Science*. 34(1). 4153-4161.

- Prado, B., Mora, L., Millán, L. & Sampieri, A.(2011). Síntesis de captadores y liberadores de fertilizantes a partir de nanomateriales arcillosos. *Mundo Nano*, 4(1). 74-84
- Rawls, W., Gish, T. & Brakensiek, D. (1991). *Estimating Soil Water Retention from Soil Physical Properties and Characteristics*. New York: Springer-Verlag
- Redolfi, E. (2007). *Suelos Colapsables*. Argentina:Universidad Nacional de Cordoba.
- Rose, R., Haase, D. L., & Arellano, E. (2004). "Fertilizantes de entrega controlada: potencial para mejorar la productividad de la reforestación". *BOSQUE*, 25(2), 89-100.
- Rey, C. & Ramil, D.(2007). *Introducción a la Estadística Descriptiva*. España: Netlibro.
- Rey, F. & Fornés, V.(1992). Thermal Decomposition of Hydrotalcites. *J. Chem. Soc. Faraday Trans.* 88(15). 2233-2238.
- Rose, R. (2002). *Slow Release Fertilizers 101*. Recuperado el 8 de mayo de 2016, del departamento de ciencia forestal de la universidad estatal de Oregon: <http://www.fcnanet.org/proceedings/2001/rose.pdf>
- Rose, R., Haase, D. & Arellano, E. (2004). Fertilizantes de entrega controlada: potencial para mejorar la productividad de la reforestación. *Bosque*. 25(2). 89-100.
- Salazar, T. & Navarro, J. (2014). *Operaciones auxiliares de abonado y aplicación de tratamientos en cultivos agrícolas*. Malaga, España: IC Editoreal.
- Sánchez, A. & Gándara, J. (2011). *Conceptos básicos de gestión ambiental y desarrollo sustentable*. Instituto Nacional de Ecología
- s.n. (1999). Funciones del fósforo en las plantas. *Bettercrops* 83(1), 6-7.
- Tan, H. (2009). *Environmental soil science* (3rd ed). Georgia. CRC:Press
- Theiss, F. (2012). *Synthesis and Characterisation of Layered Double Hydroxides and their Application for Water Purification*. (Tesis de maestría). Queensland University of Technology. Brisbane Queensland.

- Towhid, K. (2013). *Forest Soils: Properties and management*. Chittagong:Springer International.
- UNAD [Universidad Nacional Abierta y A Distancia]. (2013). *Nutrición Vegetal*. Bogotá:Escuela de Ciencias Agrícolas, Pecuarias y del Medio Ambiente.
- Ureña-Amate, M., Boutarbouch, N., Socias-Viciano, M. & Gonzáles, E. (2011). Controlled release of nitrate from hydrotalcite modified formulations. *Applied Clay Science*, 52(1), 368-373.
- Wu, L. & Liu, M. (2007). Slow-release potassium silicate fertilizer with the function of superabsorbent and water retention. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 46(20), 64-94.
- Wu, L., Liu, M. & Liang, R. (2008). Preparation and properties of a double-coated slow-release NPK compound fertilizer with superabsorbent and water-retention. *Bioresource Technology*. 99(1). 547-554.
- Zhang, D., Zhou, C., Lin, C., Tong, D. & Yu, W. (2010). "Synthesis of clay minerals". *Applied Clay Science*, 50(1), 1.

XIV. Anexos

Anexo # 1: Preparación de Reactivos

1. Solución de molibdato de amonio

Procedimiento: Coloque 400 mL de agua destilada en un balón aforado de 500 mL. Disuelva 20 gramos de molibdato de amonio tetrahidratado y luego afore con agua destilada.

2. Solución de tartrato de antimonio y potasio

Procedimiento: Coloque 400 mL de agua destilada en un balón aforado de 500 mL. Disuelva 1.3715 gramos de molibdato de amonio tetrahidratado y luego afore con agua destilada.

3. Ácido Sulfúrico 5N

Procedimiento: Diluya 70 mL de ácido sulfúrico concentrado (98%) en 500 mL con agua destilada.

4. Solución de ácido ascórbico 0.1 M

Procedimiento: Disuelva 1.76 gramos de ácido ascórbico en un balón de 100 mL con 80 mL de agua destilada y afore con agua destilada.

Almacenamiento: Esta solución debe prepararse el mismo día del análisis y dura un máximo de 24 horas.

5. Solución estándar de fosfato (KH₂PO₄)

Procedimiento: Disuelva 219.5 mg de fosfato monobásico anhidro en un balón aforado de 1L con 850 mL de agua destilada y luego aforar. Concentración esperada: 1 mL= 50 microgramos de fosfato.

Almacenamiento: Mantener a 4°C por un máximo de 6 meses.

6. Nitrato de Magnesio (preparación para 100 mL)

Procedimiento: Coloque 50 mL de agua destilada en un balón aforado de 500 mL. Agregue lentamente 297 gramos de nitrato de magnesio lentamente hasta disolver. Luego, aforar con agua destilada.

Almacenamiento: Mantener a 4°C por un máximo de 6 meses, en recipiente de polietileno de alta densidad.

7. Nitrato de Aluminio

Procedimiento: Coloque 50 mL de agua destilada en un balón aforado de 250 mL. Agregue lentamente 213 gramos de nitrato de aluminio lentamente hasta disolver. Luego, aforar con agua destilada.

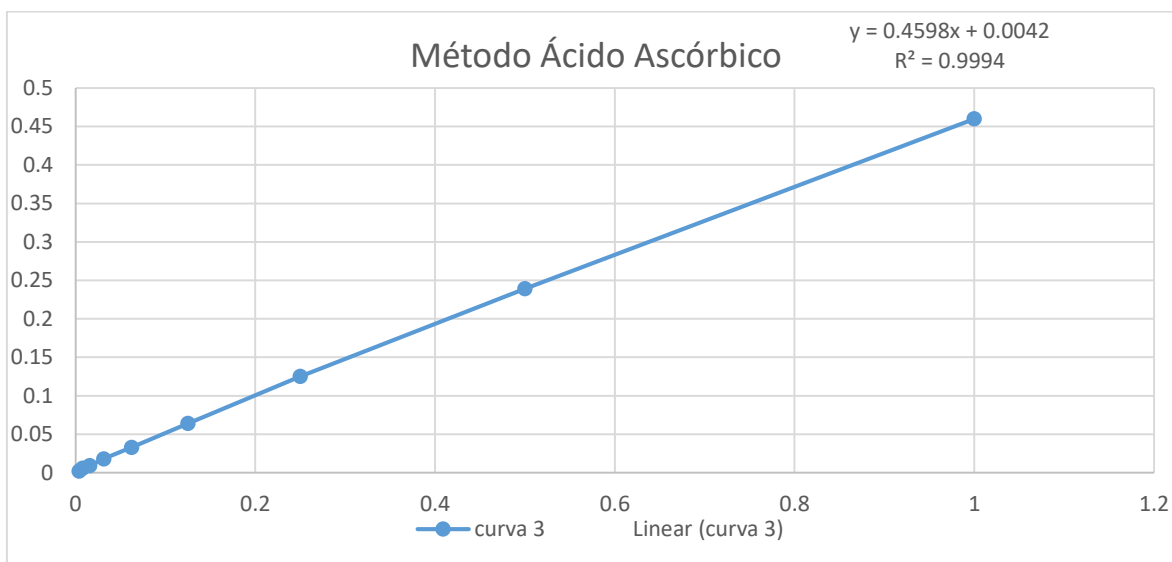
Almacenamiento: Mantener a 4°C por un máximo de 6 meses, en recipiente de polietileno de alta densidad.

8. Hidróxido de Amonio

Procedimiento: Coloque 200 mL de agua destilada en un balón aforado de 250 mL. Agregue lentamente 4 mL de solución amoniacal al 35%. Luego, aforar con agua destilada.

Almacenamiento: Esta solución debe prepararse el mismo día del análisis y almacenar a 4 °C durante un máximo de 15 días, en recipiente de polietileno de alta densidad.

Anexo # 2: Curva de Calibración para método de ácido ascórbico.



Fuente: Datos experimentales obtenidos en laboratorio de Bioquímica, Edificio T12, Facultad Ciencias Químicas y Farmacia.

Tabla # 13: Datos de la curva de calibración.

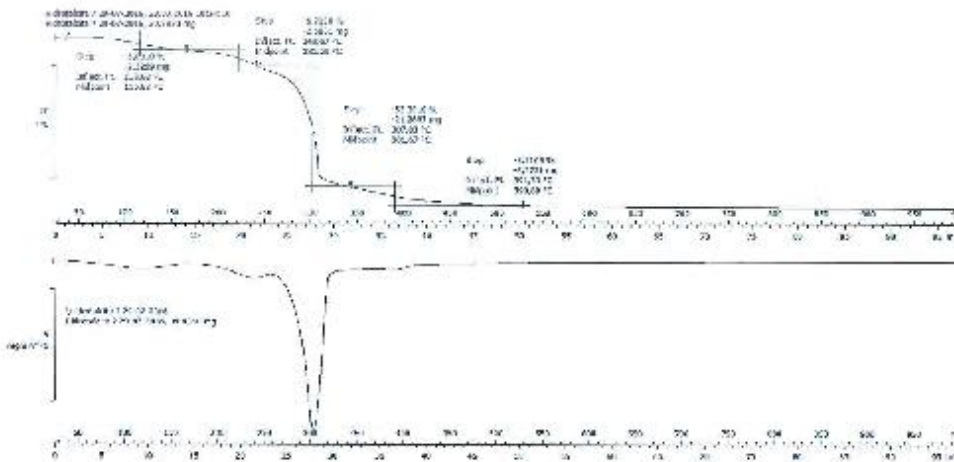
Curva de calibración método ácido ascórbico	
Puntos	Concentración
1	0.00390625
2	0.0078125
3	0.015625
4	0.03125
5	0.0625
6	0.125
7	0.25
8	0.5
9	1
R ²	0.9994
Ecuación	Y = 0.4598X + 0.0042

Fuente: Datos experimentales obtenidos en laboratorio de Bioquímica, Edificio T12, Facultad Ciencias Químicas y Farmacia.

Anexo # 3: Curva de descomposición térmica de HDL-P por TGA.


		CEMENTOS PROGRESO S.A. CENTRO TECNOLÓGICO 15 Av. 49-01, zona C.La Pedrera Telf: 2266100 Fax: 2266101 correo@progreso.com		OT	28438
				FECHA	20/10/15
				PAGINA	1 DE 1
				ÁREA DE LAB.	QC
Cliente	CENTRO DE INVESTIGACIONES	Proyecto	JSCC		
Dirección	15 AV. 49-01 ZONA C.LA PEDRERA	Producto	HDL-P ₃₀		
Analista	LUIS VENTURA TORO GONZALEZ	Analisis	SILICIOS COMPUESTO		
Material	250-100	Tiempo de Ensayo	2500005		

INFORME DE ENSAYO LABORATORIO QUÍMICO ANÁLISIS TERMOGRAVIMÉTRICO



Paso	Temperatura experimental (°C)	Masa perdida (%)
1	118.83	5.83
2	240.67	6.72
3	307.83	53.3
4	391.33	8.21

Observación: La identificación del fenómeno de descomposición térmica fue realizada por termogravimetría en un módulo TGA 1571100265 de Mettler Toledo, de 80°C a 450°C a una velocidad de calentamiento de 10°C/min en una atmósfera inerte de N₂ con flujo de 20 ml/min.


 Analista


 Jefe de laboratorio / Coordinador

Los resultados de ensayo se refieren al promedio de los muestreos presentados. No debe considerarse como un valor absoluto, sino como una guía de referencia.

004-001-0010-15/Rev. B

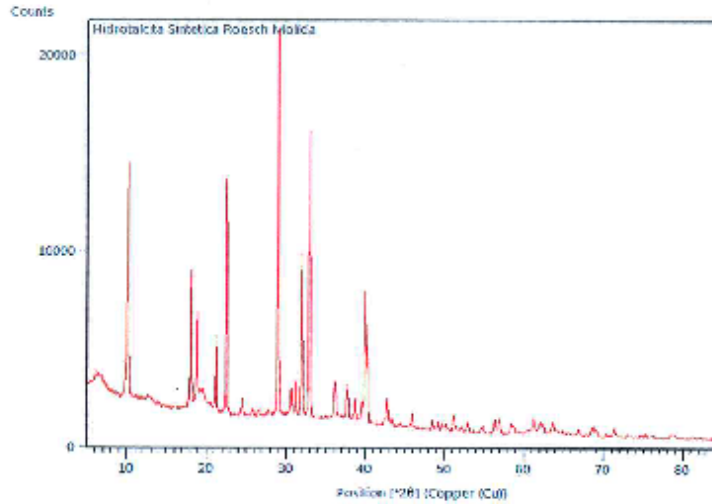
Fuente: Datos experimentales obtenidos en laboratorio CETEC de cementos progreso.

Anexo # 4: Difractograma de HDL-P por DFRX.

	CEMENTOS PROGRESO S. A. CENTRO TECNOLÓGICO 15 Ave. 1240, zona 6 La Pradera C.R. 2488172 Fax: 24821811 correo@cementos.com		OT: 20458
			FECHA: 20/07/20
			PÁGINA: 1 DE 1
			AREA DE LAB.: QC
Departamento:	DEPT. DE INVESTIGACIONES	Procedencia:	USPC
Origen:	15 Ave. 1240, zona 6 La Pradera	Estado:	HDL-P ₂
Concepto:	LÍNEA DE INVESTIGACIONES	Analista:	ESTHER GARCÍA
Proyecto:	2020-110	Fecha de Envío:	20/07/20

INFORME DE ENSAYO LABORATORIO QUÍMICO

DIFRACCIÓN DE RAYOS X



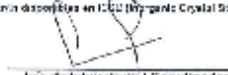
La identificación de las fases minerales de realidad mediante la técnica analítica Difracción de rayos X con afinamiento. El equipo Línea de rayos X Analytical, la identificación de las fases cristalinas presentes en las muestras de hidratación mediante un método de refinamiento del espacio comprendido entre los ángulos de 5° 2θ 90°, con una resolución de 0.1 minutos por barrido.

Observación: Los datos experimentales cuantificados mediante la técnica analítica Difracción de Rayos X con afinamiento se encuentran disponibles en CDU (Departamento Crystal Structure Database).

ANALISTA:




AUTORIZADO POR:


 Jefe de Laboratorio / Coordinador

Una vez más le informo de nuestro compromiso permanente, de brindar servicios de alta calidad, tal como se refleja en nuestra página web: www.cementos.com

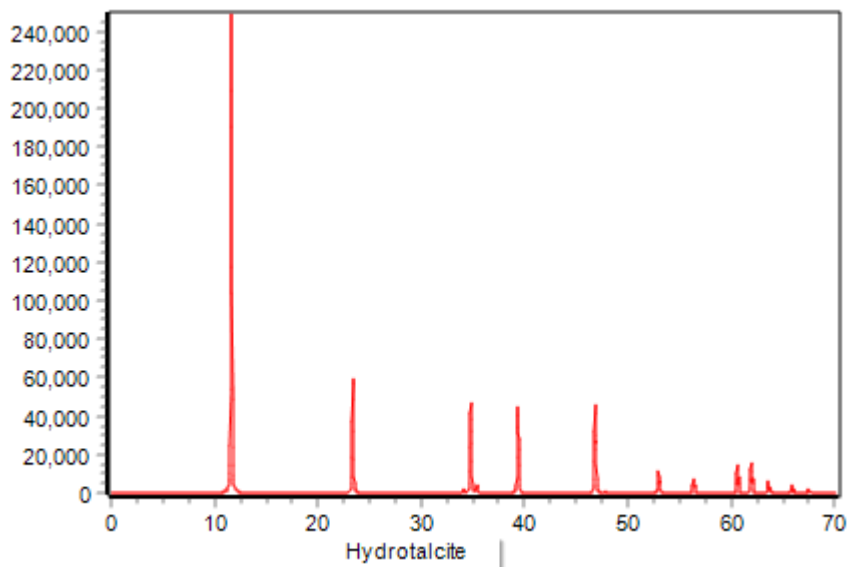
Fuente: Datos experimentales obtenidos en laboratorio CETEC de cementos progreso.

Anexo # 5: Análisis elemental de HDL-P por FRX.

		CFMANTOS PROGRESO S.A. CENTRO TECNOLÓGICO 15 Av. 1801, zona 5 La Pedrera Tels: 22884178 Fax: 22884181 laboratorioCETEC@cmprosa.com		OT	28239									
Cliente: CENTRO DE I + D + D / CETEC		Presentación:		FECHA	2016-07-29									
Dirección / Teléfono: 75 Av. 18-01, zona 5, P.O. Box 12345 / 2282-5100		Muestra:		PÁGINA	1 DE 1									
Comanda: 105 VELASQUEZ / DICCIO / COLSOI		Análisis:		ÁREA DE LAB.	QC									
Proyecto: LABORATORIO DE HIDRÁULICA POSGRADUADA		Fecha de Emisión:												
INFORME DE ENSAYO														
ANÁLISIS QUÍMICO MEDIANTE FLUORESCENCIA DE RAYOS X														
* COMPOSICIÓN QUÍMICA (%)														
Número	Al2O3	CaO	CO2O3	Fe2O3	K2O	MgO	MnO	Na2O	P2O5	SO3	SiO2	TiO2	LOI (según %)	Total
1	51.74	0.05	0.02	0.01	0.00	8.96	0.00	0.13	7.04	0.00	0.00	0.00	76.95	98.91

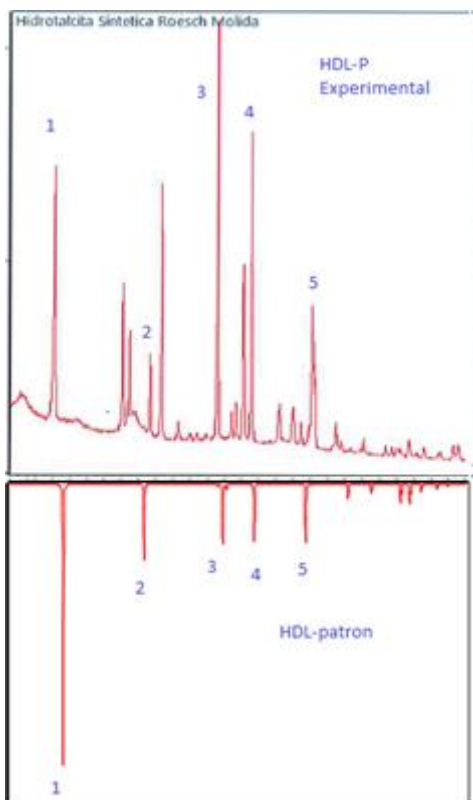
Fuente: Datos experimentales obtenidos en laboratorio CETEC de cementos progreso.

Anexo # 6: Difractograma patrón de una HDL tradicional.



Fuente: Datos experimentales obtenidos en laboratorio CETEC de cementos progreso.

Anexo #7: Contraste de HDL-P con HDL patrón.



Fuente: Imágenes experimentales obtenidos en laboratorio No 1, Edificio T10, Facultad Ciencias Químicas y Farmacia.

Anexo # 8: Síntesis de la HDL-P.



Fuente: Imágenes experimentales obtenidos en laboratorio No 1, Edificio T10, Facultad Ciencias Químicas y Farmacia.

Anexo # 9: Preparación de suelos artificiales y análisis de Bouyoucos.



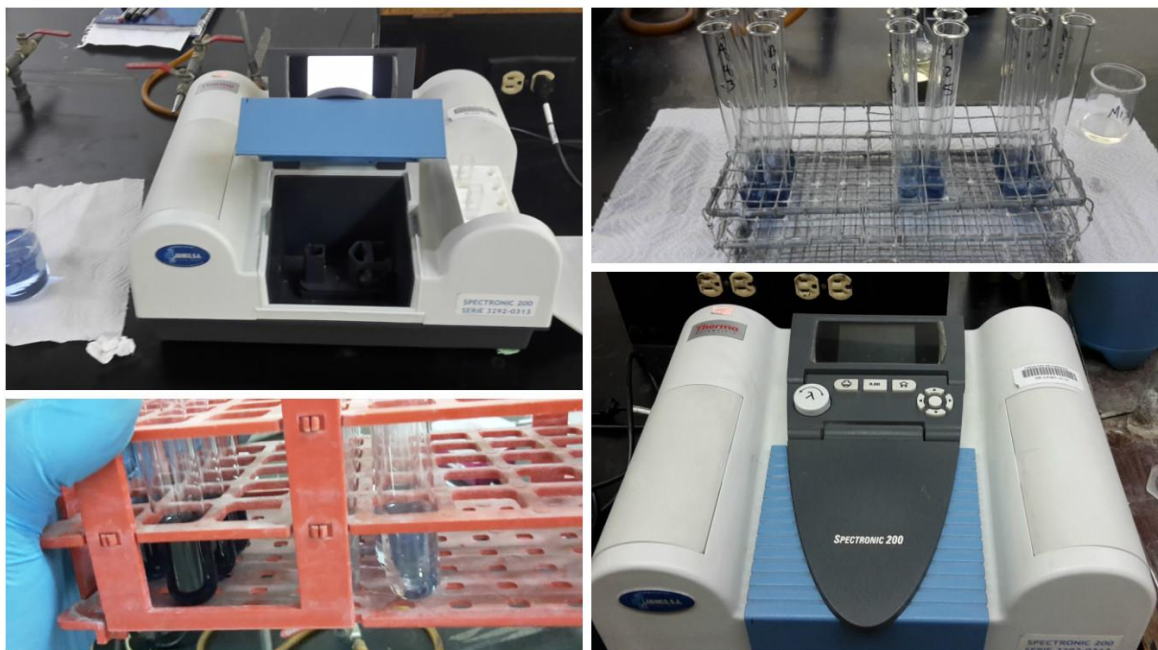
Fuente: Imágenes experimentales obtenidos en laboratorio No 1, Edificio T10, Facultad Ciencias Químicas y Farmacia.

Anexo # 10: Implementación de sistema de macetas y fase de riegos con extracción de lixiviados.



Fuente: Imágenes experimentales obtenidos en laboratorio No 1, Edificio T10, Facultad Ciencias Químicas y Farmacia.

Anexo # 11: Análisis de fosfatos en lixiviado por método de ácido ascórbico



Fuente: Imágenes experimentales obtenidos en laboratorio de Bioquímica, Edificio T12, Facultad Ciencias Químicas y Farmacia.

Anexo # 12: Equipo de análisis instrumental en CETEC Cementos Progreso.



Fuente: Imágenes experimentales obtenidos en laboratorio CETEC de cementos progreso.



Diego Rodolfo Roesch Martinez
Autor de Tesis



Licenciado Oswaldo Efraim Martinez Rojas
Asesor



Licda. M.A. Irma Nohemí Orozco
Directora de escuela



Dr. Rubén Dariel Velásquez Miranda
Decano