

Estudio físico-químico para la formulación de un fertilizante líquido de composición completa

Physical-chemical study for the formulation of a full composition liquid fertilizer

Esteban Pérez López¹
Diego Rodríguez Barrantes²

Recibido: 20-6-2017 Aprobado: 18-10-2017

Resumen

El estudio para la formulación de un fertilizante líquido de composición completa (N-P₂O₅-K₂O) se llevó a cabo en un laboratorio químico de venta de servicios en Costa Rica, mediante la investigación de materias primas utilizadas como fuente de nitrógeno, fósforo, potasio, magnesio, calcio, azufre y otros; su solubilidad (en agua, citrato de amonio y ácido nítrico), la compatibilidad entre sustancias y los requerimientos nutricionales de las plantas y cultivos a las que se destinará (piña, banano, naranja, arroz, melón y otros cultivos tropicales). La investigación surge como proyecto en la carrera de Bachillerato en Laboratorista Químico de la Universidad de Costa Rica, de agosto a diciembre 2016. Se logró formular el fertilizante con composición completa (N-P₂O₅-K₂O-S-Cu-Zn), pH 6.8, densidad 1.2096 g/mL, libre de metales pesados, y adecuado para la aplicación en los cultivos indicados.

Palabras Clave: fertilizante líquido, formulación, agroquímicos, requerimientos nutricionales en plantas.

Abstract

The study for the formulation of a liquid fertilizer of complete composition (N-P₂O₅-K₂O) was carried out in a chemical laboratory of sale of services in Costa Rica, through the investigation of raw materials used as source of nitrogen, phosphorus, potassium, Magnesium, calcium, sulfur and others; Its solubility (in water, ammonium citrate and nitric acid), compatibility between substances; and the nutritional requirements of the plants and crops to be used (pineapple, banana, orange, rice, melon and other tropical crops). The research emerges as a project in Bach's career in the laboratory of the University of Costa Rica, from August to December 2016. It was possible to formulate the fertilizer with complete composition (N-P₂O₅-K₂O-S-Cu-Zn), pH 6.8, density 1.2096 g/mL, metals free, and suitable for application in the indicated crops.

Keywords: liquid fertilizer, formulation, agrochemicals, nutritional requirements in plants.

I. Introducción

La industria agroquímica es la parte de la química aplicable a la agricultura, cuyo objetivo principal es establecer las condiciones óptimas de nutrición en las plantas, para aumentar permanentemente la productividad de los cultivos agrícolas (Primo, 1995).

Lo anterior denota la importancia de la industria agroquímica (específicamente los fertilizantes) para el sector agrícola, que muestran cómo una nutrición constante y eficaz en las plantas y suelos genera una mejor tasa de producción. El uso de fertilizantes se ha vuelto indispensable para

¹ Magister en Sistemas Modernos de Manufactura y Bach. en Laboratorista Químico. Profesor UCR-Recinto Grecia. Correo electrónico: esteban.perezlopez@ucr.ac.cr

² Egresado de Bachillerato en Laboratorista Químico, Universidad de Costa Rica. Correo electrónico: diego.rodriguezbarantes@ucr.ac.cr

lograr una agricultura sostenible, debido a que los suelos mantienen un rendimiento cada vez más bajo a causa del empobrecimiento paulatino por la extracción de los nutrimentos en las cosechas (SAGARPA, s.f.).

La elaboración de un buen programa de fertilización debe ajustarse a las necesidades del cultivo que se estará trabajando, para ello se debe dar una selección adecuada de los fertilizantes, dosificarlos según las extracciones reales del cultivo conociendo los rendimientos medios de varios años y los contenidos de nutrientes en el suelo, asimismo, elegir bien las épocas de aplicación en cada caso (Cadaña, 2008). En cuanto a los tipos de fertilizantes, existen tanto sólidos como líquidos, siendo estos últimos los que presentan una mayor demanda debido a las ventajas que presentan sobre el cultivo en cuanto a disponibilidad y mayor cobertura Asociación Internacional de la industria de los fertilizantes, 2002

La utilización de los fertilizantes líquidos se remonta a tiempos ancestrales. Así, en Grecia se transportaban residuos orgánicos urbanos que se destinaban a huertas y naranjos, lo cual constituía una forma temprana de uso de fertilizantes líquidos o fluidos. Posteriormente, el gran desarrollo de la industria y adopción de fuentes líquidas tuvo lugar principalmente en Estados Unidos y en menor medida, en algunos países europeos, asiáticos y Australia. Durante finales del siglo XVIII los agricultores utilizaban reservorios para recolectar estiércol líquido y residuos orgánicos provenientes de corrales, que se aplicaban en los campos. Recién a comienzos del 1800 comenzaron a realizarse experimentos con soluciones utilizando sales solubles y en 1923 se instala en California la primera planta de fertilizantes fluidos comercialmente exitosa, basada en la disolución de sales solubles en agua (Dowdle, 2000). Posteriormente, tuvo lugar cierta adopción del uso de formulaciones líquidas basadas en la disolución de sales solubles en agua, aplicados con diferentes sistemas como hidroponía o fertirriego. Varias revisiones describen los hitos

más relevantes en el desarrollo de la tecnología de fertilización y uso de fertilizantes líquidos (Palgrave, 1991).

Los hitos que se destacan en la primera mitad del siglo XX son la adopción generalizada de soluciones nitrogenadas, en particular las formuladas a partir de urea y nitrato de amonio (UAN), como así también el uso de soluciones presurizadas de amoníaco. Entre los fosfatos fluidos, el desarrollo de un reactor tubular simple desarrollado por técnicos del TVA (Tennessee Valley Authority) en 1972 permitió la amoniación del ácido superfosfórico y la consiguiente elaboración de polifosfatos de amonio (APP) a bajo costo, lo cual facilitó su rápida expansión (Nelson, 1990).

Una vez superada la etapa inicial del desarrollo de los fertilizantes líquidos, comenzó un significativo crecimiento en la adopción de este tipo de fuentes, debido a diferentes causas:

- Desarrollo del ácido superfosfórico y de soluciones de APP.
- Producción de suspensiones.
- Desarrollo de equipos de aplicación.

La producción del ácido superfosfórico, permitió concentrar el ácido fosfórico hasta alcanzar contenidos de P_2O_5 de 68-70% el cual contiene alrededor de 20-35% de polifosfatos. Esta innovación fue el pilar para el posterior desarrollo de los APP en sus diferentes grados equivalentes (11-34-0, 10-34-0, 11-37-0). Dichas soluciones representaron un gran progreso debido a las interesantes propiedades de este tipo de fuentes, como su capacidad de secuestro de cationes, estabilidad en almacenamiento, reducción de problemas de taponamiento de emisores en sistemas de riego, entre otros. Los citados avances previamente determinaron un rápido crecimiento de los fertilizantes líquidos que tuvo su mayor tasa de crecimiento durante el período 1965-1985. La participación del mercado de fertilizantes líquidos aumentó significativamente hasta comienzo de los años 80. Posteriormente se

estabilizó en una participación de mercado del 40% sobre el total de consumo de fertilizantes, convirtiéndose actualmente un mercado maduro (Fertilizar Manual, 1998).

Resulta de suma importancia conocer la composición química de los fertilizantes para que actúen de la manera más positiva sobre un cultivo y los suelos, con ello se reduce al mínimo repercusiones negativas, por ello, los análisis de los fertilizantes se realizan para conocer sus propiedades, las cuales deben de regirse por el reglamento técnico centroamericano de fertilizantes y enmiendas de uso agrícola (Ministerio de Economía, Industria y Comercio, s.f) que establece los requisitos para otorgar el registro de dicho producto.

Como menciona (Fink, 2002) en su libro, existen distintos tipos de fertilizantes los cuales presentan una gran variedad de funciones, además, se pueden definir como sustancias que contienen nutrientes en forma compatible y de fácil asimilación para las raíces de las plantas, lo cual ayudará a incrementar el contenido de nutrientes en los suelos para una mejor producción de cultivos. La planta, como todo ser vivo, requiere de ciertos elementos químicos para crecer y producir, por ende, se deben de suministrar de tal forma que las plantas puedan absorber estos, por ejemplo, el nitrógeno, que puede administrarse en forma de urea, amonio o compuestos de amoniaco, nitratos, etc.

La adecuada nutrición mineral de un cultivo está influenciada por el conocimiento de lo que requiere la planta y por la cantidad e intensidad de nutrimentos del suelo en donde se tiene el cultivo. Cuando el suelo no puede suplir adecuadamente los nutrimentos para un normal desarrollo de las plantas, se hace necesaria su adición en las cantidades y formas apropiadas (Centro de investigaciones agronómicas, 2002). De lo anterior se puede observar la importancia de medir y cuantificar la composición de los fertilizantes, ya que esto ayuda a mantener un control sobre el equilibrio entre los componentes presentes en el suelo y los elementos que se deban añadir de forma artificial.

Los fertilizantes presentan una composición de acuerdo con la necesidad de nutrientes en el suelo, como ya se mencionó anteriormente, pero para comprender de mejor manera este apartado se requiere de una explicación más detallada acerca de los elementos que constituyen un fertilizante líquido. Por lo anterior es necesario mencionar que las plantas requieren elementos químicos esenciales para el crecimiento, los cuales son llamados macronutrientes y son la principal fuente en los fertilizantes. Estos macronutrientes se subdividen en elementos primarios nitrógeno, fósforo y potasio (N, P y K), y secundarios calcio, magnesio y azufre (Ca, Mg y S), esto debido, principalmente, a la importancia que presentan en el suelo para las plantas. Además, también existen requerimientos de otros elementos, pero en cantidades sumamente pequeñas, puesto que una alta concentración de ellos puede ser perjudicial para las plantas y a estos elementos se les conoce como micronutrientes hierro, manganeso, boro, zinc, cobre, molibdeno y cloro (Fe, Mn, B, Zn, Cu, Mo, Cl), y aun cuando sus concentraciones son muy pequeñas son de suma importancia para las plantas debido a la influencia que tienen con la producción (Asociación Internacional de la industria de los fertilizantes, 2002).

La composición de los fertilizantes se pueden clasificar según su fuente en (orgánico, órgano-mineral, inorgánico), condición física (líquidos, suspensión, sólidos), nutriente (nitrogenado, fosfatado o potásico) o mezcla (simple, mixto, completo), lo que muestra que existe una gran variedad de fertilizantes posibles en la industria y que van a depender principalmente de las necesidades básicas en los suelos (Engelstad, 1985). Un fertilizante nitrogenado es aquel al que solo se le agrega el macronutriente primario de nitrógeno, además, puede contener macronutrientes secundarios y micronutrientes; de igual manera un fertilizante fosfatado solo presenta un macronutriente primario de Fósforo y un fertilizante potásico solo presenta el macronutriente primario de Potasio (Chamba, 1988). En cuanto a la clasificación por mezclas

esta depende de la cantidad de macronutrientes primarios del fertilizante, es decir, un fertilizante simple es aquel que solo presente un macronutriente primario, uno mixto está compuesto por dos macronutrientes primarios y uno completo presenta los tres macronutrientes primarios (Dominguez, 1978).

Una manera de cubrir esta necesidad de los suelos es la aplicación de fertilizantes líquidos, la cual a su vez, ofrece algunas ventajas sobre los sólidos. Una de ellas es que el manejo es totalmente mecánico en el caso de los líquidos, lo que puede agilizar las tareas. Además, consiguen un gran rendimiento y una gran uniformidad sobre el terreno (Bravo, 2009). Seguidamente, se debe de tomar en cuenta una característica sumamente importante cuando se hacen mezclas, la cual es denominada compatibilidad, debido a que no todos los fertilizantes se pueden mezclar, ya que algunos reaccionan entre sí y producen compuestos de malas características físicas. Como por ejemplo la urea no se puede mezclar con nitrato de amonio o superfosfato triple, tampoco fosfato diamónico con superfosfato simple y así muchos otros compuestos más (Casanova, Barbazan, & Barreto, 2015).

En la figura 1, se muestra un ejemplo de la incompatibilidad presente entre los fertilizantes y las diferentes materias primas que se utilizan para su producción. Aspecto que genera un alto grado de dificultad en la combinación de materias primas necesarias para los diferentes fertilizantes y que debe ser tomado en cuenta a la hora de realizar un fertilizante líquido, así como su solubilidad, puesto que no todas las materias primas empleadas se disuelven con facilidad. En general se debe de tomar en cuenta como disolventes, el agua, el citrato de amonio y los medios ácidos (para este caso el ácido nítrico), los cuales son los más empleados en la actualidad para la producción de fertilizantes. En el caso del , ha sido conocida como el disolvente universal, pero para efectos de fertilizantes presenta dificultades para disolver algunos compuestos provenientes principalmente de rocas calizas (fuente de calcio), por lo cual debe aplicarse medios ácidos como la solución de ácido nítrico para lograr una disolución completa de la fuente, además existe el caso de los fertilizantes fosfatados, los cuales generan mejores resultados cuando su disolvente es el citrato de amonio, el cual presenta un pH similar al agua, pero aumenta la solubilidad de fuentes de fósforo (Fesa-Enfersa, 1991).

Un punto de suma importancia que se debe considerar cuando se realizan mezclas nutritivas es la poca solubilidad de los micronutrientes catiónicos cuando son agregados como sales inorgánicas comunes, que además en estos medios reaccionan con iones hidroxilo hasta formar un precipitado de óxido metálico hidratado insoluble, por lo tanto para utilizar estos micronutrientes en la mezclas de fertilizantes líquidos se deben agregar agentes quelantes, los cuales ceden electrones al catión para formar una molécula soluble y así evitar los precipitados (Asociacion Internacional de la industrial de los fertilizantes, 2002).

Nitrato de Amonio																			
E	Nitrato de Calcio																		
I	I	Amoniaco Anhidro																	
E	I	L	Sulfato de Magnesio																
I	E	L	E	Urea															
C	I	L	E	E	Sulfato de Amonio														
C	I	I	E	L	C	Fosfato Monoamónico													
C	I	I	E	L	C	L	Fosfato Diamónico												
C	I	I	E	L	C	C	C	Fosfato Monopotásico											
C	L	I	E	L	C	C	C	C	Nitrato de Potasio										
C	I	I	E	L	C	C	C	C	C	Sulfato de Potasio									
E	L	I	E	L	L	L	L	L	L	(NO ₃) ₂ Mg Nitrato Magnésico									
C= Mezcla 100% compatible en seco y en estanque I= Mezcla Incompatible en seco y en estanque. No realizar E = Mezcla compatible solo en estanque al momento de inyectar L = Mezcla de compatibilidad limitada en seco y en agua. Uso limitado																			

Figura 1. Incompatibilidad entre fertilizantes. Fuente Sociedad Química y Minera de Chile (SQM) (Dominguez, 1978).

II. Metodología

La investigación fue de índole científico experimental, efectuada entre agosto y diciembre del 2016, para lo cual se indagó en las bases de datos de la Universidad de Costa Rica como SIDALAC, ISHS, EBSCOhost-greenfile, en libros electrónicos de E-libro y Ebrary, en revistas electrónicas de Nature y Science. De igual manera se buscó información relacionada con fertilizantes para cubrir conceptos básicos en páginas de internet provenientes de fuentes confiables como FAO y Escuela de Agronomía, entre otras. También se contó con la colaboración de estudiantes de agronomía de la UCR para conocer características específicas de los fertilizantes, el Ministerio de Agricultura y Ganadería (MAG) para realizar consultas pertinentes y por último el apoyo de un agricultor de la zona cafetalera en Grecia para conocer lo que se busca en un fertilizante y cuáles son las limitaciones que estos presentan, el cual permanecerá con identidad anónima para dicha investigación.

Experimentación: Se realizaron mezclas de distintos elementos utilizados como materia prima para la producción de fertilizantes, esto mediante relaciones estequiométricas, soluciones saturadas e implementación de quelatos y así comprobar compatibilidades y solubilidades de los compuestos.

Las materias primas utilizadas como fuente de nitrógeno fueron: urea, sulfato de amonio, nitrato de amonio, nitrato de calcio, nitrato de Potasio. Como fuente de fósforo: fosforita blanda, hyperfos más fosforita, superfosfato común, fosfato monoamónico, fosfato diamónico, ácido fosfórico. Fuentes de potasio: cloruro de potasio, sulfato de potasio, nitrato de potasio, fosfato de potasio, hidróxido de potasio. Fuentes de magnesio: kieserita, kainita, langbeinita, cloruro de magnesio, nitrato de magnesio, sulfato de magnesio. Fuentes de calcio: carbonato de calcio, superfosfato triple. Fuentes de azufre: sulfato de amonio, sulfato de magnesio, superfosfato común, langbeinita, yeso, sulfato

de zinc heptahidratado. Se realizaron, además, disoluciones saturadas de las materias primas descritas para comprobar su solubilidad teórica y se dejaron reposar durante un día para comprobar que no se cristalizarían. Seguidamente fueron utilizadas para comprobar compatibilidades de las seis fuentes de macronutrientes mencionadas y se realizaron aproximadamente 20 comprobaciones de diferentes combinaciones. Por último, se le añadieron micronutrientes a las distintas combinaciones para conocer cuáles precipitan al disolverse en medios nutritivos, en este sentido, es importante destacar que de suceder alguna precipitación se aplicarán los agentes quelantes (EDTA, ácido cítrico y monoetanolamina).

Análisis de contenido: como una fase final, se le realizaron las pruebas de químico completo (N, P, K, Fe, S, Mn, Mg, Ca y Na) por métodos oficiales o validados por el laboratorio, mediante ICP y analizador de nitrógeno; también metales pesados (cadmio (Cd), plomo (Pb), mercurio (Hg), arsénico (As), níquel (Ni), selenio (Se), cobalto (Co) y cromo (Cr)) por metodologías en absorción atómica, horno de grafito o generador de hidruros, los cuales se le aplican comúnmente a los fertilizantes para comprobar si su composición está acorde con las formulaciones establecidas en la primera etapa y además, se mide la densidad y el pH. Para la medición de nitrógeno por el método de Dumas se pesó una muestra de 50 mg en papel estaño y llevó al analizador de nitrógeno, el cual está referido a una muestra control que se lee cada 10 muestras. Para las pruebas de químico completo se agregó 1,0000 g de muestra en un balón de 500 mL, se digirió con 10 mL de HCl a 400°C durante 10 min y se aforó con agua destilada, seguidamente se realizaron las disoluciones dependiendo de la concentración teórica del producto para que se mantuviera dentro del rango establecido.

Por otra parte, para las pruebas de metales pesados por absorción atómica se buscó que las concentraciones de los elementos quedaran dentro del rango de la curva, se agregó HCl y se llevó a

200°C durante 10 min, seguidamente se aforó con agua destilada. Para níquel y cadmio el rango de la curva es de 1 a 2 ppm, para plomo de 2 a 10 ppm, cromo de 2 a 5 ppm, mercurio de 20 a 50 ppb y para el arsénico, selenio y cobalto estas se realizan por la técnica de horno de grafito, para lo cual el rango va de 1 a 2 ppm. Asimismo, para la medición de la densidad se depositaron 10,00 mL del fertilizante en un beaker pre-pesado y mediante la masa obtenida se determinó la densidad. Para el pH se introdujo directamente en electrodo en el fertilizante y se anotó la medición. Por lo planteado como objetivo fundamental en esta investigación, de lograr la formulación de un fertilizante líquido de composición completa, el análisis de datos requerido fue muy cualitativo, y no demandó el uso de herramientas estadísticas para determinar la idoneidad de los resultados.

El estudio desarrollado en el laboratorio innovó en el ámbito de fertilización líquida completa para ciertos cultivos agrícolas en su finalidad de ofrecer una mayor variedad y una mejor composición química que supla las diferentes necesidades en los suelos de producción agrícola, por ello se realizaron pruebas físicas de solubilidad para las materias primas que se utilizan comúnmente en la industria y se continúa con pruebas físicas para comprobar la compatibilidad entre ellas y así determinar los componentes que presenten mejores características para el uso como fertilizante.

Es muy común el uso de fertilizantes que dispongan de una composición nutricional completa para el tipo de cultivo, es decir, en la agricultura lo que se busca es emplear todos los nutrientes necesarios para la planta en una sola aplicación de nutrientes, a fin de ahorrar tiempo y dinero por los costos que demanda cada aplicación y obtener resultados de producción iguales e inclusive mejores que los obtenidos con otro tipo de fertilizante debido a la gran disponibilidad de nutrientes que presenta un fertilizante líquido de mezcla completa (N-P₂O₅-K₂O). Si bien en el mercado ya existe este tipo de mezclas completas en estado líquido, se

buscó innovar con mezclas que presenten un mayor porcentaje de cada nutriente primario, y además implementar micronutrientes necesarios para las plantas con la utilización de agentes quelantes para evitar su precipitación y mantener una composición homogénea y estable, capaz de solubilizarse para su aplicación final sobre el cultivo.

III. Análisis de resultados

Según la investigación realizada, se emplearon las fuentes comúnmente utilizadas para la formulación de un fertilizante líquido, de los cuales se procedió a verificar su solubilidad teórica, tomada en cada uno de los casos de su respectiva hoja de seguridad y se obtuvieron los resultados aquí detallados.

Macronutrientes Primarios:

En el cuadro 1, se observan las distintas solubilidades teóricas de las fuentes de nitrógeno comparadas con la solubilidad obtenida experimentalmente, y se evidencia cómo para la urea, el sulfato de amonio y nitrato de potasio, el dato obtenido es muy similar al teórico, además, como se muestra en la columna de observaciones, se logró una disolución positiva para los fines del estudio realizado, mientras que para nitrato de calcio y el nitrato de amonio, la solubilidad experimental se mantuvo muy por debajo del dato teórico, lo cual generó una disolución desfavorable para ser utilizada en fertilizantes líquidos que utilicen como disolvente el agua. Cabe mencionar que el nitrógeno es importante para las plantas, principalmente, porque es el encargado de formar parte de las proteínas vegetales, lo cual refleja la importancia de aportar el contenido suficiente de nitrógeno para el correcto crecimiento de las plantas (Raven, Evert, & Eichhorn, 1992).

Cuadro 1. Fuentes comunes de nitrógeno en fertilizantes líquidos y su respectiva solubilidad teórica y experimental

Fuente	Fórmula	% N	Solubilidad teórica en agua	Solubilidad experimental en agua	Observaciones
Urea	CH ₄ N ₂ O	46	100g/100mL	100g/100mL	Fácil disolución, Endotérmica
Sulfato de amonio	(NH ₄) ₂ SO ₄	21	74,4g/100mL	75g/100mL	Se disuelve lentamente, Endotérmica
Nitrato de amonio	NH ₄ NO ₃	33	190g/100mL	20g/100mL	Forma un coloide, Endotérmica
Nitrato de calcio	Ca(NO ₃) ₂	15,5	122g/100mL	50g/100mL	Forma un coloide, Endotérmica, Endotérmica
Nitrato de Potasio	KNO ₃	13	31,6g/100mL	31,5g/100mL	Fácil disolución, Endotérmica

Estos efectos negativos que se obtuvieron en dos disoluciones disminuye el número de fuentes de nitrógeno posibles por utilizar para la formulación de nitrógeno, por lo que se pasó de cinco posibilidades a solamente tres. Es importante mencionar que de estas tres posibles fuentes de nitrógeno, se debe elegir la que mejor se ajuste en cuanto a compatibilidad y disponibilidad para la disposición final, por ende, más adelante se abarcará el tema de compatibilidad para dichas sustancias.

En cuanto a las pruebas de solubilidad efectuadas para las fuentes más comunes de fósforo (Cuadro 2), se obtuvieron resultados muy positivos para las tres disoluciones, ya que resultaron favorables para ser utilizadas en la fabricación de fertilizantes líquidos y son fáciles de disolver, además de que aportan un porcentaje de fósforo muy elevado. De igual manera, mencionar que el fósforo es necesario en la planta para que se dé correctamente el proceso de la fotosíntesis, la transferencia genética y el transporte de nutrientes, ya que con un déficit de fósforo se dará una reducción en el crecimiento de la hoja e inclusive habrá menos hojas (Navarro & Navarro, 2003).

Cuadro 2. Fuentes comunes de Fósforo en fertilizantes líquidos y su respectiva solubilidad teórica y experimental

Fuente	Fórmula	% P ₂ O ₅	Solubilidad Teórica en agua	Solubilidad experimental en agua	Observaciones
Fosfato monoamónico	NH ₄ (H ₂ PO ₄)	50-52	50-52g/100mL	60g/100mL	Fácil disolución, Endotérmica
Fosfato diamónico	NH ₂ (HPO ₄)	46	46g/100mL	52g/100mL	Fácil disolución, Endotérmica
Ácido fosfórico	H ₃ PO ₄	62	220/100mL	220g/100mL	Fácil disolución, Endotérmica

Existen más fuentes de fósforo que pueden ser utilizadas para dicha actividad, pero se emplean estos por ser los más utilizados, debido a su gran aporte de fósforo.

Por su parte, el potasio no es un componente estructural de la planta, ni tampoco de las enzimas y proteínas, pero sí funciona como regulador y aun cuando no se conoce exactamente cuál es la función

principal en la planta, se sabe que mejora procesos metabólicos y es requerido para la formación de almidón y azúcares, por lo cual las plantas son más resistentes a plagas y estrés ambiental cuando se satisface el requerimiento de potasio (Gliessman, 2002).

Se realizaron pruebas de solubilidad a cinco distintas fuentes de potasio (Cuadro 3), de las cuales el sulfato de potasio, nitrato de potasio, el hidróxido de potasio y el fosfato monopotásico generaron resultados favorables para ser utilizados

en la formulación de fertilizantes líquidos con en agua como disolvente, los cuales en su mayoría se disuelven con facilidad y además aportan un gran contenido de potasio, pero es importante mencionar que el KOH presenta una gran ventaja sobre las demás fuentes, ya que además de su alto contenido de potasio este genera una disolución altamente exotérmica, lo cual se prefiere en la realización de mezclas debido a que este aumento de temperatura ayuda a disolver componentes que tienen una baja solubilidad.

Cuadro 3. Fuentes comunes de potasio en fertilizantes líquidos y su respectiva solubilidad teórica y experimental

Fuente	Fórmula	% K ₂ O	Solubilidad Teórica	Solubilidad experimental	Observaciones
Cloruro de potasio	KCl	60	34g/100mL	10g/100mL	Forma un coloide, Endotérmica
Sulfato de potasio	K ₂ SO ₄	50	12g/100mL	12,5g/100mL	Se disuelve lentamente, Endotérmica
Nitrato de potasio	KNO ₃	44	31,6g/100mL	31,5g/100mL	Fácil disolución, Endotérmica
Fosfato monigotéasico	KH ₂ PO ₄	30-58	22g/100mL	24g-100mL	Fácil disolución, Endotérmica
Hidróxido de potasio	KOH	67	119/100mL	119/100mL	Fácil disolución, Endotérmica

En cuanto al cloruro de potasio se puede mencionar que presentó una solubilidad muy baja que dio como resultado una suspensión coloidal desfavorable para el uso en fertilización líquida, además, este presenta un alto contenido de cloro, lo que puede resultar perjudicial para las plantas, como por ejemplo el adelgazamiento de las hojas o la tendencia a enrollarse e inclusive hojas secas, por lo que se puede confundir este exceso con la deficiencia de potasio (Finck, 1998).

Macronutrientes Secundarios:

Seguidamente se realizaron pruebas de solubilidad para los macronutrientes secundarios, porque aun cuando en las formulaciones estos nutrientes son poco comunes, son de importancia

para la nutrición de suelos y plantas. En este caso, no se utilizaron todas las fuentes existentes para cada uno de estos macronutrientes, pero se investigó acerca de los más comunes y las fuentes que aportan un mayor contenido del nutriente.

En el caso del magnesio, este es importante para las plantas porque es un constituyente esencial de la clorofila (Moreno, 2007) y se realizaron pruebas de solubilidad en dos fuentes (Cuadro 4), las cuales fueron el nitrato de magnesio, principalmente por su alta solubilidad en agua y por aportar, además del magnesio, un alto contenido de nitrógeno, lo cual es muy favorable cuando se requiere el nitrógeno junto con el magnesio en un fertilizante y la segunda fuente que se verificó la solubilidad en agua fue al sulfato de magnesio, el cual presenta

Cuadro 4. Fuentes comunes de magnesio en fertilizantes líquidos y su respectiva solubilidad teórica y experimental

Fuente	Fórmula	% Mg	Solubilidad Teórica en agua	Solubilidad experimental en agua	Observaciones
Nitrato de magnesio	Mg(NO ₃) ₂	9	120g/100mL	230g/100mL	Fácil disolución, Endotérmica
Sulfato de magnesio	MgSO ₄	9	74g/100mL	70g/100mL	Fácil disolución, Endotérmica

una solubilidad suficientemente alta y además un segundo macronutriente secundario como el azufre en un porcentaje considerable, lo cual, al igual que el caso anterior, puede resultar favorable en la formulación de nuevos fertilizantes, ya que se busca un fertilizante que pueda aportar la mayor parte de la nutrición en una sola aplicación, lo cual ayuda a reducir costos al agricultor por evitar reiteradas irrigaciones sobre los cultivos y suelos.

Para el caso de la segunda fuente de macronutrientes secundarios, esta resulta más difícil de obtener porque el calcio proviene principalmente

de fuentes insolubles en agua (International Plant Nutrition Institute, 2016), por lo que, primeramente, se debe disolver en medio ácido, como fue el caso del carbonato de calcio, donde su solubilidad fue comprobada en ácido nítrico como disolvente, en el que a pesar de generarse una reacción altamente exotérmica y fuerte (generación de espuma y gases) se observó que se disuelve correctamente (Cuadro 5).

Cuadro 5. Fuentes comunes de calcio en fertilizantes líquidos y su respectiva solubilidad teórica y experimental

Fuente	Fórmula	% Ca	Solubilidad Teórica	Solubilidad experimental	Observaciones
Carbonato de calcio	CaCO ₃	40	70g/100ml de ácido nítrico al 65%	70g/100mL de ácido nítrico al 65%	Se disuelve lentamente, proceso exotérmico, generación de espuma y gases

En cuanto a sus funciones en la planta, este interviene en la formación de la lecitina y de los pectatos de calcio de la laminilla media de la célula, lo que favorece la absorción de elementos y además, regula la presión osmótica. Asimismo, es esencial para el crecimiento de las raíces y como constituyente de tejido celular de las membranas (Palacios, 2009).

Cabe mencionar que el medio ácido disminuirá el pH a tal punto que puede ser perjudicial para suelos y plantas, debido a que el pH óptimo debe encontrarse en un rango de 6 a 8 y si se encuentra fuera de este rango es porque los suelos están muy ácidos o alcalinos (según corresponda) y requieren ser neutralizados (Rattan, 1994) por ende, si se desea utilizar esta disolución en una nueva formulación de fertilizante líquido, debe controlarse su pH de modo que se mantenga dentro de un rango saludable para el cultivo.

Por último, para los macronutrientes secundarios se verificó la solubilidad del azufre (Cuadro 6), el cual es un constituyente esencial de las proteínas, las vitaminas, las enzimas y los

lípidos, además, está involucrado en la formación de clorofila de las plantas (Audesirk, Audesirk, & Byers, 2003).

Cuadro 6. Fuentes comunes de azufre en fertilizantes líquidos y su respectiva solubilidad teórica y experimental

Fuente	Fórmula	% S	Solubilidad Teórica en agua	Solubilidad experimental en agua	Observaciones
Sulfato de amonio	$(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$	24	74,4g/100mL	75g/100mL	Se disuelve lentamente, Endotérmica
Sulfato de magnesio	MgSO_4	13	74g/100mL	70g/100mL	Fácil disolución, Endotérmica
Sulfato de zinc heptahidratado	$\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	11,5	70g/100mL	85g/100mL	Fácil disolución, Endotérmica

Analizando las tres fuentes de azufre utilizadas se determinó que todas presentan una solubilidad favorable para el uso en fabricación de fertilizantes líquidos, de igual manera es importante mencionar que se buscaron fuentes de azufre comunes en la industria de fertilizantes y se debe tomar en cuenta que estas presentan un segundo nutriente que no se puede omitir si se desea utilizar como fuente de azufre, como el caso del sulfato de zinc heptahidratado, el cual tiene en su mayoría el micronutriente del zinc, lo que regula el uso de este producto debido a que un alto contenido de este micronutriente en las plantas y suelos puede terminar ocasionando contaminación para los cultivos (Sadava & Purves, 2009).

Micronutrientes:

Se realizaron pruebas de solubilidad para los seis micronutrientes y se logró observar que todos presentan un grado de solubilidad muy similar al teórico (Cuadro 7), con unas pequeñas variaciones que pueden haber sido ocasionadas por las condiciones atmosféricas en el laboratorio, ya que estas pruebas de solubilidad fueron realizadas a temperatura ambiente por lo que hubo variaciones en un rango de 24 a 28°C aproximadamente (Clavijo, 2002).

De igual manera se debe considerar que estas sustancias aportan segundos nutrientes, lo que puede ser de provecho en la fabricación de nuevos fertilizantes, pero también puede ocasionar dificultades como precipitados al combinar ciertos reactivos, como por ejemplo, la combinación de algún sulfato con el calcio genera un precipitado que debe ser evitado en este tipo de formulaciones (Morel, 1971). Para comprender mejor este problema de compatibilidad se realizaron pruebas entre algunas de las sustancias ya mencionadas anteriormente.

Cuadro 7. Fuentes comunes de micronutrientes y su respectiva solubilidad teórica y experimental

Fuente	Fórmula	%	Solubilidad	Solubilidad	Observaciones
			Teórica en agua	experimental en agua	
Sulfato Ferroso heptahidratado	$\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	20% Fe	400g/L	400g/L	Fácil disolución, Endotérmica
Sulfato de Cobre pentahidratado	$\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$	25% Cu	230g/L	225g/L	Fácil disolución, Endotérmica
Molibdato de Sodio	Na_2MoO_4	39% Mo	840g/L	790g/L	Disuelve lentamente, Endotérmica
Bórax decahidratado	$\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$	37% B	62,2g/L	55g/L	Disuelve lentamente, Endotérmica
Sulfato de Manganeso	MnSO_4	32% Mn	400g/L	400g/L	Disuelve lentamente, Coloración blanca, Endotérmica
Sulfato de zinc heptahidratado	$\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	22,5% Zn	960g/L	850g/L	Fácil disolución, Endotérmica

Pruebas de compatibilidad:

Como dato importante, es necesario mencionar que una compatibilidad experimental incompleta hace referencia a un precipitado o formación de coloide, mientras una compatibilidad experimental completa describe una reacción ideal.

Cuadro 8. Compatibilidad observada para la combinación de urea con distintas sustancias

Sustancias	T (°C)	Compatibilidad experimental	Compatibilidad teórica	Nº mezcla	
Urea +	KH_2PO_4	26	COMPLETA	Limitado	1
	$\text{Mg}(\text{NO}_3)_2$	26	IMCOMPLETA	Limitado	2
	$\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	26	IMCOMPLETA	Limitado	3
	K_2SO_4	27	COMPLETA	SI	4
	H_3PO_4	26	COMPLETA	SI	5
	$(\text{HNO}_3 + \text{CaCO}_3)$	27	COMPLETA	SI	6
	MAP*	26	COMPLETA	SI	7
	$(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$	25	COMPLETA	Limitado	8
	DAP**	25	COMPLETA	SI	9
	$\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	25	COMPLETA	Limitado	10

*Fosfato monoamónico. **Fosfato diamónico.

Según se demostró con las pruebas de solubilidad, la urea es la que representa el mayor porcentaje de nitrógeno disponible para un fertilizante líquido, esto porque además de proporcionar un 46% de nitrógeno, es la que se disuelve con mayor facilidad y en mayor proporción. Por esta razón se tomó la decisión de realizar pruebas de compatibilidad de la urea con otras sustancias y así comprobar la compatibilidad entre ellas.

En cuanto a estas pruebas representadas en el cuadro 8 se puede observar que a la temperatura indicada la mayoría de las combinaciones resultaron positivas, donde solamente el nitrato de magnesio y el sulfato de zinc heptahidratado tuvieron una compatibilidad experimental negativa con la urea, es

decir, que se formó un precipitado desfavorable para ser usado en este tipo de fertilizantes, por esta razón para poder utilizar este tipo de mezcla se debe emplear un agente capaz de quelatar el zinc o el magnesio y así evitar el precipitado (Perrea, Ojeda, Hernandez, Ruiz, & Martinez, 2010).

En cuanto a la compatibilidad teórica se observó que de las cinco mezclas que debían resultar negativas, solamente dos de ellas lo fueron, lo cual genera más opciones disponibles en cuanto a mezclas posibles con la urea, es favorable para la innovación en este tema y resulta un hallazgo importante para la investigación realizada.

Cuadro 9. Compatibilidad observada para la combinación de KNO₃ con distintas sustancias

Sustancias	T (°C)	Compatibilidad experimental	Compatibilidad teórica	Nº mezcla	
Nitrato de potasio +	KH ₂ PO ₄	25	IMCOMPLETA	SI	11
	(HNO ₃ +CaCO ₃)	25	COMPLETA	SI	12
	(NH ₄) ₂ SO ₄	26	IMCOMPLETA	SI	13
	H ₃ PO ₄	27	COMPLETA	SI	14

En la prueba de compatibilidad para el nitrato de potasio, el cual a pesar de ser una fuente de nitrógeno de menor contenido que la urea, también aporta un alto porcentaje de potasio, lo que puede resultar muy útil porque aportaría dos de los tres macronutrientes primarios necesarios para un fertilizante de composición completa.

Como se observa en el cuadro 9, el nitrato de potasio solamente reflejó compatibilidad positiva para casos en los que el medio era ácido, lo que podría ser perjudicial para ciertos suelos y plantaciones, como ya se mencionó anteriormente, por esta razón se debe evitar el uso del nitrato de potasio para fabricar mezcla de composición completa.

Los fertilizantes pueden contener el nitrógeno en forma nítrica, amoniacal y ureica, como ya se describió la compatibilidad de fuentes de nitrógeno ureico y nítrico en cuadros anteriores, por lo que en el cuadro 10 se describe la compatibilidad de una fuente de nitrógeno amoniacal.

Cuadro 10. Compatibilidad observada para la combinación de $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ con distintas sustancias

Sustancias	T (°C)	Compatibilidad experimental	Compatibilidad teórica	Nº mezcla	
Sulfato de amonio +	K_2SO_4	26	COMPLETA	SI	15
	DAP**	26	COMPLETA	SI	16
	KH_2PO_4	26	COMPLETA	SI	17
	MAP*	26	COMPLETA	SI	18

*Fosfato monoamónico. **Fosfato diamónico.

En este caso, como lo establecía la literatura, la combinación del sulfato de amonio resultó exitosa para las cuatro sustancias y genera composiciones muy apropiadas para la formulación de un nuevo fertilizante, las cuales presentan, prácticamente, una composición completa (N- P_2O_5 - K_2O), pero también ostentan condiciones adversas para ser empleadas como formulación, como lo serían, el alto costo del fosfato monoamónico, la presencia de azufre en gran cantidad al combinar el sulfato de amonio con sulfato de potasio, o el poco aporte de potasio que presenta el sulfato de

potasio, por lo cual para hacer uso de estas sustancias se deben conocer condiciones muy específicas de los suelos o especificaciones de clientes que requieran justamente las características anteriores.

En las pruebas de compatibilidad para el sulfato de magnesio heptahidratado (Cuadro 11), el cual consta de dos macronutrientes secundarios, se combinó con diferentes macronutrientes primarios para observar el comportamiento de estos y así determinar si son de propicios para el uso en fertilización líquida.

Cuadro 11. Compatibilidad observada para la combinación de $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ con distintas sustancias

Sustancias	T (°C)	Compatibilidad experimental	Compatibilidad teórica	Nº mezcla	
Sulfato de magnesio heptahidratado +	DAP**	25	IMCOMPLETA	SI	19
	H_3PO_4	25	COMPLETA	SI	20
	K_2SO_4	24	COMPLETA	SI	21
	KH_2PO_4	24	IMCOMPLETA	Limitado	22
	MAP*	25	COMPLETA	SI	23

*Fosfato monoamónico. **Fosfato diamónico.

En este caso se evidenció que el sulfato de magnesio heptahidratado reaccionó desfavorablemente cuando se aplicó el fosfato diamónico (DAP) y el fosfato monopotásico, por lo cual estas sustancias serán evitadas en la formulación de nuevos fertilizantes para evitar precipitados. De igual manera se observó cómo en medio ácido (H_3PO_4 y MAP) la reacción fue positiva, al igual que lo fue para el sulfato de potasio.

Por último, se realizó una combinación entre los seis micronutrientes más comunes para determinar la compatibilidad entre ellos (cuadro 12), de lo cual se determinó que el sulfato de zinc heptahidratado es incompatible con el bórax y el molibdato de sodio, para lo cual es importante tomar en cuenta que las pruebas fueron realizadas a temperatura ambiente.

Cuadro 12. Compatibilidad observada para la combinación entre micronutrientes

Sustancias	T (°C)	Compatibilidad experimental	Compatibilidad teórica
ZnSO ₄ •7H ₂ O + Na ₂ B ₄ O ₇ •10H ₂ O	25	IMCOMPLETA	NO
ZnSO ₄ •7H ₂ O + CuSO ₄ •5H ₂ O	25	COMPLETA	SI
ZnSO ₄ •7H ₂ O + FeSO ₄ •7H ₂ O	24	COMPLETA	SI
ZnSO ₄ •7H ₂ O + MnSO ₄	24	COMPLETA	SI
ZnSO ₄ •7H ₂ O + Na ₂ MoO ₄	25	IMCOMPLETA	NO
CuSO ₄ •5H ₂ O + Na ₂ B ₄ O ₇ •10H ₂ O	24	COMPLETA	SI
CuSO ₄ •5H ₂ O + FeSO ₄ •7H ₂ O	24	COMPLETA	SI
CuSO ₄ •5H ₂ O + MnSO ₄	24	COMPLETA	SI
CuSO ₄ •5H ₂ O + Na ₂ MoO ₄	24	COMPLETA	SI
FeSO ₄ •7H ₂ O + Na ₂ B ₄ O ₇ •10H ₂ O	26	IMCOMPLETA	NO
FeSO ₄ •7H ₂ O + MnSO ₄	25	COMPLETA	SI
FeSO ₄ •7H ₂ O + Na ₂ MoO ₄	26	IMCOMPLETA	NO
Na ₂ B ₄ O ₇ •10H ₂ O + MnSO ₄	25	IMCOMPLETA	NO
Na ₂ B ₄ O ₇ •10H ₂ O + Na ₂ MoO ₄	25	COMPLETA	SI
MnSO ₄ + Na ₂ MoO ₄	24	IMCOMPLETA	NO
ZnSO ₄ •7H ₂ O + CuSO ₄ •5H ₂ O + MnSO ₄ + FeSO ₄ •7H ₂ O	25	COMPLETA	-

También se determinó que el sulfato de cobre es compatible con cada uno de los cinco micronutrientes utilizados. De igual manera, las pruebas para el sulfato de hierro heptahidratado y el sulfato de manganeso demuestran que no son compatibles al ser combinados con el bórax y el molibdato de sodio, esto a temperatura ambiente y acorde con la teoría consultada.

Posteriormente, como se evidencia en el Cuadro 12, se combinó el bórax con el molibdato de sodio y se comprobó que estos micronutrientes son compatibles a temperatura ambiente. Se realizó una prueba para los cuatro elementos que dieron resultados compatibles entre sí y se observó que la combinación de estos (ZnSO₄•7H₂O, CuSO₄•5H₂O, MnSO₄ y FeSO₄•7H₂O) resultó satisfactoria.

Para concluir con la sección de compatibilidad entre sustancias se realizó una combinación entre las mezclas que resultaron positivas en cada uno de los cuadros anteriores y los diferentes micronutrientes como una muestra para los posibles fertilizantes (ver Cuadro 13). En cada uno de los casos se agregaron los

micronutrientes uno a uno y según la compatibilidad mostrada se adicionó un segundo micronutriente o en caso de incompatibilidad se añadió un agente quelatante para lograr corregir o evitar el precipitado.

Para ejemplificar lo anterior, se tiene la mezcla número 10 (urea + sulfato de magnesio heptahidratado en el cuadro 8) a la cual se le añadió primeramente el sulfato de cobre pentahidratado y al ser compatible se procedió a agregar el sulfato de zinc heptahidratado, lo que dio como resultado una mezcla compatible, la cual puede ser utilizada como fertilizante líquido si se quisiera. Un segundo ejemplo es el caso de la mezcla 18 (sulfato de amonio + MAP en el cuadro 10) a esta se le añadió el sulfato de cobre pentahidratado y se generó un precipitado, por lo cual seguidamente se adicionó un agente quelante (EDTA) para mejorar la reacción, lo cual generó un resultado positivo al revertir el precipitado y dejó ver una solución líquida nuevamente.

Cuadro 13. Compatibilidad de las diferentes mezclas con los micronutrientes

Nº mezcla	T (°C)	Micronutriente	Compatibilidad experimental	Agente Quelatante	Mejora en la reacción
1	26	Fe	NO	Monoetanolamina	NO
4	27	Cu+Zn+Mn+Fe	SI	-	-
5	26	Cu+Zn+Mn+Fe+Mo	SI	-	-
6	27	B	SI	-	-
7	26	Zn	NO	Monoetanolamina	SI
10	25	Cu+Zn	SI	-	-
12	25	Cu+B	NO	-	-
14	27	Cu+B	SI	-	-
15	26	Fe	NO	Monoetanolamina	NO
16	26	Fe	NO	Monoetanolamina	NO
17	26	Fe	NO	Monoetanolamina	NO
18	26	Cu	NO	EDTA	SI
20	25	Cu+Zn+Mo+Mn+B+Fe	SI	-	-
21	24	Zn	NO	EDTA	SI
23	25	Cu+Zn	SI	-	-

Notas: El número de mezcla que se indica hace referencia a la mezcla respectiva de los cuadros 8, 9, 10 o 11, el cual se indica en la columna derecha de cada uno de los cuadros. (Cu) sulfato de cobre pentahidratado, (Zn) sulfato de zinc heptahidratado, (Mn) sulfato de manganeso, (Fe) sulfato de hierro heptahidratado, (Mo) molibdato de Sodio, (B) Bórax decahidratado.

Una vez finalizada la etapa de experimentación para solubilidad y compatibilidad, donde se obtuvo una visión más clara de las posibilidades que se tienen, en cuanto a sustancias para la fabricación de un nuevo fertilizante líquido, se procedió a realizar formulaciones, las cuales se realizaron de acuerdo con los resultados logrados en las pruebas anteriores y a los requerimientos de los agricultores y se logró obtener un fertilizante líquido de composición completa (N-P₂O₅-K₂O), con un macronutriente secundario (S) y dos micronutrientes (Cu y Zn).

Una vez establecidos los nutrientes requeridos, se procedió a la realización de un balance de nutrientes óptimo, siguiendo las recomendaciones teóricas, y las fuentes que mejor se adapten a dichas especificaciones. En el Cuadro 14 se detallan las fuentes utilizadas.

Es importante mencionar que el fertilizante se realiza con base en 100 g, por ende, debe sumarse al conjunto de sus componentes el contenido de

EDTA (8,3g), el cual fue utilizado para evitar la precipitación del sulfato de cobre y el sulfato de zinc en el medio básico nutritivo (Perrea, Ojeda, Hernandez, Ruiz, & Martinez, 2010), y por último se debe sumar el contenido de agua en gramos (45 g), de modo que al sumar todos los componentes el contenido sea de 100 g.

En cuanto a los análisis realizados, el fertilizante se comportó de muy buena manera, y arrojó resultados con desvíos muy pequeños en cuanto al contenido que se pretendía teóricamente. Como se esperaba con la urea, se obtuvo un resultado de 10% de nitrógeno, de igual manera el fósforo y el potasio, donde se obtuvo 5 y 8% respectivamente, lo que indica que para los macronutrientes primarios los resultados fueron exitosos.

Con respecto al azufre, que es el único macronutriente secundario, se obtuvo un desvío de 0,03% con respecto al dato esperado, lo que indica un excelente resultado de azufre en el fertilizante; y por último el

Cuadro 14. Detalle del contenido de nutrientes y resultados de análisis obtenidos para el fertilizante líquido de composición completa realizado.

Nutriente	Sustancia	Cantidad utilizada (g)	Contenido aportado teóricamente (%)	Resultados de análisis	Tolerancia permitida*
Nitrógeno (N)	Urea	21,7	10	10,36%	-0,9
Fósforo (P₂O₅)	Ácido fosfórico	9,5	5,6	5%	-0,7
Potasio (K₂O)	Hidróxido de potasio	12,5	8,4	8%	-0,9
Cobre (Cu)	Sulfato de cobre pentahidratado	2	0,50	0,49%	-0,3
Zinc (Zn)	Sulfato de zinc heptahidratado	1	0,25	0,27%	-0,3
Azufre (S)	Se obtiene de los sulfatos anteriores	-	0,30	0,27%	-0,3

*Tolerancia permitida para fertilizantes inorgánicos formulados con otros elementos.

Fuente: (Ministerio de agricultura y ganadería, 8 de diciembre de 2015)

cobre y el zinc, ambos micronutrientes, presentaron resultados que varían en decimales, lo cual indica que se obtuvo un porcentaje muy cercano al esperado, por ende, se confirma que la formulación realizada fue exitosa en cuanto al porcentaje comprendido por los nutrientes que lo componen, así lo ratifica la tolerancia permitida para fertilizantes inorgánicos formulados con otros elementos (Ministerio de agricultura y ganadería, 8 de diciembre de 2015).

En relación con el pH del fertilizante se obtuvo un 8.3, esto refleja que además de ser un rango aceptable para la absorción en las plantas, este es relacionado con un fertilizante líquido fundamentalmente con el sistema de aplicación utilizado y con las características del agua de riego. En el caso de sistemas de riego de goteo es recomendable el uso de fertilizantes de reacción ácida cuando las aguas son de pH elevado, duras y con alto contenido de carbonatos y bicarbonatos (Ficha de Divulgación Técnica, 2003)

Por otra parte, se obtuvo una densidad de 1,2096 g/mL, lo cual es imprescindible entre las especificaciones de un fertilizante líquido, ya que estos

fertilizantes se compran por peso, pero en general se dosifican por unidad de volumen. Por tanto, es preciso conocer su densidad para realizar las correspondientes transformaciones de masa a volumen. (Ficha de Divulgación Técnica, 2003).

Por último, como era deseado en cuanto a presencia de metales pesados Cd, Pb, Hg, As, Ni, Se, Co y Cr, no se obtuvo detección analítica en ninguno de los casos, lo que indica que el fertilizante formulado cumple con las especificaciones requeridas y las planteadas por la reglamentación aplicable, dejando como resultado un fertilizante líquido de composición completa favorable para el uso en cultivos tropicales (Ministerio de agricultura y ganadería y de economía, industria y comercio, 1999).

IV. Conclusiones

Basado en las pruebas de solubilidad y compatibilidad realizadas, se concluye que, de las sustancias utilizadas como fuente para el nitrógeno, la urea es la que presenta las mejores características y aporta el mayor contenido de nitrógeno y mayor

solubilidad respecto de las demás fuentes, además presenta una compatibilidad muy amplia, lo cual permite el uso en variadas composiciones. En cuanto a las fuentes utilizadas para el fósforo, se obtuvieron los mejores resultados al aplicar el ácido fosfórico como nutriente, esto por la alta solubilidad, su capacidad de combinaciones posibles con otros elementos y su gran aporte nutricional, además presenta un pH muy ácido, lo que permite ser utilizado para controlar pH bajo en suelos y neutralización de bases en la formulación. Por otra parte, de las fuentes de potasio utilizadas, se concluye que el hidróxido de potasio es la más favorable como nutriente, primeramente, por el aporte tan elevado de potasio, en segundo lugar, por dar paso a una reacción exotérmica al disolverse en agua, lo que permite mayor facilidad para disolver los demás componentes de la formulación, y por último el pH elevado, lo cual cumple la función de alcalinizar los suelos como fertilizantes o en algunos casos aumentar el pH del fertilizante.

En cuanto a la solubilidad determinada experimentalmente para las distintas sustancias, se evidencia la existencia de gran cantidad de fuentes para cada uno de los nutrientes, lo que permite diversidad de composiciones posibles, donde solamente el cloruro de potasio, el nitrato de amonio y el nitrato de calcio presentaron una solubilidad baja o una formación coloidal que impide su uso en esta actividad, de igual manera, las pruebas de compatibilidad generan una visión más clara de la existencia de las posibles combinaciones, lo que aunado a un agente quelante, como el EDTA puede corregir una compatibilidad desfavorable.

Con base en lo obtenido y en referencia a los reglamentos aplicables, el fertilizante líquido de composición completa (N-P₂O₅-K₂O-S-Cu-Zn) formulado, presenta una concentración de nutrientes correcta, contemplados dentro de las tolerancias permitidas para los diferentes nutrientes. Además, no se detectó presencia de metales pesados en la formulación final, lo que permite asegurar que el fertilizante formulado puede ser utilizado en cultivos tropicales para los cuales fue diseñado.

Bibliografía

- Asociación Internacional de la industria de los fertilizantes. (2002). *Los fertilizantes y su uso*. Paris: Food & Agriculture Org.
- Audesirk, T., Audesirk, G., & Byers, B. (2003). *Biología: la vida en la tierra*. Mexico: Pearson Educación.
- Bravo, J. (2009). *Siembra*. California: Universidad de California.
- Cadahía, C. (2008). *Fertirrigación: cultivos hortícolas, frutales y ornamentales*. Madrid: Mundi-Prensa.
- Casanova, O., Barbazan, M., & Barreto, P. (2015). *Tecnología de los fertilizantes*. Argentina: Facultad de Agronomía.
- Centro de investigaciones agronómicas. (Febrero de 2002). *Laboratorio de suelos y foliares*. Recuperado el 21 de Agosto de 2016, de Centro de investigaciones agronomicas, Universidad de Costa Rica: <http://www.cia.ucr.ac.cr/pdf/Memorias/Memoria%20Curso%20Fertilizaci%C3%B3n%20Foliar.pdf>
- Chamba, L. (1988). *Los fertilizantes*. Boletín Divulgato No. 16, 14.
- Clavijo, A. (2002). *Fundamentos de química analítica: equilibrio iónico y análisis químico*. Bogota, Colombia: Univ. Nacional de Colombia.
- Dominguez, V. (1978). *Abonos minerales*. Madrid: Ministerio de Agricultura.
- Dowdle, S. (2000). *Fluid Fertilizer. Proceedings of Productions and international Trade*. Shanghai, China: IFA.
- Engelstad, O. (1985). *Fertilizer technology and use*. Soil Science Society of America, Inc.

- Fertilizar Manual*. (1998). United Nations Industrial Development Organization (UNIDO) and International Fertilizer Development Centre (IFDC).
- Fesa-Enfersa. (1991). *Fertilizantes sólidos y líquidos para fertirrigación en riego por goteo*. España.
- Ficha de Divulgación Técnica. (2003). *Fertilizantes líquidos "A Medida". Fuentes Fertilizantes*.
- Finck, A. (1998). *Fertilizantes y fertilización: fundamentos y métodos para la fertilización de los cultivos*. Reverte.
- Fink, A. (2002). *Fertilizantes y Fertilización* (Segunda edición ed.). España, España: Reverte.
- Fuentes, Y. (1999). *El Suelo y los Fertilizantes*. España: Mundi Prensa.
- Gliessman, S. (2002). *Agroecología: procesos ecológicos en agricultura sostenible*. Turrialba, Costa Rica: CATIE.
- International Plant Nutrition Institute. (10 de Noviembre de 2016). IPNI. Obtenido de IPNI: [https://www.ipni.net/publication/nss-es.nsf/0/0248CCB8DFC442E985257BBA0059D03A/\\$FILE/NSS-ES-18.pdf](https://www.ipni.net/publication/nss-es.nsf/0/0248CCB8DFC442E985257BBA0059D03A/$FILE/NSS-ES-18.pdf)
- Ministerio de agricultura y ganadería. (8 de diciembre de 2015). *Reglamento técnico*. Costa Rica: 24.
- Ministerio de agricultura y ganadería y de economía, industria y comercio. (1999). *Laboratorio para el análisis de sustancias químicas y biológicas de uso en la agricultura*. Costa Rica: Decreto 27973-MAG-MEIC-S.
- Ministerio de Economía, Industria y Comercio. (s.f). *Fertilizantes y enmiendas de uso agrícola*. Recuperado el 21 de Agosto de 2016, de MEIC: <http://meic.go.cr/reglatec/consulta/rtc-65-05-54-09.pdf>
- Morel, P. (1971). *Tecnología de los fertilizantes*. Santiago de Chile: Andres Bello.
- Moreno, A. (2007). *Elementos Nutritivos. Asimilación, Funciones, Toxicidad E Indisponibilidad En Los Suelos*. LibrosEnRed.
- Navarro, S., & Navarro, G. (2003). *Química agrícola: el suelo y los elementos químicos esenciales para la vida vegetal*. Mundi-Prensa Libros.
- Nelson, L. (1990). *History of the US fertilizer industry*. Tennessee Valley Authority.
- Palacios, J. (2009). *Biología celular y molecular: conceptos y experimentos*. McGraw-Hill Educación.
- Palgrave, D. (1991). *History of Fluid Fertilizers*. New York: Fluid Fertilizer, Science and Technology.
- Perrea, E., Ojeda, D., Hernandez, A., Ruiz, T., & Martinez, J. (2010). *Utilización de quelatos en la agricultura. Aventuras del pensamiento* (Synthesis), 5.
- Primo, E. (1995). *Química orgánica básica y aplicada: de la molécula a la industria*. (Vol. 2). Barcelona: Reverte.
- Rattan, L. (1994). *Métodos y normas para evaluar el uso sostenible de los recursos naturales y agua en el trópico*. Columbus: Corpoica.
- Raven, P., Evert, R., & Eichhorn, S. (1992). *Biología de las plantas*. Reverte.
- Rodríguez, M., Morales, J., & Chavarría, J. (1985). *Producción de plátanos*. Alajuela, Costa Rica.
- Roman, C. (2002). *Manual de Ferti-riego de SQM*. Chile.
- Sadava, D., & Purves, W. (2009). *Vida: La ciencia de la biología*. Ed. Médica Panamericana.
- SAGARPA. (s.f.). *Uso de fertilizantes*. México: SAGARPA.