

**UNIVERSIDAD CATÓLICA DE EL SALVADOR  
FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA**



“La Ciencia sin Moral es Vana”

**INFORME DE INVESTIGACIÓN**

**“DETERMINACIÓN DE CONTAMINACIÓN EN SUELOS CON BAJA DENSIDAD DE PLANTAS DE CAÑA DE AZÚCAR POR LA UTILIZACIÓN DE FERTILIZANTE (24.6-12-18.4) UBICADA EN EL CANTÓN EL ACHIOTAL DEL MUNICIPIO DE SAN PEDRO MASAHUAT, DEPARTAMENTO DE LA PAZ”**

**PERÍODO DE REALIZACIÓN:**

**DEL 01 DE FEBRERO DE 2020 AL 30 DE JULIO DE 2020**

**PRESENTADO POR:**

**INGENIERO JOSÉ MARIO VÁSQUEZ RAMOS**

**INGENIERO CÉSAR ERNESTO QUEZADA PEÑATE.**

**LICENCIADA NORMA LETICIA HENRÍQUEZ VARGAS.**

**PARA OPTAR AL TÍTULO DE:**

**MAESTRO EN GERENCIA Y GESTIÓN AMBIENTAL**

**SANTA ANA, AGOSTO DE 2020**

**AUTORIDADES ACADÉMICAS DE LA UNIVERSIDAD**

**MONSEÑOR Y LICENCIADO MIGUEL ÁNGEL MORÁN AQUINO**

**RECTOR**

**DOCTOR MOISÉS ANTONIO MARTÍNEZ ZALDÍVAR**

**VICERRECTOR GENERAL**

**MÁSTER MOISÉS ULISES GARCÍA PERDIDO**

**SECRETARIO GENERAL**

**MÁSTER MAURICIO ERNESTO VELÁZQUEZ SORIANO**

**DECANO DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA**

**SANTA ANA, EL SALVADOR. C. A.**

## ÍNDICE DE CONTENIDOS

INTRODUCCIÓN .....	8
<b>CAPÍTULO I.</b> ....	11
<b>Generalidades del estudio</b> .....	11
<b>1.1 Problemática o temática investigada.</b> .....	11
1.1.1 Para el planteamiento de este problema se consideraron los siguientes aspectos:	14
<b>1.2 Justificación de la investigación</b> .....	15
<b>1.3 Objetivos</b> .....	18
<b>CAPÍTULO II.</b> .....	19
<b>Marco teórico o referencial de la investigación</b> .....	19
<b>2.1 Antecedentes de la Investigación</b> .....	19
<b>2.2 Recurso Suelo.</b> .....	23
2.2.1 Importancia de los suelos.....	24
2.2.2 Propiedades Físicas del Suelo.....	26
2.2.3 <i>Propiedades químicas del suelo.</i> .....	31
2.2.4 Contaminación de suelos por fertilizantes (N-P-K).....	37
2.2.5 Contaminación del suelo por Nitrógeno .....	38
2.2.6 Contaminación del suelo por Fosfatos: .....	40
2.2.7 Contaminación del suelo por Potasio:.....	44
2.2.8 Relación Calcio Magnesio .....	47
<b>2.3 Uso de fertilizantes (N-P-K), en el cultivo de caña de azúcar</b> .....	48
2.3.1 Prácticas Agrícolas para el cultivo de caña de azúcar.....	49
2.3.2 Baja densidad de plantas, en plantaciones de caña de azúcar .....	50
<b>2.4 Agricultura de precisión</b> .....	51
2.4.1 Sensores Multiespectrales.....	52

2.4.2 Índice Normalizado Diferencial de Vegetación (NDVI) .....	53
<b>CAPÍTULO III.</b> .....	<b>55</b>
<b>Metodología de la investigación.</b> .....	<b>55</b>
<b>3.1 Tipo de investigación</b> .....	<b>55</b>
<b>3.2 Población y muestra</b> .....	<b>56</b>
<b>3.3 Técnica e instrumentos utilizados.</b> .....	<b>57</b>
<b>3.4 Procedimiento realizado</b> .....	<b>58</b>
<b>CAPÍTULO IV.</b> .....	<b>64</b>
<b>Análisis estadístico o de información realizada</b> .....	<b>64</b>
<b>4.1 Resultados de los análisis de laboratorio.</b> .....	<b>70</b>
<b>4.2 Metodología actual de fertilización al suelo.</b> .....	<b>71</b>
<b>4.3 Nivel de contaminación en el suelo.</b> .....	<b>73</b>
<b>4.4 Análisis metodológico de fertilización.</b> .....	<b>88</b>
<b>4.5 Comprobación de hipótesis</b> .....	<b>90</b>
<b>4.6 Presentación de los hallazgos principales</b> .....	<b>93</b>
<b>CONCLUSIONES</b> .....	<b>94</b>
<b>BIBLIOGRAFÍA</b> .....	<b>96</b>
<b>ANEXOS</b> .....	<b>99</b>

## Índice de figuras

<i>Tabla 1.</i> Rangos y categorías del fósforo en el suelo. (Ovidio Sandoval) .....	44
<i>Tabla 2.</i> Escala de provisión de K intercambiables (Ing. Agr. Andrea Edith Pellegrini) .....	46
<i>Tabla 3.</i> Intercambio del calcio y magnesio del suelo (Ing. Agr. Andrea Edith Pellegrini).....	48
<i>Tabla 4.</i> Puntos geográficos del primer muestreo ( <i>Autoría propia</i> ). .....	58
<i>Figura 1.</i> Mosaico de imágenes multiespectrales ( <i>Autoría propia</i> ).....	62
<i>Tabla 5.</i> Puntos geográficos del segundo muestreo ( <i>Autoría propia</i> ). .....	63
<i>Tabla 6.</i> Promedio comparativo de resultados del laboratorio de muestras con baja densidad de plantas. <i>Centro Nacional de Tecnología Agropecuaria y Forestal (CENTA)</i> .....	70
<i>Tabla 7.</i> Promedio comparativo de resultados del laboratorio de muestras en surcos con plantas completas. <i>Centro Nacional de Tecnología Agropecuaria y Forestal (CENTA)</i> .....	71
<i>Tabla 9.</i> Resultados del primer muestreo. <i>Centro Nacional de Tecnología Agropecuaria y Forestal (CENTA)</i> .....	75
<i>Tabla 10.</i> Resultados del segundo muestreo. <i>Centro Nacional de Tecnología Agropecuaria y Forestal (CENTA)</i> .....	76
<i>Gráfica 1.</i> Comparación del primer y segundo muestreo del PH en agua 1 / 2.5. ( <i>Autoría propia</i> ).....	77
<i>Gráfica 2.</i> Comparación del primer y segundo muestreo del Fósforo (mg kg-1) ( <i>Autoría propia</i> ).....	78
<i>Gráfica 3.</i> Comparación del primer y segundo muestreo del Potasio (mg kg-1) ( <i>Autoría propia</i> ).....	79
<i>Gráfica 4.</i> Comparación del primer y segundo muestreo del Ca (cmol kg-1) ( <i>Autoría propia</i> ).....	80
<i>Gráfica 5.</i> Comparación del primer y segundo muestreo del Mg (cmol kg-1) ( <i>Autoría propia</i> ).....	81
<i>Gráfica 6.</i> Comparación del primer y segundo muestreo del K int. (cmol kg-1) ( <i>Autoría propia</i> ).....	82
<i>Gráfica 7.</i> Comparación del primer y segundo muestreo de Materia Orgánica ( <i>Autoría propia</i> ).....	83
<i>Gráfica 8.</i> Comparación del primer y segundo muestreo del Ca/Mg. ( <i>Autoría propia</i> ) .....	84
<i>Gráfica 9.</i> Comparación del primer y segundo muestreo del Mg/K ( <i>Autoría propia</i> )	85

<i>Gráfica 10. Comparación del primer y segundo muestreo del Ca + Mg/K (Autoría propia).....</i>	<i>86</i>
<i>Gráfica 11. Comparación del primer y segundo muestreo del Ca/K (Autoría propia) 87</i>	
Al sumar los 3 resultados que generaron menor valor NDVI en el vuelo de dron, resulta 32.11% de área con baja densidad de plantas, con este valor podemos calcular:	
.....	<i>88</i>
<i>Tabla 11. Costos de fertilización en caña de azúcar, área de investigación: 5.7 ha- total de 57 ha. (Autoría propia).....</i>	<i>88</i>
<i>Cuadro 1. Matriz de comparación de hipótesis (Autoría propia).....</i>	<i>91</i>
<i>Figura 2. Puntos geográficos del primer muestreo (Autoría propia).....</i>	<i>100</i>
<i>Gráfica 12. Lluvia Acumulada en el periodo del 22 de mayo al 21 de junio de 2020. (SNET MARN).....</i>	<i>100</i>
<i>Figura 3. . Informe generado por Slant View 2 de detección de baja densidad de plantas (Autoría propia).....</i>	<i>101</i>
<i>Figura 4. Informe generado por Slant View 2 para detección de tamaño de plantas (Autoría propia).....</i>	<i>102</i>
<i>Figura 5. Puntos Geográficos del segundo muestreo (Autoría propia).....</i>	<i>103</i>
Instrumentos utilizados para muestreo.....	<i>104</i>
<i>Figura 6. Equipo trimble (GPS, antena y mochila) (Autoría propia).....</i>	<i>104</i>
<i>Figura 7. Cinta métrica (Autoría propia).....</i>	<i>104</i>
<i>Figura 8. Barreno (Autoría propia).....</i>	<i>104</i>
<i>Figura 9. Balde (Autoría propia).....</i>	<i>104</i>
<i>Figura 10. Marcador y bolsa para muestra (Autoría propia).....</i>	<i>104</i>
<i>Figura 11. Ficha técnica para registro de muestra (Autoría propia).....</i>	<i>104</i>
<i>Figura 12. Mavic mini, Instrumento para video. (Autoría propia).....</i>	<i>104</i>
Instrumentos utilizados para procesamiento de imágenes .....	<i>105</i>
<i>Figura 13. Computadora para el procesamiento de imágenes multiespectrales (Autoría propia).....</i>	<i>105</i>
<i>Figura 14. Ipad para el control de vuelo del dron (Autoría propia).....</i>	<i>105</i>
<i>Figura 15. Adaptador de memoria microSD para la transferencia de imágenes (Autoría propia).....</i>	<i>105</i>
<i>Figura 16. Software Drone Deploy para la planificación y vuelo del Dron (Autoría propia).....</i>	<i>106</i>
<i>Figura 17. Software 3P Toolbox de calibración de sensor SlantRange (Autoría propia).....</i>	<i>106</i>
<i>Figura 18. Software SlantView 2 para el procesamiento de imágenes multiespectrales. (Autoría propia).....</i>	<i>107</i>

<i>Figura 19. Software QGroundControl para calibración de IMU del dron M600PRO. (Autoría propia).</i> .....	107
<i>Figura 20. Dron de vuelo M600PRO (Autoría propia).</i> .....	108
<i>Figura 21. Primer Muestreo de Suelo (Autoría propia).</i> .....	109
<i>Figura 22. Segundo Muestreo de Suelo. (Autoría propia).</i> .....	110
<i>Figura 23. Revisión del equipo (dron, sensor, baterías). (Autoría propia)</i> .....	111
<i>Figura 24. Resultados del primer muestreo de suelo. Centro Nacional de Tecnología Agropecuaria y Forestal (CENTA)</i> .....	112
<i>Figura 25. Resultados del primer muestreo de suelo. Centro Nacional de Tecnología Agropecuaria y Forestal (CENTA)</i> .....	113
<i>Figura 26. Resultados del segundo muestreo de suelo. Centro Nacional de Tecnología Agropecuaria y Forestal (CENTA)</i> .....	114
<i>Figura 27. Resultados del segundo muestreo de suelo. Centro Nacional de Tecnología Agropecuaria y Forestal (CENTA)</i> .....	115
<i>Tabla 12. Rangos de análisis. Centro Nacional de Tecnología Agropecuaria y Forestal (CENTA)</i> .....	116

## INTRODUCCIÓN

El suelo es un componente esencial e importante ya que presta muchos beneficios y servicios ambientales, tiene las siguientes características: en él se desarrolla la vida; es vulnerable, es el sustento de alimento para las plantas, almacena nutrientes, posee y alberga materia orgánica proveniente de restos de animales y vegetales, es el hábitat de diversos organismos que transforman la materia orgánica presente en él, de difícil y larga recuperación, tarda desde miles a cientos de miles de años en formarse, es un recurso finito, por lo que se considera un recurso natural no renovable. Se puede utilizar para actividades agrícolas, ganadería, pastos, montes, extracción de minerales, materiales para la construcción, soporte para las edificaciones, eliminación de residuos, actividades de ocio y recreación, entre otros, por lo que es esencial en el desarrollo de los ecosistemas de los cuales forma parte.

Los suelos son degradados por diversas actividades humanas, especialmente por actividades agrícolas, las cuales son provocados en su mayoría por la utilización indiscriminada de fertilizantes (N-P-K), especialmente en plantaciones de caña de azúcar, que cada año se incrementa el área de cultivo, desplazando a otros cultivos tradicionales como maíz y frijol, incrementando la contaminación por agroquímicos que afectan a los organismos del suelo y daños a la fauna y flora de los agroecosistemas locales

Las actividades económicas, especialmente la agricultura, están haciendo un uso cada vez más intensivo del suelo, empleando agroquímicos, con el fin de obtener mayor cantidad de alimentos y materias primas.

De igual manera, existen otras actividades productivas urbanísticas que usan de manera intensiva este recurso, situación que está conduciendo a una degradación creciente del suelo, así como a una pérdida irrecuperable del mismo.

El uso inadecuado de este recurso trae como consecuencia la erosión, desertificación, pérdida de mantos acuíferos etc. Por tal razón, es necesario crear políticas públicas y estrategias de regulación, que permitan disminuir el impacto ambiental negativo que se produce sobre el suelo, a causa de diversas actividades que se llevan a cabo en los procesos productivos de la industria y agricultura.

En el año 1992, en la Cumbre de Río, se reconoció la importancia de la protección de los suelos y de sus usos potenciales, en el contexto de un desarrollo sostenible, en particular contra la contaminación procedente de acciones o actividades de origen antrópico. En concreto, se acordó el concepto de desarrollo sostenible y se adoptaron varias convenciones jurídicamente vinculantes en materia de cambio climático, diversidad biológica y posteriormente, desertificación.

De ahí la importancia que tiene, conocer los impactos de los fertilizantes (N-P-K), como el 24.6-12-18.4, cuando se utilizan de forma indiscriminada, en producciones de caña de azúcar, especialmente en cultivos con zonas despobladas, o con baja densidad de plantas.

El sector cañero en el país se centra especialmente en la zona costera, por este motivo se buscó localizar la investigación en el cantón Achiotal del municipio de San Pedro Masahuat en el departamento de La Paz, en la zona predomina el cultivo de caña de azúcar y la propiedad donde se realizó las evaluaciones se ubica a 1.5 km del río Jiboa, que tiene una longitud de 60 km y nace en el municipio de San Rafael Cedros, departamento de Cuscatlán.

A nivel mundial, se está utilizando tecnología de precisión a través de drones, para diversos fines y la agricultura no es la excepción. El Salvador cuenta con tres empresas que se dedican a prestar el servicio de drones, los cuales son utilizados para la aplicación de productos químicos más focalizados y así prescindir de las habituales avionetas que manejan un nivel de deriva de producto muy alto.

La investigación pretende medir y determinar el grado de contaminación al suelo por parte del fertilizante 24.6-12-18.4 en el cultivo de caña de azúcar del cantón El Achiotal teniendo en cuenta, que es un sector donde existen tres cultivos predominantes que son: caña de azúcar, loroco y plátano. Los dos últimos son cultivos muy susceptibles a productos químicos.

Se determinará la metodología actual de fertilización de suelos, en cultivos de caña de azúcar y se comparará el nivel de contaminación encontrado en el sitio de investigación, con las tablas de tolerancia promedio, de acuerdo con el Centro Nacional de Tecnología Agropecuaria y Forestal (CENTA).

Demostrar el beneficio de la utilización de drones y el software SlantView 2, para realizar monitoreos en los cultivos de caña de azúcar, para disminuir la contaminación del suelo por exceso del fertilizante 24.6-12-18.4. Esta información puede ser de gran ayuda para realizar el ajuste de las diferentes dosis de fertilizantes a utilizar en los cultivos, especialmente en zonas donde existan menos plantas por área de suelo, eso significa que se necesita menos fertilizantes y aplicaciones más focalizadas; de esta forma se lograría disminuir la contaminación del suelo por exceso del fertilizante 24.6-12-18.4, en áreas con baja densidad de plantas de cultivos de caña de azúcar. Por tales razones, la tecnología de drones está experimentando un auge mundial por sus aplicaciones a diferentes disciplinas productivas, en el sector agrícola existen los drones de aplicación con productos químicos y los drones de monitoreo de cultivos que detecta plagas, enfermedades, deficiencia nutricional y estrés hídrico para poder tomar decisiones más precisas.

## **CAPÍTULO I.**

### **Generalidades del estudio**

#### **1.1 Problemática o temática investigada.**

En El Salvador desde hace décadas existe una problemática que se agudiza a medida que pasa el tiempo, como es el uso excesivo de los agroquímicos, para tener mejores rendimientos en las actividades agrícolas, especialmente el uso de los fertilizantes (N-P-K), en plantaciones de caña de azúcar. Este cultivo es exigente en cuanto a los nutrientes del suelo y extrae la mayor cantidad de ellos, empobreciendo así las zonas del cultivo, por esta razón los productores necesitan aplicar fuertes cantidades de fertilizantes al suelo, para mantener una producción óptima de este cultivo.

Se han encontrado estudios de otros países, donde señalan la grave contaminación que ocasionan los fertilizantes a la biodiversidad, especialmente en la salud humana, además se encontró que debido al alto grado de contaminación en el suelo, causados por estos fertilizantes, se tienen bajos rendimientos en la producción, generación de gases de efecto invernadero, además los procesos de desmineralización que ocasionan la lixiviación de elementos a mantos acuíferos, que son relevantes en el consumo de las personas cercanas a las zonas agrícolas y a la biodiversidad de la zona; como también la contaminación de estos fertilizantes se suma a la generación de gases de efecto invernadero GEI.

Como eje central tenemos el enfoque ambiental para determinar el grado de contaminación que recibe el suelo, ocasionado por el uso indiscriminado de fertilizantes 24.6-12-18.4, en el cultivo de caña de azúcar, tomando en cuenta que un gran porcentaje de parcelas cultivadas de caña de azúcar son sepas de 6 años o más de antigüedad, originando la disminución de la población de plantas y su pobre desempeño por la pérdida de vigorosidad de las plantas. Para abordar el problema se realizarán análisis de suelo

antes y después de la aplicación de fertilizante, en las zonas con baja densidad de plantas, haciendo uso del dron para identificar las diferentes zonas que presentan el problema antes mencionado.

Con el propósito de no seguir contaminando los suelos, por aplicaciones innecesarias de fertilizantes nitrogenados, fosfatados y potásicos, en los cultivos de caña de azúcar, se considera que es importante realizar estudios de esta naturaleza, para poder demostrar la eficiencia del uso de drones en la agricultura, para determinar la densidad de plantas en los cultivos y así poder tomar las medidas y correcciones necesarias, para ajustar los requerimientos nutricionales del cultivo, especialmente los (N-P-K), también demostrar el grado de contaminación que genera la aplicación de fertilizantes, en zonas donde existen problemas de baja densidad de plantas en los cultivos de caña de azúcar.

La problemática investigada en esta tesis es la Determinación de contaminación en suelo despoblado por la utilización de fertilizante 24.6-12-18.4, en plantación de caña de azúcar ubicado en el Cantón El Achiotal del Municipio de San Pedro Masahuat, Departamento de La Paz. Se tomó a bien, esta problemática por la necesidad de colaborar con el organismo viviente que es el suelo, el cual proporciona el alimento para la supervivencia de los seres vivos, tal es el caso que, al hacer un abuso del mismo, principalmente con los fertilizantes, termina con los microorganismos e impide la fertilidad; con esta investigación se puede hacer un ínfimo aporte para establecer la relación que tiene la contaminación del suelo con el uso excesivo de fertilizantes, agravando el problema cuando existe una baja densidad de plantas en la zona.

La zona de investigación está ubicada, en el cantón El Achiotal del municipio de San Pedro Masahuat, departamento de La Paz, es un cultivo de caña de la variedad: CP-722086, con una edad de 6 años, la cual es cosechada con maquinaria. Esto es un punto muy importante de destacar ya que, la utilización de maquinaria para cosechar la caña de azúcar, incrementa el problema de despoblación de parcelas por el daño que ocasiona en

la plantación, otro punto a resaltar es la aplicación de las mismas dosis de agroquímicos, en donde, no se considera las zonas con baja densidad de plantas, utilizando un promedio de 515 Kg por hectárea, en cada ciclo de cultivo, realizando hasta cuatro aplicaciones por año, aumentando los riesgos de contaminación del suelo en los agroecosistemas locales.

La contaminación de los suelos por el uso indiscriminado de fertilizantes que contienen nitrógeno, fósforo y potasio, como el 24.6-12-18.4 (N-P-K), en plantaciones con densidad baja del cultivo de caña de azúcar, aumenta la contaminación al suelo y provoca serios daños al medio ambiente de la zona, debido a saturación del suelo por estos fertilizantes, lo cual no permite que las plantas absorban otros nutrientes disponibles en el suelo, así como contaminación del aire por volatilización de estos fertilizantes, ayudando de esta forma a la desertificación del suelo, contribuyendo al efecto de invernadero y el cambio climático en el país, específicamente en el agroecosistema del cantón El Achiotal del municipio de San Pedro Masahuat, departamento de la Paz.

Esta investigación se realizó con el propósito de medir la contaminación que provoca los fertilizantes y proveer alternativa mitigadora, de contaminación al suelo, por fertilizantes químicos, a través de tecnologías de agricultura de precisión, como es el uso de drones, imágenes multiespectrales y tecnologías de gps.

### **1.1.1 Para el planteamiento de este problema se consideraron los siguientes aspectos:**

- ✓ El análisis del suelo contaminado por la composición química del fertilizante 24.6-12-18.4, para disminuir su estado de contaminación.
- ✓ Los efectos de contaminación de los acuíferos superficiales, por el arrastre de fertilizante: por el efecto de la escorrentía de agua o por la desmineralización de estos agroquímicos.
- ✓ La posible contaminación que se da en el río Jiboa ubicado a 1.5 km del área de estudio, con una longitud de 60 km. y nace en el municipio de San Rafael Cedros, departamento de Cuscatlán. El río posee una trayectoria en la dirección noreste-sudoeste, y desemboca en el Océano Pacífico. Recorre además los municipios de San Cristóbal, Santa Cruz Analquito, El Carmen, y San Ramón, en el departamento de Cuscatlán; Santo Domingo, en el departamento de San Vicente; y Paraíso de Osorio, Jerusalén, San Miguel Tepezontes, Santa María Ostuma, San Pedro Nonualco, Santiago Nonualco, El Rosario, y San Pedro Masahuat, en el departamento de La Paz.
- ✓ La determinación de la densidad de plantas existentes en las plantaciones, para ajustar la cantidad de fertilizantes a utilizar, logrando minimizar la contaminación al suelo, por el uso excesivo de estos agroquímicos.
- ✓ Minimizar el impacto, por filtración de fertilizantes al suelo, que por escorrentía son desplazados al río Jiboa, así como disminuir los impactos en la salud de animales y la población de la zona.
- ✓ Otro aspecto que se tomó en cuenta es el mejoramiento de la eficiencia del uso de recursos, como es el dron, para facilitar la información de zonas con baja densidad de plantas, para la aplicación adecuada de fertilizantes y así lograr una producción sostenible de caña de azúcar en el país.

## **1.2 Justificación de la investigación**

En El Salvador existe información generalizada sobre la contaminación de los fertilizantes al suelo y los daños que causa al medio ambiente, pero no se han encontrado estudios formales y del dominio público sobre los daños causados al suelo por fertilizantes nitrogenados, fosfatados y potásicos, tales como la fórmula especial: 24.6-12-18.4, los cuales al ser aplicados sin previo estudio y análisis respectivos, causan serios daños al suelo, contribuyendo de esa forma a los procesos de desertificación del suelo y por los procesos de volatilización contaminan el aire, así como por infiltración son arrastrados a los mantos freáticos en los agroecosistemas locales.

La importancia de esta investigación, se debe a que, en nuestro país, el cultivo de caña de azúcar es un rubro prioritario, por la generación de empleo, oportunidades de exportación y desarrollo económico nacional y social. Es de mencionar que en la cosecha 2018/2019, se tuvo una producción de más de 6.7 millones de toneladas métricas de caña, en un área total de más de 80,514 hectáreas, representando un promedio de ingreso para el país de USD\$ 600,000,000.00. En el año 2015, este rubro representó el 2.7% del PIB, razón por lo cual es importante considerar los impactos negativos al suelo, por el uso indiscriminado de fertilizantes, en la producción de caña de azúcar, especialmente en cultivos con baja densidad de plantas.

Los productores renuevan las plantaciones en promedios de cada 6 años, lo cual provoca pérdidas de plantas y vigorosidad de las mismas en dichos cultivos, representando disminución en la producción y para mantener producciones estándares, se utilizan grandes cantidades de fertilizantes, lo cual provoca intoxicación por la saturación de estos agroquímicos en el suelo, siendo arrastrado por escorrentía hacia las fuentes de agua superficiales, por infiltración hacia los mantos freáticos y por volatilización a la atmósfera.

Actualmente, el tema de contaminación del suelo por el uso inadecuado e indiscriminado de estos fertilizantes nitrogenados, fosfatados y potásicos en las plantaciones de caña de azúcar, con baja densidad de plantas, se centran en la determinación de elementos tóxicos en general y la saturación en el suelo, que ocasiona los fertilizantes sintéticos; provoca otros problemas en la plantación, en la cual estos cultivos no pueden acceder a los micronutrientes disponibles en el suelo como son: el boro, el zinc, el magnesio entre otros, por la intoxicación provocada al suelo, reduciendo la producción en este rubro y aumentando las pérdidas para los productores.

Kingston (2014), citado por Claudia Urbina en la literatura “*Importancia de la nutrición mineral balanceada en caña de azúcar*”, reporta 13 elementos esenciales para el crecimiento y producción de la caña; clasificándolos por orden de importancia cuantitativa en seis Macronutrientes donde: “el Nitrógeno, Fósforo y Potasio, se denominan Nutrientes Primarios, mientras que el Calcio, Magnesio y Azufre, son Nutrientes Secundarios. Además, existen otros siete elementos, que incluyen al Boro, Zinc, Hierro, Manganeso, Cobre, Molibdeno y Cloro, que corresponden a los denominados Microelementos” (Urbina Zamora, Nutrición y Suelos, 2016, pág. 3).

Actualmente no existe ninguna investigación centrada en el impacto que causa el uso indiscriminado de estos fertilizantes en el suelo, en plantaciones con problemas de baja densidad y pérdida de vigorosidad de las mismas, por no acceder a los micronutrientes disponibles en el suelo, por lo tanto, este estudio puede ser motivo de otras investigaciones puntuales relacionadas con los efectos que causan al medio ambiente los fertilizantes (N-P-K).

Algunas investigaciones, demuestran que, debido a las altas concentraciones de estos fertilizantes nitrogenados, fosfatados y potásicos en el suelo, estos se filtran en las aguas subterráneas, las cuales, aunque sean tratadas, siempre se mantienen presentes partículas de agroquímicos que provocan enfermedades en la población humana y los animales,

como son: malformaciones y Cianosis en los lactantes, cáncer y enfermedades respiratorias en los adultos, así como abortos en los animales.

De acuerdo con una publicación del Diario Latino, en el marco de las Jornadas por el Medio Ambiente llevadas a cabo en la Universidad Centroamericana José Simeón Cañas (UCA), se realizó el foro: “*El rol de los fertilizantes químicos en El Salvador y las nuevas propuestas ecológicas*”; en el que se contó con la participación del Ingeniero del Centro Nacional de Tecnología Agropecuaria y Forestal (CENTA), Pablo Sanabria, quien expresó:

“Los fertilizantes son un modelo de agricultura que fue introducida en nuestro país entre los años 50s y 60s, fue promovido por el Departamento de Agricultura de Estados Unidos, con quien El Salvador firmó una serie de convenios” (Sanabria, 2019).

Además, el ingeniero también manifestó:

“que ahora se sabe que los agroquímicos tienen efectos nocivos, tanto para la salud de las personas, como para el medio ambiente. Dependiendo del manejo y del fertilizante, entre el 50 % y el 80% se pierde en el suelo; también las aguas con residuos de nitrógeno pueden provocar enfermedades respiratorias y cáncer. Algunos fertilizantes son responsables, en gran medida, de la contaminación ambiental y generan toxinas que provocan algunas enfermedades nerviosas”.

### 1.3 Objetivos

#### GENERAL:

- Determinar la contaminación causada por el abuso de fertilizantes que contienen nitrógeno, fósforo y potasio, como el 24.6-12-18.4 (N-P-K), en el cultivo de la caña de azúcar.

#### ESPECÍFICOS:

- Determinar la metodología actual de fertilización del suelo.
- Medir el grado de “contaminación al suelo por parte del fertilizante (24.6-12-18.4)” en el cultivo de caña de azúcar.
- Comparar el nivel de contaminación encontrado con tablas de tolerancia promedio.
- Desarrollar una propuesta de cambio de metodología de fertilización: Demostrar el beneficio de la utilización de drones y el software SlantView 2, para disminuir la contaminación del suelo por exceso del fertilizante (24.6-12-18.4), en el cultivo de caña de azúcar.

## **CAPÍTULO II.**

### **Marco teórico o referencial de la investigación**

#### **2.1 Antecedentes de la Investigación**

Los fertilizantes son un gran aliado para la producción agrícola y seguridad alimentaria, nacional y mundial, pero el uso indiscriminado de estos agroquímicos como los NPK, provocan serios daños de contaminación al suelo, por los siguientes procesos: por escorrentía, infiltración y lixiviación, afectando directamente a los recursos hídricos, o por volatilización, afectando la calidad del aire y por supuesto la salud de la población.

La zona a donde se desarrolló esta investigación, cantón el Achiotal, ubicado en la zona de Comalapa, en la ribera del río Jiboa, del municipio de San Pedro Masahuat, en el departamento de la Paz; está a una altura de 8.3 MSNM, (medido in situ), con temperaturas de 28 A 38 grados centígrados (Naturales, 2020), el suelo es franco arenoso, Suelos regosoles y aluviales, a nivel o ligeramente inclinados.

De abril a junio, se tuvo una precipitación de 628.8mm de lluvia (ver gráfico 12)., por ser un suelo costero marino, es un suelo con alta salinidad, tiene baja capacidad de intercambio catiónico, lo cual genera poca retención de nutrientes y alta saturación de sales minerales. La capacidad de intercambio catiónico tiene mucha relevancia en los rendimientos de cultivo en zonas costeras y se define como:

“La Capacidad de Intercambio Catiónico (CIC) 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 que las superficies pueden retener (Ca, Mg, Na, K, NH<sub>4</sub> etc.). Estos serán intercambiados por

otros cationes o iones de hidrogeno 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  $\text{cmolc/kg}$  o  $\text{meq/ 100g}$  de suelo”. (FAO.org, s.f.).

De acuerdo con la zona donde se desarrolló esta investigación, encontramos que el suelo por su textura es un suelo Franco-Arenoso, (50 arena, 10 de arcilla y 40 de limo), en 6 muestras, y suelo arenoso-franco, en 2 de las muestras (70 de arena, 20 de arcilla y 10 de limo). Conceptualmente, la página virtual Educarm.es, define los suelos francos de la siguiente manera:

“La textura ideal, porque tiene una mezcla equilibrada de arena, limo y arcilla. Esto supone un equilibrio entre permeabilidad al agua y retención de agua y de nutrientes”. (Servicios. Educarm. es., s.f., pág. 13)

Mientras que los suelos arenosos son definidos como:

“Los suelos arenosos se denominan suelos sueltos. Se caracterizan por tener una elevada permeabilidad al agua y por tanto una escasa retención de agua y de nutriente”. (Servicios. Educarm. es., s.f., pág. 13)

Diversos estudios científicos señalan la relación contaminante que existe entre los fertilizantes químicos y el agua. El exceso de nitrógeno y fósforo en el agua hace que Algas crezcan rápido. Estas proliferaciones son llamadas florecimientos. Su aumento significativo deteriora la calidad del agua, los alimentos, los hábitats, y reduce el oxígeno que los peces y otras especies acuáticas necesitan para vivir. Además, las floraciones de algas y la vegetación enraizada deterioran los usos recreativos, y darles un tratamiento a estas aguas es bastante costoso.

El agua subterránea, los lagos y ríos son fuentes de abastecimiento de agua potable, puede ser nociva si están contaminadas por nutrientes, incluso si la contaminación es leve. Las consecuencias de los contaminantes en agua son diversas en la salud humana, como lo menciona Cárcamo en su libro *“La contaminación por nutrientes por nitrógeno y fósforo”* ; “Una persona podría enfermarse si entra en contacto o consume agua contaminada por florecimientos de algas, consume pescado o moluscos contaminados, ya que producen cantidades elevadas de toxinas y crecimiento bacteriano, que pueden causar serios problemas de salud incluyendo: Erupciones, enfermedades estomacales o hepáticas, problemas respiratorios, afecciones neurológicas.

Cuando los desinfectantes utilizados para tratar el agua potable reaccionan con algas tóxicas, se pueden crear sustancias químicas nocivas denominadas dioxinas. Estos subproductos se han relacionado con los riesgos para la salud reproductiva y de desarrollo, e incluso con el cáncer.

El nitrato, un compuesto que se encuentra en los fertilizantes, a menudo contamina el agua potable en las zonas agrícolas. Los altos niveles de nitratos también causan problemas en las fuentes de agua potable. Los lactantes son vulnerables a los nitratos”. (Cárcamo L. M., 2017)

La demanda de productos agrícolas para el mercado y seguridad alimentaria, aunado al agotamiento de los suelos por prácticas inadecuadas, genera aplicaciones excesivas de fertilizantes, los cuales las plantas no absorben por varios factores como son: antagonismo con otros nutrientes, características físicas y químicas del suelo o por baja densidad de plantas, afectando de esa forma los recursos hídricos, el aire y por supuesto el suelo, al saturarse de estos agroquímicos.

Por lo tanto, es necesario tener en cuenta también, que los fertilizantes deben ser utilizados como última instancia, porque las opciones anteriores no funcionaron favorablemente debido al agotamiento de dichos productos, así mismo es importante realizar elecciones menos contaminantes como la utilización de abonos orgánicos en los

suelos, antes de usar fertilizantes químicos. Además de esto debe evitarse el uso excesivo de los mismos, puesto que los suelos reaccionan favorablemente al comienzo, pero si es utilizado continuamente puede ser negativa con el tiempo, si con el uso desmedido de fertilizantes, se pretende aumentar el rendimiento de la producción agrícola, en esos momentos dicho producto pierden su acción beneficiosa y pasan a ser contaminantes del suelo. Es así como para cada tipo de necesidad, se debe aplicar el fertilizante adecuado. Por otro lado, la cantidad de cada uno debe tenerse en cuenta y el límite de aplicación también.

Si bien estos insumos agrícolas, han ayudado a impulsar la producción alimentaria, también han dado lugar a amenazas ambientales y problemas de salud humana. Por esta razón es importante tomar en cuenta, los efectos beneficiosos de los fertilizantes NPK, en los resultados de la producción y los impactos negativos en las cosechas, debido a que las plantas no pueden acceder a los micronutrientes por el efecto de antagonismo entre elementos. Otro impacto negativo es la contaminación a los recursos hídricos por nitratos en las aguas subterráneas, atmosfera y la salud de la población de la zona que se beneficia de estos recursos, por la aplicación excesiva de estos fertilizantes. Según la FAO el uso de fertilizantes se incrementó considerablemente en el último siglo:

“El auge de la productividad agrícola mundial que siguió a la Segunda Guerra Mundial se logró en gran parte a través del uso intensivo de insumos, como plaguicidas y fertilizantes químicos.

Desde 1960, el uso de fertilizantes minerales se ha multiplicado por diez, mientras que desde 1970 las ventas mundiales de plaguicidas pasaron de cerca de 1 000 millones de dólares EEUU anuales, a 35 000 millones de dólares al año”. (FAO-Agronoticias:, 2018, pp. párrafo 7 - 9).

Existen documentación relacionada con la contaminación de los suelos por efectos de los fertilizantes NPK y las consecuencias de estos en la salud humana, de forma general.

A la fecha no existe información específica, sobre los impactos y consecuencias de la contaminación de los suelos, por efecto de fertilizantes NPK, en cultivos de caña de azúcar, con baja densidad de plantas.

## **2.2 Recurso Suelo.**

El suelo es considerado un recurso natural, muy valioso y por la cantidad de años que tarda en formarse, se considera un recurso no renovable. Es importante porque sobre este recurso, se realizan las múltiples actividades de desarrollo, especialmente las agrícolas, Calvo (1999) describe que:

“El suelo es un recurso vital. Es el soporte físico sobre el que se asientan todos los seres vivos. Es también la fuente primordial de materias primas y constituye uno de los elementos básicos del medio natural. Desde hace siglos la humanidad ha utilizado el suelo para desarrollarse y conseguir mejorar sus condiciones de vida. Sobre él se realizan todos los procesos de producción del hombre, como la agricultura, la industria, las infraestructuras urbanas, etc.” (Calvo, La contaminación del suelo, 1999, pág. 9).

El suelo es fuente de vida para la población, el hogar de la fauna y flora del planeta, en él ocurren múltiples actividades, razón por la cual debemos hacer los mayores esfuerzos para lograr el uso sostenible de este recurso. La demanda de alimentos y otros bienes agrícolas, han promovido el uso excesivo de los agroquímicos, causando el deterioro de la calidad de este recurso, así como las variables ambientales de las zonas intervenidas, de igual forma sus condiciones físicas y químicas, el suelo se compone de diversos elementos. Montes (2020) enumera estos elementos de la siguiente manera:

“Está compuesto por minerales, materia orgánica, diminutos organismos vegetales y animales, aire y agua. Es una capa delgada que se ha formado muy lentamente, a través de los siglos, con la desintegración de las rocas superficiales por la acción del agua, los cambios de temperatura y el viento. Las plantas y animales que crecen y mueren dentro y sobre el suelo son descompuestos por los microorganismos, transformándose en materia orgánica y mezclados con el suelo”. (Montes, Nociones Ambientales Básicas para profesores rurales y extensionistas / enseñanza rural y ecología, 2020, pág. 1).

### **2.2.1 Importancia de los suelos**

Tal como hemos visto, el recurso suelo, ha sufrido daños por las acciones del hombre, muchas veces estas acciones han causado daños irreversibles y el costo de revertirlos es tan alto que se vuelven suelos marginales. El suelo como recurso primario para el desarrollo humano debería de ser protegido sobre los intereses individuales ante esto López- Acevedo (1994) expresa lo siguiente:

“Antes de la década de los 70 se hablaba de la contaminación del aire y del agua, pero al suelo se le consideraba con una capacidad de autodepuración casi infinita. La sensibilidad mundial comenzó a cambiar a partir de la declaración de la “Carta Europea de Suelos” desarrollada por la Comunidad Europea en 1972, la cual define el suelo como uno de los más preciados activos de la humanidad sobre el que viven hombres, animales y plantas, lo califica como un recurso limitado fácilmente destructible y manifiesta que debe ser protegido contra la erosión, la contaminación, el daño que puede causar el desarrollo urbano, y las prácticas agrícolas y silvícolas, para acabar afirmando que los Gobiernos y personas con autoridad deben impulsar medidas específicas para planificar y administrar los recursos del suelo”. (López- Acevedo, La Contaminación del Suelo., 1994, pág. 10)

Debido a la importancia que tiene el recurso suelo para el desarrollo sostenible de la vida humana y al deterioro acelerado a que está siendo sometido, ha sido urgente buscar los mecanismos legales y globales para minimizar los impactos negativos causados por el hombre. Las diferentes organizaciones han tratado de encontrar mecanismos que ayuden a este proceso. Según el Real Decreto 9 (2005), citado por López-Acevedo (1994, pág. 10) menciona que:

“fue en el año 1992, en la Cumbre de Río, donde se reconoció la importancia de la protección de los suelos y de sus usos potenciales en el contexto de un desarrollo sostenible, en particular contra la contaminación procedente de acciones o actividades de origen antrópico.

La contaminación es uno de los problemas más importantes del suelo y se asocia con la entrada de sustancias que, a partir de una cierta concentración deben considerarse como no deseables”. (Porta & López Acevedo, 1994, pág. 10)

“Es componente de la Biosfera y actúa como amortiguador natural de elementos y sustancias químicas hacia la atmósfera, la hidrosfera y la biota, razón por la cual, es muy importante la responsabilidad de todos, sobre los cuidados para asegurar el desarrollo sostenible de este recurso, el cual es limitado”. (Pendias, 1992, pág. 9)

Es necesario que las leyes, protocolos y acuerdos internacionales sean de dominio público, con énfasis en crear conciencia de la importancia del suelo para poder darle su debida protección, pero los acuerdos entre países suelen ser limitados por los intereses económicos.

### **2.2.2 Propiedades Físicas del Suelo**

Con el fin de realizar un buen programa de fertilización y planear una buena producción de las cosechas, es muy importante conocer las propiedades físicas del suelo, esto permitirá hacer acciones específicas, para minimizar los riesgos de saturarlo de estos agroquímicos, que no podrán ser absorbidos por las plantas. De acuerdo con las necesidades agrícolas, para obtener un buen desarrollo radicular de las plantas, es necesario que el suelo tenga los elementos básicos para este fin, de acuerdo con la página Educarm.es, el suelo se define de la siguiente manera:

“El suelo es una mezcla de Materiales sólidos, líquidos y gaseosos. La adecuada relación entre estos componentes determina la capacidad de hacer crecer las plantas y la disponibilidad de suficientes nutrientes para ellas. La proporción de los componentes determina una serie de propiedades que se conocen como propiedades físicas o mecánicas del suelo: textura, estructura, color, permeabilidad, porosidad, drenaje, consistencia, profundidad efectiva”. (servicios.educarm.es, 2020, págs. 2, 3, 15).

#### **a) *Textura.***

La clasificación de suelo está definida por el tamaño de partículas, estas pueden ser de clase extrema y clase textural ideal. Dependiendo de las diferentes zonas a donde se encuentren o del material parental del cual se formaron estos suelos, así será su textura, lo cual lo hace apto para ciertos cultivos, de acuerdo con la FAO:

“Clases extremas: arenosa y arcillosa. Los suelos arenosos se denominan suelos sueltos. Se caracterizan por tener una elevada permeabilidad al agua y por tanto una escasa retención de agua y de nutrientes. Los suelos arcillosos se denominan suelos

pesados o fuertes. Presentan baja permeabilidad al agua y elevada retención de agua y de nutrientes”. (FAO P. d., 2006, párrafo 1).

Clase textural ideal: suelos francos entre la textura arenosa y la arcillosa se encuentran las otras 10 clases, con características intermedias entre ambas. La textura franca se considera la textura ideal, porque tiene una mezcla equilibrada de arena, limo y arcilla. “Esto supone un equilibrio entre permeabilidad al agua y retención de agua y de nutrientes”. (servicios.educarm.es, 2020, pág. 13)

#### **b) Estructura:**

Es cómo está conformado el suelo estructuralmente es una de las variables más importantes de tener en cuenta cuando se realizan proyectos de agrícolas, esta característica limita la aireación de las raíces, temperatura, crecimiento etc. En la parte nutricional el suelo con una mala estructura, suelen ser terrenos con poco valor agrario, la valoración de la (FAO) se lee entre las siguientes líneas:

“La estructura del suelo afecta directamente la aireación, el movimiento del agua en el suelo, la conducción térmica, el crecimiento radicular y la resistencia a la erosión. El agua es el componente elemental que afecta la estructura del suelo con mayor importancia debido a su solución y precipitación de minerales y sus efectos en el crecimiento de las plantas”. (FAO P. d., s.f.).

La estructura de suelo es clasifica por sus diferentes características, por la forma como se han desarrollados los suelos, Educarm.es, los divide en:

Laminar: Los agregados tienen forma aplanada, con predominio de la dimensión horizontal. Las raíces y el aire penetran con dificultad.

En bloques. Angulares o subangulares. Los agregados tienen forma de bloque, sin predominio de ninguna dimensión.

Prismática. Los agregados tienen forma de prisma, de mayor altura que anchura. Es típico de suelos con mucha arcilla.

Columnar. Semejante a la estructura prismática, pero con la base redondeada. Ésta estructura es típica de suelos envejecidos.

Granular: Los agregados son esferas imperfectas, con tamaño de 1 a 10 mm de grosor. Es la estructura más ventajosa, al permitir la circulación de agua y aire”. (servicios. Educarm.es, s.f., pág. 18).

### ***c) Profundidad del suelo.***

El suelo tiene la capacidad de retener agua o facilitar su infiltración. El encharcamiento del suelo o el drenaje del agua hacia las capas inferiores se conocen como la capacidad de campo, el cual puede ser un suelo poco profundo o con muy buena profundidad; según la FAO la espesura del suelo se define:

“Profundidad Efectiva del Suelo (cm), La definición original del solum se denominaba la capa superficial del suelo (horizonte A) junto con el subsuelo (E y B). El horizonte C se definía como estratos con poca formación edafogénica. De este modo la profundidad efectiva del suelo fue considerada como la espesura del suelo. Sin embargo, la presencia de raíces y la actividad biológica que frecuenta a menudo”. (FAO P. d., 2006, párrafo 2).

#### ***d) Color del suelo.***

Los suelos tienen diferentes colores, lo cual dependerá de la presencia de materiales orgánicos o minerales, esta característica es de mucha ayuda para determinar elementos presentes en el suelo, lo cual puede observarse claramente en un horizonte, la FAO también define el color de suelo tomando en cuenta sus componentes:

“El color del suelo depende de sus componentes y varía con el contenido de humedad, materia orgánica presente y grado de oxidación de minerales presentes. Se puede evaluar como una medida indirecta ciertas propiedades del suelo. Se usa para distinguir las secuencias en un perfil del suelo, determinar el origen de materia parental, presencia de materia orgánica, estado de drenaje y la presencia de sales y carbonato”. (FAO P. d., 2006, párrafo 6).

#### ***e) Consistencia del suelo.***

La consistencia del suelo es importante para los usos que pueda ser requerido. Especialmente para las actividades agrícolas, la consistencia puede ayudar a verificar la retención de agua y nutrientes, o la falta de estos materiales. De acuerdo con la FAO, define la consistencia como:

“La consistencia es la propiedad que define la resistencia del suelo a la deformación o ruptura que pueden aplicar sobre él. Según su contenido de humedad la consistencia del suelo puede ser dura, muy dura y suave. Se mide mediante tres niveles de humedad; aire-seco, húmedo y mojado. Para la construcción sobre él se requiere medidas más precisas de resistencia del suelo antes de la obra”. (FAO p. d., 2006, párrafo 7).

### ***f) Porosidad del suelo***

La porosidad del suelo en general es de un 50% importante para una mayor retención de agua y demás nutrientes, la FAO define el volumen de este en las siguientes líneas:

“El espacio poroso del suelo se refiere al porcentaje del volumen del suelo no ocupado por sólidos. En general el volumen del suelo está constituido por 50% materiales sólidos (45% minerales y 5% materia orgánica) y 50% de espacio poroso. Dentro del espacio poroso se pueden distinguir macro poros y microporos donde agua, nutrientes, aire y gases pueden circular o retenerse. Los macro poros no retienen agua contra la fuerza de la gravedad, son responsables del drenaje, aireación del suelo y constituyen el espacio donde se forman las raíces. Los microporos retienen agua y parte de la cual es disponible para las plantas”. (FAO P. d., 2006, párrafo 8).

### ***g) Densidad del Suelo***

La densidad de suelo es la masa contenida por unidad de volumen, mediante la determinación de la densidad de suelo se puede obtener la porosidad total del suelo.

La densidad del suelo es especialmente importante porque constituye el medio por el cual el agua penetra al suelo y pasa a través de él para abastecer a la raíz y finalmente drenar el área; y también el espacio donde las raíces de las plantas y la fauna tienen una atmósfera, la FAO lo explica de la siguiente forma:

“Se refiere al peso por volumen del suelo. Existen dos tipos de densidad, real y aparente. La densidad real, de las partículas densas del suelo, varía con la proporción de elementos constituyendo el suelo y en general está alrededor de 2,65. Una densidad aparente alta indica un suelo compacto o tenedor elevado de partículas granulares

como la arena. Una densidad aparente baja no indica necesariamente un ambiente favorecido para el crecimiento de las plantas”. (FAO p. d., 2006, párrafo 9).

### ***2.2.3 Propiedades químicas del suelo.***

El suelo también tiene propiedades químicas y es importante conocerlas, para tener las bases técnicas para poder realizar aplicaciones puntuales de agroquímicos, a fin de no causar más daños al agroecosistema local, por las intervenciones agrícolas.

#### ***a) Capacidad de Intercambio Catiónico (CIC):***

Dependiendo de las condiciones o zonas a donde se ubique un suelo determinado, este tendrá diferencia en su capacidad de intercambio catiónico, lo cual es importante para la fertilidad del suelo, ya que un suelo con alta o baja capacidad de intercambio catiónico, tendrá diferentes niveles de fertilidad, por la capacidad de retener o carecer de humedad y nutrientes. De acuerdo con la FAO, define la Capacidad de intercambio Catiónico del suelo como:

“La Capacidad de Intercambio Catiónico (CIC) 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 que las superficies pueden retener (Ca, Mg, Na, K, NH<sub>4</sub> etc.). Estos serán intercambiados por otros cationes o iones de hidrogeno 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 cmolc/kg o meq/ 100g de suelo”. (Agricultura, 2020, párrafo 1).

***b) El pH del Suelo:***

El pH del suelo es una de las limitantes más importantes en la parte nutricional de las plantas, porque los elementos se verán afectados según sea su valor ácido o alcalino, porque pone a la disposición los nutrientes necesarios para las plantas este valor debe rondar 6,5 para la mayoría de cultivos considerando algunas excepciones la FAO (2020) detalla las propiedades químicas de la siguiente manera:

“El pH (potencial de hidrógeno) 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”. (Agricultura, 2020, párrafo 2)

### ***c) Porcentaje de Saturación de Bases:***

La saturación de bases, es importante para saber qué tan ácido está un suelo y cómo puede afectar para un cultivo determinado, conociendo el nivel de acidez del suelo, puedo saber la cantidad de neutralizador que ese suelo necesita. De acuerdo con la FAO, dice que:

“En el suelo se encuentran los cationes ácidos (hidrógeno y aluminio) y los cationes básicos (calcio, magnesio, potasio y sodio). La fracción de los cationes básicos que ocupan posiciones en los coloides del suelo se refiere al porcentaje de saturación de bases. Cuando el pH del suelo indica 7 (estado neutral) su saturación de bases llega a un 100% y significa que no se encuentran iones de hidrógeno en los coloides. La saturación de bases se relaciona con el pH del suelo. Se utiliza únicamente para calcular la cantidad de limo requerida en un suelo ácido para neutralizarlo”. (Agricultura, 2020, párrafo 3).

### ***d) Nutrientes para las Plantas:***

Las plantas requieren de diferentes elementos para lograr un desarrollo óptimo vegetativo, la naturaleza brinda estos elementos, sin embargo, cuando un suelo es sobre explotado se vuelve de suma importancia realizar labores de mitigación en función de las necesidades, la FAO clasifica en macro y micro los nutrientes y los enumera en el siguiente listado:

“Los 16 nutrientes esenciales para el desarrollo y crecimiento de las plantas se suelen clasificar entre macro y micro nutrientes dependiendo de su requerimiento para el desarrollo de las plantas. Los macronutrientes se requieren en grandes cantidades e incluyen Carbono(C), Hidrógeno (H), Nitrógeno(N), Fósforo (P), Potasio (K), Calcio (Ca), Magnesio (Mg), Azufre(S). Los micronutrientes por otro lado se requieren en

pequeñas, su insuficiencia puede dar lugar a carencia y su exceso a toxicidad, se refieren a Hierro (Fe), Zinc (Zn), Manganeseo (Mn), Boro (B), Cobre (Cu), Molibdeno (Mo), Cloro (Cl)”. (Agricultura, 2020, párrafo 4).

***e) Carbono Orgánico del Suelo:***

El carbono orgánico es de gran importancia para la salud del suelo, permite los intercambios en el ciclo biogeoquímico en las diversas capas de la tierra para que exista la vida, ayuda a mejorar la disponibilidad de otros nutrientes presentes en el suelo, proporcionando rendimiento de los cultivos. Según la literatura de la FAO dice:

“La vegetación fija el carbono de la atmósfera por fotosíntesis transportándolo a materia viva y muerta de las plantas. Los organismos del suelo descomponen esta materia transformándola a Materia Orgánica del Suelo (MOS). El carbono se libera de la biomasa para la MOS, en organismos vivos por un cierto tiempo o se vuelve a emitir para la atmósfera por respiración de los organismos (organismos del suelo y raíces) en forma de dióxido de carbono,  $CO_2$ , o metano  $CH_4$ , en condiciones de encharcamiento en el suelo. 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 resultan más rápidas en digerir para los microorganismos, resultando en respiración de carbono y plazo de permanencia más corto en el suelo. Las fracciones húmicas se encapsulan en los agregados del suelo y son más difíciles para acceder. Además, su composición es más estable con químicos más complejos de descomponer y permanecen por periodos muy largos en el suelo. 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 disponibilidad los minerales para las plantas y regulador del pH del suelo. Se reconoce globalmente que el tenor de carbono orgánico en el suelo sea un factor fundamental para la salud del suelo, forma parte fundamental del Ciclo de Carbono y tiene gran importancia en la mitigación a los efectos del cambio climático”. (Agricultura, 2020, párrafo 5).

***f) Nitrógeno del Suelo:***

El nitrógeno, importante para el desarrollo de las plantas, es uno de los Macronutrientes para un buen desarrollo agrícola, es un elemento que posee alta volatilidad y contribuye a la contaminación atmosférica, de acuerdo con la FAO, define al nitrógeno como:

“El nitrógeno del suelo es uno de los elementos de mayor importancia para la nutrición de las plantas y más ampliamente distribuido en la naturaleza. Se asimila por las plantas en forma catiónica de amonio  $\text{NH}_4^+$  o aniónica de nitrato  $\text{NO}_3^-$ . A pesar de su amplia distribución en la naturaleza se encuentra en forma inorgánica por lo que no se pueden asimilar directamente.

Además, existen las formas gaseosas del N pero son muy pequeñas y difíciles de detectar como óxido nitroso ( $\text{N}_2\text{O}$ ), óxido nítrico (NO), dióxido de nitrógeno ( $\text{NO}_2$ ), amoníaco ( $\text{NH}_3$ ) y nitrógeno molecular presente en la atmósfera del suelo ( $\text{N}_2$ )”. (Agricultura, 2020, párrafo 6)

***g) La salinización del suelo:***

La salinización en los suelos se refiere al proceso de acumulación de sales solubles en agua. Esto puede darse en forma natural o artificial en el caso de las aplicaciones agrícolas. Suelos salinos dañan de manera profunda las raíces e impide que las plantas

expresen todo su potencial productivo. Si la salinidad del suelo es muy alta, las raíces de la planta se vuelven incapaces de absorber agua y por tanto se marchitan y mueren. La FAO define la salinidad del suelo de la siguiente manera:

“Se refiere a la acumulación de sales solubles en agua en el suelo. Las sales que se pueden encontrar en un nivel freático salino se transportan con el agua a la superficie del suelo mediante ascenso capilar y una vez que el agua se evapora se acumulan en la superficie del suelo. La salinización suele ocurrir con manejo de riego inapropiado sin tomar en consideración el drenaje y lixiviación de las sales por fuera de los suelos. Las sales también se pueden acumular naturalmente o por la intrusión de agua marina. La salinización elevada en el suelo lleva a la degradación de los suelos y la vegetación. Las sales más comunes se encuentran en combinaciones de los cationes de sodio, calcio, de magnesio y de potasio con los aniones de cloro, sulfato y carbonatos”. (Agricultura, 2020, párrafo 7).

#### ***h) La alcalinización del suelo:***

Un suelo alcalino posea limitaciones para la movilidad de muchos elementos, puede ser un suelo con poca permeabilidad de agua y nutrientes, por ende, estos suelos se consideran como suelos pobres y a veces áridos. Ante esto la FAO los describe de la siguiente forma:

“La alcalinización, o sódica del suelo, se define como el exceso de sodio intercambiable en el suelo. A medida que su concentración incrementa en el suelo empieza a reemplazar otros cationes. Los suelos sódicos se frecuentan en regiones áridas y semiáridas y se encuentran muchas veces inestables con propiedades físicas y químicas muy pobres. Debido a ello el suelo se encuentra impermeable disminuyendo la infiltración, percolación, infiltración del agua por el suelo y por último el crecimiento de las plantas”. (Agricultura, 2020, párrafo 8)

### *i) Contenido de carbonato de calcio en el suelo:*

La presencia de este elemento en el suelo, en cantidades arriba de lo normal, genera antagonismo con otros elementos, los cuales no están disponibles para las plantas, debido al exceso de este elemento. La FAO, lo define con las siguientes palabras:

“El carbonato de calcio,  $\text{CaCO}_3$ , es una sal poco soluble que se encuentra naturalmente en varias formas y en varios grados de concentración en el suelo. Su presencia juega un papel fundamental en la estructura del suelo si se encuentra en concentraciones moderadas. Se utiliza como enmienda para neutralizar el pH de suelos ácidos y para suministrar el nivel de Calcio (Ca) para la nutrición de las plantas. Sin embargo, puede resultar problemático si su concentración llega a exceder la capacidad de adsorción en el suelo formando complejos insolubles con otros elementos. Estos componentes son difíciles de asimilar por las plantas llevando a su acumulación. Cantidades excesivas de calcio puede por ello restringir la disponibilidad de fósforo, boro y hierro para las plantas”. (Agricultura, 2020, párrafo 9)

#### **2.2.4 Contaminación de suelos por fertilizantes (N-P-K).**

El uso indiscriminado de fertilizantes nitrogenado, fosfatados y potásicos, provocan contaminación al suelo y los excedentes o remanentes de estos agroquímicos, se suman a los efectos de invernaderos por volatilización o se suman a los recursos hídricos por los efectos de lixiviación, infiltración o por escorrentía, así como el antagonismo para otros nutrientes de importancia en los cultivos. Cárcamo y Martínez lo denominan como:

El uso indiscriminado de fertilizantes nitrogenados produce efectos negativos al ambiente como: acidificación de suelos, contaminación de mantos acuíferos (lixiviación

de nitratos) y emisión de óxidos de nitrógeno a la atmósfera (volatilización de óxido nitroso y óxido nítrico).

Los fertilizantes inorgánicos, al no ser absorbidos por las plantas, constituyen una fuente de contaminación para el aire y el agua, provocando focos potenciales de enfermedades en el hombre, animales y plantas, afectando las propiedades químicas y biológicas del suelo.

### **2.2.5 Contaminación del suelo por Nitrógeno**

El nitrógeno, es importante para el desarrollo de las plantas, pero es perjudicial especialmente a la población, al no tener en cuenta las propiedades físicas y químicas del suelo, ya que se pueden hacer aplicaciones de este producto y causar daños a los recursos naturales, como es el recurso hídrico y el aire, afectando la salud de la población por efectos de este elemento en el ambiente de la zona.

En relación con la contaminación del suelo por el uso de nitrógeno, la revista Eco Actual (2018) menciona que:

“Se ha relacionado con el cáncer gástrico, el bocio, las malformaciones de nacimiento, la hipertensión y el cáncer de testículo. Aunque el efecto mejor conocido que sobre la salud tiene el consumo de agua contaminada por nitratos es la metahemoglobinemia.

Es un trastorno especialmente pernicioso para los lactantes, que produce el conocido síndrome del bebé azul, y cuya causa es la disminución del oxígeno en la sangre que le produce cianosis. El riesgo de padecerlo aumenta exponencialmente cuando los

lactantes toman biberón cuya agua está contaminada con nitratos (Martínez, 2018. párrafo 5- 6).

El Nitrógeno es el elemento más abundante en el aire y junto al fósforo constituyen los nutrientes naturales presentes en los ecosistemas acuáticos; ayudando al crecimiento de algas y plantas, que brindan alimento y un hábitat a peces, moluscos y otros organismos. Sin embargo, cuando demasiado nitrógeno y fósforo ingresan a un medio, generalmente provenientes de diversas actividades humanas el aire, el agua y el suelo pueden contaminarse”. (Cárcamo L. M., 2017, párrafo 1- 4).

FUSADES planteó en una notica que el exceso de la aplicación de nitrógeno en el suelo causa daños a la salud de la población y a la vida acuática de la zona. Sin embargo, el nitrógeno es uno de los elementos más explotadas por la agricultura por su relación nutrición con el crecimiento vegetativo, además en términos económicos resulta el más barato. Esto agudiza el problema nacional con el uso excesivo de estos elementos.

Por lo antes mencionado se puede decir que el exceso de fertilizantes causa ciertos Impactos ambientales, únicamente el 50% del nitrógeno que proporciona el fertilizante es aprovechado por las plantas y el otro 50% es desperdiciado, ya sea por arrastre de las lluvias hacia ríos, filtración hacia las aguas subterráneas, terminando de contaminar las aguas para consumo humano, Álvarez lo denomina como:

“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 absorbido”. (Alvarez, 2016, párrafo 14).

Se conoce los efectos nocivos de un elemento tan importante en el desarrollo agrícola, por lo que se debe considerar las condiciones físicas y químicas del suelo, así como las condiciones del cultivo, para decidir hacer una aplicación de este producto y minimizar los efectos nocivos por el uso indiscriminado de este producto como es el nitrógeno.

El principal factor responsable de la contaminación de las aguas superficiales y subterráneas por nitratos es la agricultura, cuando estos son aplicados de forma excesiva.

### **2.2.6 Contaminación del suelo por Fosfatos:**

El fosfato, es otro de los elementos importante para tener una buena producción agrícola, así como puede ser beneficioso, también puede ser nocivo, para las plantas, para el medio ambiente y por supuesto para la población misma. Cuando existe altas concentraciones de Fósforo en el suelo, debido a su poca movilidad, este, aunque este ahí, no está disponible para las plantas, además por sus altas concentraciones en el suelo, provoca lo que se llama Fosfatación de los suelos y genera antagonismo con otros elementos como el Calcio, Magnesio, Boro y otros microelementos que son importantes para una buena producción Agrícola. Debido a que no es absorbido por las plantas, puede ser lixiviado o por escorrentía ser arrastrado hacia los mantos freáticos, generando la eutroficación de estos cuerpos de agua, provocando de esta forma, contaminación de los suelos, contaminación de cuerpos de agua y afectando la salud de la población que hace uso de estos recursos. De acuerdo con Echeverri en el trabajo de dinámica del fósforo expresa lo siguiente:

“El fósforo, después del nitrógeno, es el elemento más crítico para la producción agropecuaria; pero su disponibilidad es cada vez más limitada debido a la progresiva insuficiencia de sus fuentes naturales, su relativa escasez edáfica, elevada retención por parte de la matriz del suelo, la falta de reposición natural y su baja movilidad

comparada con la de otros nutrientes, la movilidad y concentración del fósforo en los suelos es muy baja si se compara con la de otros nutrientes; se presentan coeficientes de difusión del fosfato en el suelo de  $0,3-3,3 \times 10^{-13} \text{ m}^2/\text{s}$  y su concentración en la solución del suelo es de 0,02 ppm. Es por esto que se hace necesaria la aplicación excesiva de fertilizantes fosforados a los suelos con el objetivo de suplir la alta demanda de este nutriente por parte de las plantas; sin embargo, el exceso de aplicación de fosfatos incrementa la pérdida potencial por escorrentía superficial, lo cual puede acelerar los procesos de eutroficación en cuerpos de agua. Además, se conoce que cerca de 90% de esos insumos se precipitan como formas insolubles de fosfato tricálcico ( $\text{Ca}_3\text{PO}_4$ ) en suelos alcalinos, y fosfato de hierro ( $\text{FePO}_4$ ) o fosfato de aluminio ( $\text{AlPO}_4$ ) en suelos ácidos (Achal et al., 2007; Banerjee et al 2010), que no son utilizables por las plantas lo cual favorece su acumulación. Ese fosfato no disponible que está presente en los suelos sería suficiente para mantener la máxima productividad en las cosechas por cerca de 100 años (Khan et al., 2007; Beltrán, 2014). En el suelo existen diferentes fuentes de fósforo que pueden ser categorizadas como fósforo inorgánico y orgánico. La distribución de las diferentes formas de fósforo en el suelo depende de factores que incluyen tipo de suelo, pH, tipo de vegetación, actividad microbiana y entradas de fertilizantes” (Echeverri, 2018, págs. 22, 23).

Las características físicas y químicas del suelo, así como factores ambientales como la temperatura y las precipitaciones, son un factor importante a considerar, para la aplicación de fertilizantes, especialmente los fosfatados, ya que de estos factores dependerán las altas concentraciones de presencia de Fosfatos en el suelo y disponibles para las plantas o la ausencia de este, por los procesos de lixiviación, volatilización o por la poca movilidad de este elemento, generará antagonismo para otros micronutrientes necesarios para la planta y los problemas de eutroficación de recursos hídricos, contaminación de los suelos y del airea por este elemento.

El problema ambiental de los fosfatos es que pasan del suelo al acuífero, como el caso del N, produciendo un fenómeno que se conoce como eutrofización de las aguas. Es importante mencionar que el exceso de estos fertilizantes fosfatados en el suelo, en zonas donde las plantas no lo absorben, se genera un proceso de mineralización, alterando el PH del suelo, el antagonismo para otros micronutrientes de las plantas, así como los lixiviados que pueden pasar al manto freático y contaminar los cuerpos de agua, afectando la salud de la población, que hace usos de estas fuentes de agua, Ramírez menciona que:

“Si el pH es ácido, la solubilidad del aluminio y del hierro es alta. Estos compuestos precipitan con el fósforo como compuestos insolubles. En pH alcalino, es decir, superior a 7.5, el calcio aumenta su solubilidad y reacciona con los fosfatos precipitándolos y formando compuestos Insolubles como la apatita; por lo tanto, el fósforo presenta su mayor disponibilidad con pH entre 6.5 y 7.5, siendo en ese rango donde se presenta la mayor mineralización de compuestos de fósforo orgánico y mineral”. (Ramírez, propiedades físicas, químicas y biológicas, 1997, pág. 14)

Es necesario mencionar que el Fósforo insoluble es el que está formando parte de los minerales primarios y secundarios, constituyendo la gran reserva de fósforo inorgánico en el suelo; dicha insolubilidad se puede deber a la precipitación como fosfatos cálcicos en medio alcalino, o como fosfatos de hierro y aluminio en medio ácido. Tanto en suelos ácidos como alcalinos, el fósforo tiende a sufrir una cadena de reacciones que producen compuestos fosforados de baja solubilidad. Por lo tanto, durante el largo tiempo que el fósforo permanece en el suelo, principalmente las formas menos solubles, y por ende las menos disponibles para la planta, tienden a aumentar.

Cuando se agrega fósforo soluble al suelo, casi siempre ocurre una rápida reacción de unas pocas horas que remueve el fósforo de la solución fijando el fósforo. Posteriormente se dan lentas reacciones que van reduciendo la solubilidad durante meses o años, según la edad de los compuestos fosfatados. El fósforo recientemente fijado puede ser débilmente

soluble y de algún valor para las plantas. Con el tiempo, la solubilidad del fósforo fijado tiende a decrecer a niveles extremadamente bajos dándole un envejecimiento al fósforo, Sanzano lo determina así:

“El fósforo inorgánico remanente en el suelo no está disponible para las plantas. De este modo, la capacidad de reposición de fósforo en estos suelos perturbados comienza a bajar tan rápidamente que la recuperación de la vegetación natural es pobre, o en las tierras desmontadas para uso agrícola, muy pronto los cultivos disminuyen sus rendimientos. La cantidad de fósforo que ingresa al suelo desde la atmósfera (adsorbido en las partículas de polvo) es muy pequeña (0,05 a 0,5 kg/ha año), pero puede balancearse con las pérdidas en los ecosistemas de bosques vírgenes o de pasturas naturales.

Los principales problemas ambientales relacionados al fósforo del suelo son la degradación de tierras causada por la escasa cantidad de fósforo disponible y la eutrofización acelerada causada por el exceso del mismo. Para detener y revertir este tipo de degradación de tierras se requerirá un buen manejo del ciclo del fósforo para hacer un uso eficiente de los escasos recursos”. (Sanzano, El fósforo del suelo, 2020, pág. 2-3).

De acuerdo con esta información, conocemos los efectos beneficiosos para las plantas y los efectos nocivos de los fosfatos y el impacto negativo en el medio ambiente, especialmente en los cuerpos de agua, causando eutrofización y afectando la vida acuática de estas zonas, por lo que se debe tomar en cuenta estos aspectos antes de hacer una intervención con estos productos en las zonas del cultivo.

**Determinación de fósforo (P).**

	RANGO	CATEGORÍA
<b>Fósforo Olsen ppm (mg/kg)</b> <b>1 ppm = 1 mg/kg de suelo.</b>	<5.0	Muy Bajo
	5.1 – 10.0	Bajo
	10.1– 20.0	Medio
	20.1– 30.0	Alto
	> 30.1	Muy alto

*Tabla 1. Rangos y categorías del fósforo en el suelo. (Ovidio Sandoval)*

Esta tabla, determina el rango de fósforo en el suelo y nos ayuda para conocer la categoría de: muy bajo, bajo, medio, alto y muy alto, de acuerdo con los resultados del análisis de suelo en el laboratorio.

### **2.2.7 Contaminación del suelo por Potasio:**

El potasio K, es importante para el desarrollo de la vida, especialmente para las actividades de producción agrícola, razón por la cual es importante considerar los impactos de este elemento, cuando su aplicación es desmedida y sin control.

El potasio se puede encontrar en diversas formas; si se encuentra insoluble la planta no lo puede absorber, de una manera soluble se da a través de procesos y en suelos arcillosos este casi en la mayoría queda fijado o atrapado en el suelo y las plantas no disponen de él en especial en la caña de azúcar.

La alta presencia de potasio en el suelo resulta perjudicial para el desarrollo de la vegetación, el artículo propiedades químicas del Potasio Efectos ambientales del Potasio hace mención que:

“Elevados niveles de potasio soluble en el agua pueden causar daños a las semillas en germinación, inhiben la toma de otros minerales y reducen la calidad del cultivo”.  
(Lenntech, 2020, p. 2)

El potasio no es tóxico, sin embargo, los niveles excesivos de potasio pueden causar antagonismos, mejor dicho, enemistad que lleven a deficiencias de otros nutrientes como el magnesio o el calcio. Si ocurre esto, es mejor realizar pruebas al sustrato y al tejido de la planta para determinar el contenido de nutrientes y ajustar el programa de fertilización o la cantidad de aplicación. Al ser expuesto directamente, combinación y consumo de agua con la presencia de estos residuos provoca una enfermedad llamada metahemoglobinemia la cual, es presencia de un nivel anormalmente alto de metahemoglobina en la sangre.

Según Brady (1984) menciona que el potasio alcanza en la litosfera una concentración media de 1,58%. La mayor parte de sus sales son muy solubles y adsorbidas por los minerales arcillosos.

En cuanto a la disponibilidad del K en el suelo, puede ser clasificado en dos grupos: Potasio cambiante o asimilable y Potasio no cambiante. Macmillan los identifica como:

“Potasio asimilable puede ser absorbido por las raíces de las plantas y se presenta bajo dos formas:

- K rápidamente disponible en la solución del suelo.
- K lentamente disponible. Adsorbido a la superficie del complejo arcillo húmico.

Y el segundo grupo realiza la fijación en el interior de las arcillas (ilitas) en forma no cambiante o que se libera muy lentamente a medida que el suelo se empobrece en potasio de cambio. También el contenido en los minerales de la roca madre, que se liberará a través de los procesos de meteorización.

Como todas las formas cambiables, el K cambiante se encuentra en equilibrio con el K adsorbido y con el de la solución del suelo". (Macmillan, Contaminación por fertilizantes, 1984).

De acuerdo con la información obtenida, con relación a este elemento tan esencial para las producciones de cosechas agrícolas, también conocemos los impactos negativos, cuando tenemos excesos de este producto en el suelo y dependiendo de las condiciones físicas y químicas de este, como este producto reaccionara, beneficiando o afectando a los recursos naturales de la zona y la salud de quienes utilizan estos recursos. Existen niveles aceptables de potasio en el suelo presentados en la siguiente tabla:

Denominación	K <sup>+</sup> intercambiable (cmc.kg <sup>-1</sup> )
Muy alto	> 1,2
Alto	1,2 -0,6
Medio	0,6-0,3
Bajo	0,3-0,1
Muy bajo	< 0,1

**Tabla 2.** Escala de provisión de K intercambiables (Ing. Agr. Andrea Edith Pellegrini)

Los niveles excesivos de potasio pueden causar antagonismos que llevan a deficiencias de otros nutrientes como el magnesio o el calcio. La toxicidad por potasio no existe como tal. de acuerdo con el cuadro de la tabla, en el cual se demuestran los valores estañadores de Potasio en el suelo.

### **2.2.8 Relación Calcio Magnesio**

La relación Calcio/Magnesio es muy importante para elaborar planes nutricionales óptimos, el antagonismo que existe entre elementos es se suma importancia, Debido a la interacción entre calcio, potasio y magnesio, su velocidad de absorción puede disminuir cuando hay altas concentraciones de potasio y/o magnesio en la solución del suelo.

Cuando los suelos carecen de calcio, limita el aprovechamiento de todos los demás elementos para las plantas. Según Pellegrini los suelos sin calcio se presentan como:

Los suelos no calcáreos, poseen por lo general entre 0,1 y 1, %. El contenido en los suelos está relacionado con la riqueza del material parental y el grado de meteorización sufrido. En zonas áridas puede presentarse acumulación en forma de sulfato ( $MgSO_4$ ), aunque esta sal es mucho más soluble que el yeso. (Pellegrini, aulavirtualagro.com, 2020).

El calcio presenta antagonismo con el fósforo, por insolubilización de los fosfatos en los suelos calizos; entre el azufre, el exceso de calcio favorece la formación de sulfato de calcio susceptible a ser lavado y entre el calcio y la mayoría de oligoelementos principalmente el hierro. Altos niveles de calcio en el suelo o aplicaciones de enmiendas o fertilizantes que contienen Ca, han mostrado inhibir la absorción de Mg. Sin embargo, el efecto antagónico parece no ser tan fuerte como el del K sobre la absorción de Mg. La fertilización del suelo con K interfiere la captación de Mg por la planta, puesto que

bloquean la fijación. El magnesio ha probado tener efecto antagónico sobre la absorción de magnesio. En la siguiente tabla se presenta las denominaciones que corresponde a los diferentes niveles de Calcio y Magnesio:

Denominación	Ca <sup>++</sup> intercambiable (cmic.kg <sup>-1</sup> )	Mg <sup>++</sup> intercambiable (cmic.kg <sup>-1</sup> )
Muy alto	> 20	> 8
Alto	20 – 10	8 – 3
Medio	10 -5	3 – 1
Bajo	5 – 2	1 – 0,3
Muy bajo	< 2	< 0,3

Tabla 2.1. Escala de provisión de Ca y Mg intercambiables

**Tabla 3. Intercambio del calcio y magnesio del suelo (Ing. Agr. Andrea Edith Pellegrini).**

### 2.3 Uso de fertilizantes (N-P-K), en el cultivo de caña de azúcar

El cultivo de caña de azúcar en nuestro país, está tomando mucha importancia, más de 80,500 fueron cultivadas durante la cosecha 18/19 estas plantaciones son renovadas en un promedio de 6 años, lo cual ocasiona pérdidas de la densidad de plantas y con el propósito de mantener los niveles de producción de este cultivo, los agricultores recurren a realizar aplicaciones de fertilizantes (N-P-K)., sin considerar la disminución de plantas en algunas zonas del cultivo, lo cual genera altas concentraciones de este agroquímico, que no son aprovechadas por las plantas y se acumulan en el suelo, provocando contaminación por : infiltración, volatilidad y por escorrentía en el suelo.

Uso de fertilizantes (N-P-K), en el cultivo de caña de azúcar: El cultivo de caña de azúcar, es muy exigente en los procesos de fertilización, debido a que la planta extrae estos nutrientes NPK del suelo y para mantener la fertilidad de los suelos y lograr mantener

la producción, se deben aplicar fuertes cantidades de fertilizantes NPK. De acuerdo con Martínez (2018), expresa que:

“Se presenta un contaminante que no puede faltar; siendo este el fertilizante, produciendo efectos negativos al medio ambiente. Unos de los efectos son el aumento del pH del suelo, contaminación de mantos acuíferos, lixiviación de nitratos y emisiones de óxidos de nitrógenos a la atmósfera como también la volatilización de óxido nitroso y óxido nítrico”. (Mártinez, 2018, págs. 1-4).

De acuerdo a la investigación, relacionada en las plantaciones de caña de azúcar, con baja densidad de plantas y los efectos que causan los fertilizantes NPK, al medio ambiente y a la salud humana, así como a los animales que se benefician especialmente del agua, cuando estos excesos de fertilizantes nitrogenados, fosfatados y potásicos, son arrastradas por la escorrentía o lixiviados, los cuales se depositan en cuerpos de agua, causan la eutroficación y las consecuencias de ese proceso, son nocivos para la población y para la vida acuática en estos cuerpos de agua . De igual forma, si estos residuos de fertilizantes permanecen en el suelo, provocan el antagonismo con otros micronutrientes, bajas cosechas y altos costos de producción, cuando estos se aplican de forma irracional y sin tomar en cuenta las zonas con baja densidad de plantas.

### **2.3.1 Prácticas Agrícolas para el cultivo de caña de azúcar.**

Los productores aplican nitrógeno al comienzo de la fase de ahijamiento, junto con potasio y fósforo. Cuando la caña tiene seis meses, aplican más potasio para incrementar la recuperación de azúcar; generalmente usan fórmulas (N-P-K)., un producto que contiene una mezcla de nitrógeno, fósforo y potasio, lo que ahorra tiempo y trabajo. Los trabajadores del campo aplican el compuesto (N-P-K). Usando un esparcidor halado por un tractor.

En lo referente a la caña de azúcar, Mata (2020) comenta:

“Debido a que la caña de azúcar produce grandes cantidades de tallos y hojas, requiere más nitrógeno, fósforo, potasio y micronutrientes más que otros cultivos. La caña de azúcar necesita más nitrógeno durante la fase de ahijamiento que ocurre entre 30 y 45 días después de plantar los tallos. La fase de ahijamiento “el proceso fisiológico de ramificación subterránea múltiple, que se origina a partir de las articulaciones nodales compactas del tallo primario”. (Espinosa, 2020, pág. 18)

Los efectos nocivos, que causan los fertilizantes al suelo, cuando se utilizan en exceso y no son aprovechados por las plantas. Esta situación demuestra que los cañicultores, deben poner especial atención cuando el cultivo tiene ya unos 4 o 5 años, a fin de asegurar que no existan grandes zonas despobladas o con baja densidad de plantas, para evitar que los fertilizantes se acumulen en el suelo y generen contaminación de los recursos naturales y pérdidas económicas, por estas.

### **2.3.2 Baja densidad de plantas, en plantaciones de caña de azúcar**

Los cultivos de caña de azúcar, generalmente son renovados cada 6 o 7 años, por los productores. Debido al uso de maquinaria agrícola, para casi la mayoría de las actividades productivas, ocurren daños en las bandas o surcos del cultivo, generando pérdidas de plantas en estas zonas, conocidas como zonas despobladas o de baja densidad de plantas.

Debido a la baja densidad de plantas, en un cultivo de caña de azúcar y al uso de maquinaria, para la aplicación de fertilizantes y al no considerar estas zonas despobladas, se le aplica la misma cantidad de fertilizantes a estas zonas que no tienen plantas, provocando altas concentraciones de (N-P-K). en las zonas mencionadas, las cuales al no ser absorbidas por las plantas, son fuentes de contaminación al medio ambiente, por:

volatilización, lixiviación, infiltración o por escorrentía, afectando los mantos freáticos, aguas superficiales, generando antagonismo de otros micronutrientes a los cuales las plantas no pueden acceder, así como afectando a la población y animales que consumen estas agua contaminadas, por los fertilizantes mencionado y los efectos de invernaderos al medio ambiente, por los procesos de volatilización.

## **2.4 Agricultura de precisión**

Agricultura de precisión es el término utilizado para definir acciones en el campo agrícola, estas acciones son tomadas por el uso de información precisa y específica, una de estas herramientas son los vehículos aéreos no tripulados, que se han desarrollado en los últimos años como una nueva plataforma tremendamente versátil para la adquisición de imágenes remotas con multitud de aplicaciones en agricultura de precisión. Este sistema agrícola persigue utilizar los insumos (ejemplo: herbicidas, fertilizantes, riego) en el sitio y momento adecuados. Díaz García-Cervigón lo define de la siguiente manera:

“La agricultura de precisión es el manejo diferenciado de los cultivos utilizando para ello diferentes herramientas tecnológicas (GPS, Sensores planta-clima-suelo e imágenes multiespectrales provenientes tanto de satélites como de drones), a partir de este manejo diferenciado del cultivo podremos detectar la variabilidad que tiene una determinada explotación agrícola, así como realizar una gestión integral de dicha explotación”. (Díaz García-Cervigón, 2015, pág. 25).

La aplicación de agricultura de precisión en los cultivos agrícolas, es necesario considerar los instrumentos de medición que debe utilizar para obtener la información precisa que necesita para obtener los resultados esperados, además se tiene que tomar en cuenta las diferentes etapas como lo menciona Díaz García-Cervigón:

En términos generales se puede considerar que la gestión localizada de un cultivo está definida por un ciclo de cuatro fases:

- 1) Monitorización, es decir, detección y mapeo de las variables que interesan en cada momento (ej.: Infestaciones de las malas hierbas o presencia de zonas infectadas por hongos)
- 2) Toma de decisiones y elaboración del mapa de tratamientos en función del mapa obtenido de la variable de interés (fase denominada también planificación de la actuación: qué aplicar, cómo, cuándo y dónde)
- 3) Actuación en campo o ejecución del manejo localizado que se ha decidido
- 4) Evaluación de la rentabilidad (económica y medioambiental) de las operaciones realizadas en el cultivo para programar acciones el año siguiente. La finalidad de todo esto, es la obtención de mayores rendimientos (económicos, medioambientales, sociales...etc.). (Díaz García-Cervigón, 2015, pág. 25).

#### **2.4.1 Sensores Multiespectrales**

Los sensores multiespectrales es una de las herramientas utilizadas por la agricultura de precisión para obtener información en tiempo real del estado de salud de los cultivos, además de presentar una versatilidad para la ejecución de las acciones cuando es instalado en un dron. Un dron puede volar 35 ha en 28 minutos, superando con creces la eficiencia para identificar problemas de forma manual, Con respecto a la existencia y beneficios que proporcionan los sensores, Díaz (2015) argumenta lo siguiente:

“multiespectrales miniaturizados para embarcar en vehículos aéreos no tripulados. Estos sensores pueden llegar a tomar valores de hasta 6 bandas espectrales, siendo posible seleccionar diferentes bandas mediante el empleo de filtros. Por regla general, estos sensores están diseñados para el estudio de parámetros relativos a la vegetación,

por lo que las bandas están seleccionadas en los rangos del verde, rojo e infrarrojo cercano, donde la vegetación presenta su mayor respuesta de absorbancia y reflectancia. El proceso para la toma de las imágenes es similar al vuelo fotogramétrico, en cuanto a los aspectos relativos a la posterior corrección geométrica de las imágenes y generación de mosaicos. Además, el tratamiento de estas imágenes no solo precisa de corrección geométrica, sino que son necesarias operaciones de calibración radiométrica, así como las correcciones atmosféricas necesarias para la obtención de datos validados de reflectancia y temperatura de superficie" (Díaz García-Cervigón, 2015, p. 14).

#### **2.4.2 Índice Normalizado Diferencial de Vegetación (NDVI)**

El NDVI es el índice de vegetación más conocido y usado en el mundo, que por sus siglas significa "Índice Normalizado Diferencial de Vegetación. Este índice fue introducido con el objetivo de separar la vegetación del brillo que produce el suelo, basándose en el peculiar comportamiento radiométrico de la vegetación, relacionado con la actividad fotosintética y la estructura foliar de las plantas, permitiendo determinar la vigorosidad de la planta. Díaz García-Cervigón menciona que el NDVI funciona como:

Los valores del NDVI están en función de la energía absorbida o reflejada por las plantas en diversas partes del espectro electromagnético. La respuesta espectral que tiene la vegetación sana, muestra un claro contraste entre el espectro del visible, especialmente la banda roja, y el Infrarrojo Cercano (NIR).

Mientras que en el visible los pigmentos de la hoja absorben la mayor parte de la energía que reciben, en el NIR, las paredes de las células de las hojas, que se encuentran llenas de agua, reflejan la mayor cantidad de energía.

En contraste, cuando la vegetación sufre algún tipo de estrés, ya sea por presencia de plagas o por sequía, la cantidad de agua disminuye en las paredes celulares por lo que

la reflectividad disminuye el NIR y aumenta paralelamente en el rojo al tener menor absorción cloroflica.

Esta diferencia en la respuesta espectral permite separar con relativa facilidad la vegetación sana de otras cubiertas. El cálculo del NDVI implica el uso de una simple fórmula con dos bandas, el Infrarrojo Cercano (NIR) y el rojo (RED). (Díaz García-Cervigón, Estudio de Índices de vegetación a partir de imágenes aéreas tomadas desde UAS/RPAS y aplicación de estos a la agricultura de precisión (tesis de postgrado)., 2015, pág. 14).

Por lo tanto, se puede decir que existe una relación inversa entre el valor de reflectancia de estas bandas, por lo que es posible su uso para discriminación de cubiertas vegetales; también los valores de este índice oscilan entre -1 y 1. El software SlantView 2 es una herramienta que procesa esta información para determinar la presencia de cultivos, Diversos estudios y publicaciones señalan que valores por encima de 0.1 indican presencia de vegetación, y cuanto más alto sea el valor de este índice, las condiciones de vigor son mejores.

## **CAPÍTULO III.**

### **Metodología de la investigación.**

#### **3.1 Tipo de investigación**

El tipo de estudio es explicativo, por ser el que se encarga de buscar el porqué de los hechos mediante el establecimiento de relaciones causa-efecto, es decir, además de describir o acercarse a un problema específico, intenta encontrar las causas del mismo y encontrar la relación de las variables que intervienen.

En esta investigación se estudiaron diferentes variables:

Variables cualitativas: los espacios sin vegetación, su detección para calcular la densidad de población.

Variables cuantitativas: la presencia de elementos como el Fósforo, Potasio, Calcio, Magnesio en el suelo, y características como la textura al tacto, pH, materia orgánica.

Las variables cuantitativas serían a su vez variables dependientes, por estar sujetas ante la variable cualitativa, ya que dependiendo de la densidad de población que tenga el cultivo, así dependerá la presencia de los elementos en el suelo que no fueron absorbidos por ninguna planta. Para obtener la información necesaria, se trabajó en base a la investigación de campo, recopilando directamente la información, evitando manipular ninguna variable de la investigación y solo se limitó a recolectar la información directamente de la problemática en el lugar in situ.

### 3.2 Población y muestra

La población de la investigación es el área de cultivo con extensión de 5.7 ha, de un total de 57 ha, de la hacienda ubicada en el cantón el Achiotal del municipio de San Pedro Masahuat, departamento de la paz.

En la investigación se tomaron 2 muestras:

✓ Primer muestreo de suelo: se realizó un muestreo para establecer la variación espacial en el suelo, el protocolo que utilizamos para realizarla fue el recomendado por el laboratorio de suelos del Centro Nacional de Tecnología Agropecuaria y Forestal Enrique Álvarez Córdova (CENTA), aleatorio en forma de “X”, una muestra de suelo por cada 0.7 ha.

✓ Segundo Muestreo es Estratificado (probabilístico): para la investigación se utilizó el método estratificado para poder dividir zonas con presencia de plantas y zonas con ausencia de plantas (baja densidad), permitiendo analizar 2 estratos que poseen homogeneidad entre sí. Como primer paso se realizó el vuelo del dron M600PRO.

Los elementos que se analizaron en laboratorio para los 2 muestreos fueron: Textura al tacto, pH, Fósforo, Potasio, calcio, Magnesio y Materia Orgánica.

### 3.3 Técnica e instrumentos utilizados

Las técnicas utilizadas constituyen el conjunto de mecanismos, medios o recursos dirigidos a recolectar, conservar, analizar y transmitir los datos de los fenómenos sobre los cuales se investiga.

Las técnicas usadas fueron:

#### Técnica

- Análisis de suelo: se utilizó esta técnica en 2 momentos, la primera fue antes de aplicar fertilizante al suelo y la segunda 60 días después de la aplicación del fertilizante.
- Imágenes multiespectrales (NDVI).
- Observación directa.

#### Instrumentos

- Formato de Excel.
- DJI M600PRO.
- Dron DJI Mavic mini.
- Software SlantView 2.
- Software DroneDeploy.
- Software 3P Toolbox.
- Software Google Earth Pro.
- Software QGroundControl.
- GPS Trimble (Nomad 1050).
- Ipad 2018.
- Laptop Dell Latitude 3510.
- MicroSD Kingston 128 gb.
- Barreno, balde, bolsas plásticas, viñetas.

### 3.4 Procedimiento realizado

Muestras:

- Primer muestreo de suelo: el protocolo que se utilizó como guía fue el recomendado por el CENTA. El primer muestreo fue de 8 muestras de suelo a 30 cm de profundidad, una muestra por cada 0.7 ha, cada muestra está compuesta por 5 submuestra.

Para iniciar el muestreo se tomó el primer punto al azar, y caminamos en forma de “X” por todo el terreno teniendo en consideración una distancia de aproximadamente 50 cm de los linderos o lugares que no fueran representativos para la muestra, se utilizó un barreno para sacar submuestras de 30 cm de profundidad (ver figura 8), cada submuestra ,se depositó en un balde para poder mezclar y obtener la muestra representativa del terreno (ver figura 11), las 5 submuestras se mezclaron para completar 2 libras de suelo depositadas en bolsa (ver anexo 8), las cuales se llevaron al laboratorio, y se etiqueto con la ficha técnica utilizadas en el laboratorio del CENTA (ver figura 12), como P1, P2, P3...(ver anexo, figura 8).

Muestra	Submuestra	Latitud	longitud	Muestra	Submuestra	Latitud	longitud
1	1	13.382393	-89.046649	5	1	13.383416	-89.04931
	2	13.3826795	-89.0476822		2	13.3831929	-89.0492257
	3	13.3824478	-89.0471506		3	13.3829951	-89.0483591
	4	13.3824155	-89.0474699		4	13.3829945	-89.0486692
	5	13.3822096	-89.0469576		5	13.3831759	-89.0488384
2	1	13.3820381	-89.046782	6	1	13.3829633	-89.0491894
	2	13.3824469	-89.0478284		2	13.3829115	-89.0494658
	3	13.3821328	-89.0472816		3	13.3827797	-89.0486685
	4	13.3819194	-89.0470477		4	13.382747	-89.0482478
	5	13.3822161	-89.0476759		5	13.38274	-89.0489849
3	1	13.3817065	-89.0469244	7	1	13.3826819	-89.0492866
	2	13.3819928	-89.047848		2	13.3825417	-89.0495989
	3	13.381855	-89.0474002		3	13.3821897	-89.048436
	4	13.3819989	-89.0476002		4	13.3824883	-89.0487579
	5	13.3816484	-89.047228		5	13.3824049	-89.0490491
4	1	13.3813981	-89.0471453	8	1	13.3822853	-89.0497381
	2	13.3814003	-89.0474567		2	13.3820318	-89.0496207
	3	13.3816308	-89.0476886		3	13.381992	-89.048628
	4	13.38183	-89.04817		4	13.3819268	-89.0490809
	5	13.3816105	-89.048013		5	13.3821453	-89.0492964

**Tabla 4. Puntos geográficos del primer muestreo (Autoría propia).**

Vuelo del dron para identificar zonas despobladas:

Previo a la realización del vuelo, el día anterior se realizaron las siguientes tareas:

1. Revisión del equipo (dron, sensor, baterías). (ver anexo, figura 23)
2. Realizar la carga completa del set de baterías. (ver anexo, figura 23)
3. Realizar la carga completa del control remoto. (ver anexo, figura 23)
4. Realizar plan de vuelo en Drone Deploy (ver anexo, figura 16):
  - Abrir ampliación Drone Deploy en iPad.
  - Ingresar con Usuario y contraseña.
  - Clic “Project”.
  - En barra de búsqueda colocar “achiotal, la paz”.
  - Identificar el área a volar en el mapa.
  - Clic en “Create Project here”.
  - En “Project Name” colocar el nombre del proyecto, clic “continúe”.
  - Clic en “Maps & Models”.
  - Realizar un polígono en el área de vuelo para cubrir toda el área objetivo.
  - Para configurar los parámetros se debe de tomar en cuenta lo siguiente:

Se realiza una Inspección del área de vuelo, identificando los potenciales obstáculos, para establecer la altitud mínima de vuelo para sobrepasar dichos obstáculos.

Para obtener Imágenes con la resolución espacial necesaria para los índices de vegetación requeridos, se utilizó la velocidad de traslación del dron en función de la altitud del vuelo, esta fue de 6 m/s de velocidad con traslape frontal de 70° y lateral de 75°. (Ver anexo, figura 16)

- Clic en “Guardar” y cerrar el programa.

El día del vuelo se realizó las siguientes calibraciones, in situ:

IMU del dron (unidad de medición inicial). (ver anexo, figura 19)

- Abrir aplicación QGround Control en iPad.
- Encender el dron.
- Conectarse al wifi del sensor Slant Range, la contraseña predeterminada es “slantrange3p”.
- Clic en “Setup”.
- Clic en “Sensors”.
- Clic en “Gyroscope”.
- Realizar las posiciones que indica el programa.
- Al finalizar, clic en “Ok” y cerrar la aplicación.

Brújula del dron. (Ver anexo, figura 17).

- Abrir software 3P Toolbox.
- Encender el dron.
- Conectarse al wifi del sensor SlantRange, la contraseña predeterminada es “slantrange3p”.
- Clic en “Sensor calibration”.
- Clic en “Compass”.
- Realizar las posiciones que indica el programa.
- Al finalizar, clic en “Ok” y cerrar el software.

Brújula del sensor SlantRange. (Ver anexo, figura 17).

- Abrir software 3P Toolbox.
- Encender el dron.

- Conectarse al wifi del sensor SlantRange, la contraseña predeterminada es “slanrange3p”.
- Clic en “Sensor calibration”.
- Clic en “accelerometer”
- Realizar las posiciones que indica el programa.
- Al finalizar, clic en “Ok” y cerrar el software.

Formatear memoria microSD: Se realiza el formateo total de la memoria para evitar problemas de compatibilidad con el dron. Todo el vuelo queda alojado en la memoria microSD (ver anexo, figura 15) para ser procesado posteriormente el software SlantView 2, con la información procesada se identificó las zonas con baja densidad de plantas y guardar las coordenadas GPS, donde se ubicó cada espacio sin plantas.

Procesamiento del vuelo:

- Se descargan las 2682 fotografías generadas por el sensor Slant Range con un tamaño de 26.6 GB.
- Se ejecuta el software SlantView 2:
- Ingrese el nombre de usuario y contraseña que se obtiene en la página [atanalytics.slantrange.com](http://atanalytics.slantrange.com) para iniciar sesión.
- Seleccionar el icono “open data folder”.
- Buscar la ubicación de las imágenes que se procesaran
- Clic en “Seleccionar carpeta”.
- En la barra “Grower” seleccione “New”.
- En la barra “Crop type” se selecciona la opción “Sugar cane”.
- En los ítems “Process” seleccionar “Population”.

- Clic “Ok”.
- Se compilan todas las fotografías para generar un modelo en 2D, utilizando el software SlantView 2 (tiempo aproximado 3 horas de procesamiento).



**Figura 1.** Mosaico de imágenes multispectrales (*Autoría propia*).

- Se generó un informe de SlantView Statistics de densidad de población y de altura de planta. (ver figura 3 y 4).
- Clic en el icono de “PDF”.
- Se generaron los puntos GPS para muestrea, tomando en cuenta el informe del software SlantView 2. (ver figura 3)

Los puntos de muestro se clasifican como:

- Color gris y negro significa ausencia de plantas.
- Rojo, amarillo, verde, blanco y azul: presencia de plantas.
- Clic en “Save maps as KMZ” para abrir las coordenadas en el software google earth pro (ver figura 6).

- Se identifican las zonas con baja densidad de plantas, para generar los puntos de muestreo e ingresarlos al GPS Trimble.

Muestra	Submuestra	Latitud	longitud	Muestra	Submuestra	Latitud	longitud
1	1	13°22'56.53"N	89° 2'48.23"O	5	1	13°22'57.70"N	89° 2'51.17"O
	2	13°22'56.70"N	89° 2'48.79"O		2	13°22'57.34"N	89° 2'51.21"O
	3	13°22'57.14"N	89° 2'48.44"O		3	13°22'57.98"N	89° 2'52.77"O
	4	13°22'57.27"N	89° 2'49.42"O		4	13°22'57.60"N	89° 2'52.66"O
	5	13°22'56.93"N	89° 2'49.75"O		5	13°22'58.12"N	89° 2'51.84"O
2	1	13°22'56.31"N	89° 2'50.03"O	6	1	13°22'57.29"N	89° 2'54.18"O
	2	13°22'56.11"N	89° 2'49.22"O		2	13°22'57.04"N	89° 2'54.67"O
	3	13°22'55.75"N	89° 2'49.38"O		3	13°22'56.53"N	89° 2'51.92"O
	4	13°22'55.26"N	89° 2'49.17"O		4	13°22'57.07"N	89° 2'53.03"O
	5	13°22'55.25"N	89° 2'49.90"O		5	13°22'56.45"N	89° 2'53.21"O
3	1	13°22'54.80"N	89° 2'51.85"O	7	1	13°22'56.61"N	89° 2'55.10"O
	2	13°22'54.12"N	89° 2'51.04"O		2	13°22'56.44"N	89° 2'53.87"O
	3	13°22'53.87"N	89° 2'50.62"O		3	13°22'56.11"N	89° 2'54.75"O
	4	13°22'53.92"N	89° 2'49.72"O		4	13°22'55.91"N	89° 2'53.64"O
	5	13°22'55.78"N	89° 2'50.90"O		5	13°22'55.12"N	89° 2'52.79"O
4	1	13°22'53.64"N	89° 2'51.61"O	8	1	13°22'55.50"N	89° 2'55.86"O
	2	13°22'53.38"N	89° 2'51.24"O		2	13°22'55.76"N	89° 2'55.24"O
	3	13°22'53.21"N	89° 2'50.64"O		3	13°22'55.49"N	89° 2'54.80"O
	4	13°22'53.40"N	89° 2'51.92"O		4	13°22'55.12"N	89° 2'53.98"O
	5	13°22'52.76"N	89° 2'50.78"O		5	13°22'54.99"N	89° 2'54.57"O

**Tabla 5. Puntos geográficos del segundo muestreo (Autoría propia).**

- Segundo muestreo de Suelo:

Con todos los puntos cargados en el GPS Trimble (ver anexo, figura 6), se realiza el segundo muestreo teniendo en cuenta los 2 estratos individualmente, las cuales se ejecutaron al azar, con 5 submuestras cada uno en los sectores donde la densidad de población de plantas en los surcos es completa.

Posteriormente se efectuaron las 6 muestras con 5 submuestras, en los sectores o surcos con baja densidad de plantas, identificadas por el vuelo del dron.

## CAPÍTULO IV.

### Análisis estadístico o de información realizada

Los resultados del análisis de suelo fueron tabulados en Excel para poder realizar comparaciones estadísticas y gráficas de los resultados. (Ver Anexo 8)

Para realizar el análisis de los datos obtenidos de la investigación se utilizó el método estadístico inferencial.

Se realizará la operación resta, para identificar las diferencias que presentan los muestreos de suelo.

Ejemplo:

El resultado del pH en agua 1:2.5 en el punto P1 fue 0.3, que pertenece a la resta de 6 que representa el primer muestreo (Ver anexo, figura 25) y 5.7 del segundo muestreo (ver anexo, figura 24).

Operaciones:

Caso de pH en agua 1:2.5

Nº (MUESTREO 1) - (MUESTREO 2) Y RESULTADO.

P1	6	MENOS	5.7	IGUAL	0.3
P2	5.6	MENOS	5.9	IGUAL	-0.3
P3	5.8	MENOS	6.5	IGUAL	-0.7
P4	5.8	MENOS	6.2	IGUAL	-0.4
P5	6.1	MENOS	6	IGUAL	0.1
P6	5.7	MENOS	5.8	IGUAL	-0.1
P7	5.8	MENOS	5.6	IGUAL	0.2
P8	5.9	MENOS	5.9	IGUAL	0

Caso de Fósforo (mg kg-1):

N° (MUESTREO 1) - (MUESTREO 2) Y RESULTADO.

P1	301	MENOS	173	IGUAL	128
P2	130	MENOS	162	IGUAL	-32
P3	196	MENOS	196	IGUAL	0
P4	184	MENOS	130	IGUAL	54
P5	240	MENOS	158	IGUAL	82
P6	161	MENOS	108	IGUAL	53
P7	202	MENOS	87	IGUAL	115
P8	148	MENOS	135	IGUAL	13

Caso Potasio (mg kg-1).

N° (MUESTREO 1) - (MUESTREO 2) Y RESULTADO.

P1	260	MENOS	226	IGUAL	34
P2	244	MENOS	214	IGUAL	30
P3	214	MENOS	269	IGUAL	-55
P4	273	MENOS	163	IGUAL	110
P5	297	MENOS	233	IGUAL	64
P6	292	MENOS	184	IGUAL	108
P7	322	MENOS	172	IGUAL	150
P8	212	MENOS	187	IGUAL	25

Caso Calcio (cmol kg-1).

N° (MUESTREO 1) - (MUESTREO 2) Y RESULTADO.

P1	6.17	MENOS	6.8	IGUAL	-0.63
P2	4.05	MENOS	7.92	IGUAL	-3.87
P3	7.59	MENOS	5.65	IGUAL	1.94
P4	7.65	MENOS	10.43	IGUAL	-2.78
P5	7.48	MENOS	7.35	IGUAL	0.13
P6	6.77	MENOS	5.94	IGUAL	0.83
P7	5.77	MENOS	5.31	IGUAL	0.46
P8	7.43	MENOS	6.29	IGUAL	1.14

Caso Magnesio (cmol kg-1).

N° (MUESTREO 1) - (MUESTREO 2) Y RESULTADO.

P1	0.88	MENOS	0.94	IGUAL	-0.06
P2	0.66	MENOS	1.37	IGUAL	-0.71
P3	1.11	MENOS	0.58	IGUAL	0.53
P4	1.23	MENOS	1.42	IGUAL	-0.19
P5	1.1	MENOS	1.11	IGUAL	-0.01
P6	1.23	MENOS	0.79	IGUAL	0.44
P7	0.88	MENOS	0.94	IGUAL	-0.06
P8	1.24	MENOS	0.65	IGUAL	0.59

Caso K int. (cmol kg<sup>-1</sup>).

N° (MUESTREO 1) - (MUESTREO 2) Y RESULTADO.

P1	0.67	MENOS	0.58	IGUAL	0.09
P2	0.62	MENOS	0.55	IGUAL	0.07
P3	0.55	MENOS	0.69	IGUAL	-0.14
P4	0.7	MENOS	0.42	IGUAL	0.28
P5	0.76	MENOS	0.6	IGUAL	0.16
P6	0.75	MENOS	0.47	IGUAL	0.28
P7	0.82	MENOS	0.44	IGUAL	0.38
P8	0.54	MENOS	0.48	IGUAL	0.06

Caso de materia orgánica (%).

N° (MUESTREO 1) - (MUESTREO 2) Y RESULTADO.

P1	1.07	MENOS	1.06	IGUAL	0.01
P2	1.07	MENOS	1.33	IGUAL	-0.26
P3	1.6	MENOS	0.4	IGUAL	1.2
P4	0.4	MENOS	0.93	IGUAL	-0.53
P5	0.27	MENOS	0.66	IGUAL	-0.39
P6	0.8	MENOS	0.8	IGUAL	0
P7	0.27	MENOS	0.93	IGUAL	-0.66
P8	1.07	MENOS	0.8	IGUAL	0.27

Caso de la relación Calcio/Magnesio.

N° (MUESTREO 1) - (MUESTREO 2) Y RESULTADO.

P1	7.01	MENOS	7.21	IGUAL	-0.2
P2	6.11	MENOS	5.78	IGUAL	0.33
P3	6.86	MENOS	9.68	IGUAL	-2.82
P4	6.2	MENOS	7.34	IGUAL	-1.14
P5	6.82	MENOS	6.64	IGUAL	0.18
P6	5.52	MENOS	7.55	IGUAL	-2.03
P7	6.56	MENOS	5.63	IGUAL	0.93
P8	6.01	MENOS	9.63	IGUAL	-3.62

Caso de la relación Magnesio/Potasio.

N° (MUESTREO 1) - (MUESTREO 2) Y RESULTADO.

P1	1.32	MENOS	1.63	IGUAL	-0.31
P2	1.06	MENOS	2.5	IGUAL	-1.44
P3	2.01	MENOS	0.85	IGUAL	1.16
P4	1.76	MENOS	3.39	IGUAL	-1.63
P5	1.44	MENOS	1.86	IGUAL	-0.42
P6	1.64	MENOS	1.66	IGUAL	-0.02
P7	1.07	MENOS	2.14	IGUAL	-1.07
P8	2.28	MENOS	1.36	IGUAL	0.92

Caso de la relación Calcio+Magnesio/Potasio.

N° (MUESTREO 1) - (MUESTREO 2) Y RESULTADO.

P1	10.55	MENOS	13.34	IGUAL	-2.79
P2	7.54	MENOS	16.96	IGUAL	-9.42
P3	15.82	MENOS	9.03	IGUAL	6.79
P4	12.69	MENOS	28.32	IGUAL	-15.63
P5	11.27	MENOS	14.18	IGUAL	-2.91
P6	10.67	MENOS	14.21	IGUAL	-3.54
P7	8.07	MENOS	14.18	IGUAL	-6.11
P8	15.96	MENOS	14.45	IGUAL	1.51

Caso de la relación Calcio/Potasio.

N° (MUESTREO 1) - (MUESTREO 2) Y RESULTADO.

P1	9.23	MENOS	11.71	IGUAL	-2.48
P2	6.48	MENOS	14.46	IGUAL	-7.98
P3	13.81	MENOS	8.18	IGUAL	5.63
P4	10.93	MENOS	24.93	IGUAL	-14
P5	9.83	MENOS	12.32	IGUAL	-2.49
P6	9.03	MENOS	12.55	IGUAL	-3.52
P7	7	MENOS	12.04	IGUAL	-5.04
P8	13.68	MENOS	13.09	IGUAL	0.59

#### 4.1 Resultados de los análisis de laboratorio.

En la tabla 6. se presentan las diferencias en resta que se obtuvieron en los 2 muestreos de suelo, tomando en cuenta solo los puntos que presentaron baja densidad de plantas.

Se calcula el promedio de cada variable para identificar tendencias.

	PH EN AGUA 1:2.5	P (mg kg-1)	K (mg kg-1)	Ca (cmol kg-1)	Mg (cmol kg-1)	K int. (cmol kg-1)	%Materia orgánica	Ca/Mg	Mg/k	Ca+Mg/k	ca/k
P1	0.3	128	34	-0.63	-0.06	0.09	0.01	-0.2	-0.31	-2.79	-2.48
P3	-0.7	0	-55	1.94	0.53	-0.14	1.2	-2.82	1.16	6.79	5.63
P4	-0.4	54	110	-2.78	-0.19	0.28	-0.53	-1.14	-1.63	-15.63	-14
P5	0.1	82	64	0.13	-0.01	0.16	-0.39	0.18	-0.42	-2.91	-2.49
P6	-0.1	53	108	0.83	0.44	0.28	0	-2.03	-0.02	-3.54	-3.52
P8	0	13	25	1.14	0.59	0.06	0.27	-3.62	0.92	1.51	0.59
PROMEDIO	-0.133333	55	47.6666667	0.105	0.21666667	0.12166667	0.09333333	-1.605	-0.05	-2.7616667	-2.71167

**Tabla 6. Promedio comparativo de resultados del laboratorio de muestras con baja densidad de plantas. Centro Nacional de Tecnología Agropecuaria y Forestal (CENTA)**

En la tabla 7 se presentan las diferencias en resta que se obtuvieron en los 2 muestreos de suelo. Tomando en cuenta solo las muestras que fueron extraídas en zonas con densidad de plantas normales (presencia de cobertura vegetal).

<b>Comparativo muestras con densidad de planta normal</b>											
	PH EN AGUA 1:2.5	P (mg kg-1)	K (mg kg-1)	Ca (cmol kg-1)	Mg (cmol kg-1)	K int. (cmol kg-1)	%Materia orgánica	ca/Mg	Mg/k	ca+Mg/k	ca/k
P2	-0.3	-32	30	-3.87	-0.71	0.07	-0.26	0.33	-1.44	-9.42	-7.98
P7	0.2	115	150	0.46	-0.06	0.38	-0.66	0.93	-1.07	-6.11	-5.04
PROMEDIO	-0.05	41.5	90	1.705	0.385	0.225	-0.46	0.63	1.255	-7.765	-6.51

**Tabla 7. Promedio comparativo de resultados del laboratorio de muestras en surcos con plantas completas. Centro Nacional de Tecnología Agropecuaria y Forestal (CENTA)**

#### **4.2 Metodología actual de fertilización al suelo.**

La metodología de fertilización del suelo, por los agricultores en la zona de investigación, hacienda el Achotal, del cantón del mismo nombre, de San Pedro Masahuat, departamento de la paz, se realiza de forma mecanizada, por las dificultades de conseguir mano de obra en la zona y por los altos costos salariales, usando un esparcidor, halado por el tractor, el cual se calibra de tal forma, que la cantidad de fertilizantes que se aplican al surco sea homogénea, sin tener en cuenta zonas con baja densidad de plantas, utilizando un promedio de 515 Kg de fertilizantes químico por hectárea, en cada ciclo de cultivo. La primera aplicación se realiza a la siembra, la segunda se realiza máximo cuarenta días después de siembra.

Ventajas:

- No necesita mano de obra calificada.
- Utiliza menos mano de obra por hectárea.
- Las fertilizaciones se hacen en menos tiempo en comparación a la forma manual.
- El cálculo de insumos por ha, se facilita al tener costos fijos en fertilizante.
- Se garantiza que la aplicación de fertilizante sea homogénea en la totalidad del terreno.

Desventajas:

- Es una metodología ineficiente, no considerar los costos de fertilizantes en zona con baja densidad de plantas.
- Se aplica fertilizantes en zonas del terreno donde no es necesario.

### 4.3 Nivel de contaminación en el suelo.

En la tabla 12 se muestra el significado de cada abreviación para la interpretación de los niveles aceptables de las variables evaluadas en las muestras de laboratorio:

Tabulación de rangos del primero (Ver tabla 9) y segundo (Ver tabla 10) muestreo de suelo tenemos:

N° DE MUESTREO	PH EN AGUA 1:2.5		FOSFORO (mg kg-1)		POTASIO (mg kg-1)		Ca (cmol kg-1)		Mg (cmol kg-1)	
	CANTIDAD DE MUESTRAS	RANGO								
MUESTREO 1	7	MA	8	MA	8	MA	8	A	7	B
	1	LA							1	MB
MUESTREO 2	6	MA	8	MA	4	MA	8	A	5	B
	2	LA			4	A			3	MB
N° DE MUESTREO	% Materia orgánica		ca/Mg		Mg/k		ca+Mg/k		ca/k	
	CANTIDAD DE MUESTRAS	RANGO								
MUESTREO 1	8	B	8	A	8	B	6	M	8	M
							2	B		
MUESTREO 2	8	B	8	A	6	B	7	M	8	M
					2	M	1	B		

**Tabla 8. Tabulación de rangos del primero y segundo muestreo de suelo. Autoría propia.**

- El pH en el muestreo 1 presento 7 resultados MODERADAMENTE ÁCIDO y un resultado LIGERAMENTE ÁCIDO, para el segundo muestreo 6 resultados siguieron siendo MODERADAMENTE ÁCIDO y subió a 2 resultados el LIGERAMENTE ÁCIDO.
- El Fosforo presento en el primer muestreo 8 resultados con el rango MUY ALTO, para el segundo muestreo los 8 resultados se mantuvieron en el rango MUY ALTO.

- El Potasio obtuvo para el primer muestreo 8 resultados en rango MUY ALTO, para el segundo muestreo solo 4 resultados se mantuvieron en MUY ALTO y 4 bajaron a rango de ALTO.
- El Calcio presento en el primer muestreo 8 resultados con el rango ALTO, para el segundo muestreo los 8 resultados se mantuvieron en el rango ALTO.
- El Magnesio obtuvo para el primer muestreo 7 resultados en rango BAJO, para el segundo muestreo solo 5 resultados se mantuvieron en BAJO y 3 bajaron a rango de MUY BAJO.
- La materia orgánica presento en el primer muestreo 8 resultados con el rango BAJO, para el segundo muestreo los 8 resultados se mantuvieron en el rango BAJO.
- La relación Calcio/Magnesio presento en el primer muestreo 8 resultados con el rango ALTO, para el segundo muestreo los 8 resultados se mantuvieron en el rango ALTO.
- La relación Magnesio/Potasio presento en el primer muestreo 8 resultados con el rango BAJO, para el segundo muestreo solo 6 resultados se mantuvieron en rango BAJO y 2 subieron a rango MEDIO.
- La relación Calcio + Magnesio/Potasio presento en el primer muestreo 6 resultados con el rango MEDIO Y 2 resultado con rango BAJO, para el segundo muestreo 7 resultados se clasifican con el rango MEDIO y solo 1 resultado con rango BAJO.
- La relación Calcio/Potasio presento en el primer muestreo 8 resultados con el rango MEDIO, para el segundo muestreo los 8 resultados se mantuvieron en el rango MEDIO.

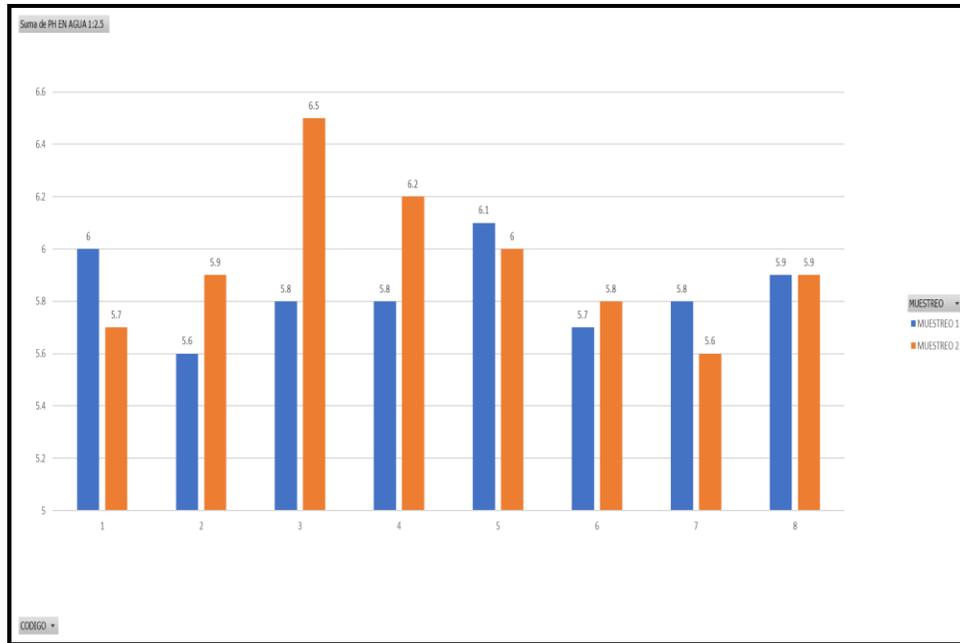
MUESTRA	TEXTURA AL TACTO	PH EN AGUA 1:2.5		FOSFORO (mg kg-1)		POTASIO (mg kg-1)		Ca (cmol kg-1)		Mg (cmol kg-1)		K int.(cmol kg-1)
M20298	ARENA FRANCA	6	MA	301	MA	260	MA	6.17	A	0.88	B	0.67
M20299	ARENA FRANCA	5.6	MA	130	MA	244	MA	4.05	A	0.66	MB	0.62
M20300	FRANCO ARENOSO	5.8	MA	196	MA	214	MA	7.59	A	1.11	B	0.55
M20301	FRANCO ARENOSO	5.8	MA	184	MA	273	MA	7.65	A	1.23	B	0.7
M20302	FRANCO ARENOSO	6.1	LA	240	MA	297	MA	7.48	A	1.1	B	0.76
M20303	FRANCO ARENOSO	5.7	MA	161	MA	292	MA	6.77	A	1.23	B	0.75
M20304	FRANCO ARENOSO	5.8	MA	202	MA	322	MA	5.77	A	0.88	B	0.82
M20305	FRANCO ARENOSO	5.9	MA	148	MA	212	MA	7.43	A	1.24	B	0.54
MUESTRA	TEXTURA AL TACTO	%Materia orgánica		ca/Mg		Mg/k		ca+Mg/k		ca/k		
M20298	ARENA FRANCA	1.07	B	7.01	A	1.32	B	10.55	M	9.23	M	
M20299	ARENA FRANCA	1.07	B	6.11	A	1.06	B	7.54	B	6.48	M	
M20300	FRANCO ARENOSO	1.6	B	6.86	A	2.01	B	15.82	M	13.81	M	
M20301	FRANCO ARENOSO	0.4	B	6.2	A	1.76	B	12.69	M	10.93	M	
M20302	FRANCO ARENOSO	0.27	B	6.82	A	1.44	B	11.27	M	9.83	M	
M20303	FRANCO ARENOSO	0.8	B	5.52	A	1.64	B	10.67	M	9.03	M	
M20304	FRANCO ARENOSO	0.27	B	6.56	A	1.07	B	8.07	B	7	M	
M20305	FRANCO ARENOSO	1.07	B	6.01	A	2.28	B	15.96	M	13.68	M	

**Tabla 9. Resultados del primer muestreo. Centro Nacional de Tecnología Agropecuaria y Forestal (CENTA)**

MUESTRA	TEXTURA AL TACTO	PH EN AGUA 1:2.5		FOSFORO (mg kg-1)		POTASIO (mg kg-1)		Ca (cmol kg-1)		Mg (cmol kg-1)		K int.(cmol kg-1)
M20298	ARENA FRANCA	6	MA	301	MA	260	MA	6.17	A	0.88	B	0.67
M20299	ARENA FRANCA	5.6	MA	130	MA	244	MA	4.05	A	0.66	MB	0.62
M20300	FRANCO ARENOSO	5.8	MA	196	MA	214	MA	7.59	A	1.11	B	0.55
M20301	FRANCO ARENOSO	5.8	MA	184	MA	273	MA	7.65	A	1.23	B	0.7
M20302	FRANCO ARENOSO	6.1	LA	240	MA	297	MA	7.48	A	1.1	B	0.76
M20303	FRANCO ARENOSO	5.7	MA	161	MA	292	MA	6.77	A	1.23	B	0.75
M20304	FRANCO ARENOSO	5.8	MA	202	MA	322	MA	5.77	A	0.88	B	0.82
M20305	FRANCO ARENOSO	5.9	MA	148	MA	212	MA	7.43	A	1.24	B	0.54
MUESTRA	TEXTURA AL TACTO	%Materia organica		ca/Mg		Mg/k		ca+Mg/k		ca/k		
M20298	ARENA FRANCA	1.07	B	7.01	A	1.32	B	10.55	M	9.23	M	
M20299	ARENA FRANCA	1.07	B	6.11	A	1.06	B	7.54	B	6.48	M	
M20300	FRANCO ARENOSO	1.6	B	6.86	A	2.01	B	15.82	M	13.81	M	
M20301	FRANCO ARENOSO	0.4	B	6.2	A	1.76	B	12.69	M	10.93	M	
M20302	FRANCO ARENOSO	0.27	B	6.82	A	1.44	B	11.27	M	9.83	M	
M20303	FRANCO ARENOSO	0.8	B	5.52	A	1.64	B	10.67	M	9.03	M	
M20304	FRANCO ARENOSO	0.27	B	6.56	A	1.07	B	8.07	B	7	M	
M20305	FRANCO ARENOSO	1.07	B	6.01	A	2.28	B	15.96	M	13.68	M	

(CENTA)

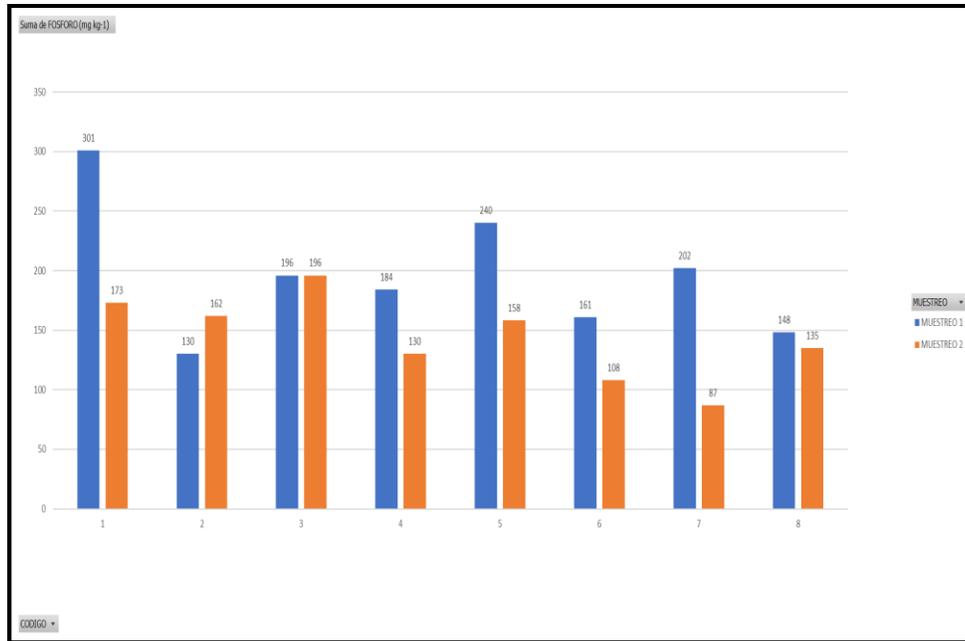
*Tabla 10. Resultados del segundo muestreo. Centro Nacional de Tecnología Agropecuaria y Forestal*



**Gráfica 1. Comparación del primer y segundo muestreo del PH en agua 1 / 2.5. (Autoría propia)**

**ANÁLISIS:** En la gráfica 1 se presentan la comparación del primero (Azul) y segundo (anaranjado) resultado del pH en agua 1:2.5, en la tabla 6 las zonas con densidad baja de plantas presentaron un incremento en promedio de 0.166, en la tabla 7 las zonas con densidad normal de plantas se incrementaron un 0.05.

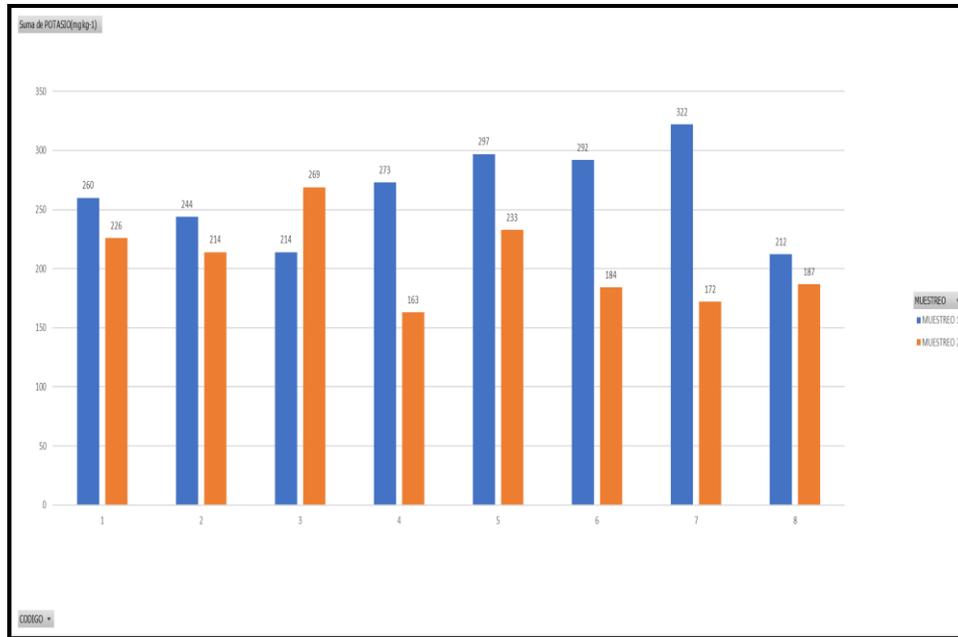
**INTERPRETACIÓN:** De acuerdo con la información obtenida se puede apreciar que el pH en el suelo mostró un ligero incremento en las muestras donde el suelo tenía cobertura vegetal, agudizándose el aumento cuando es comparado contra el suelo con baja densidad de plantas, sin embargo, el aumento no es significativo ni concluyente.



**Gráfica 2. Comparación del primer y segundo muestreo del Fósforo (mg kg-1) (Autoría propia)**

**ANÁLISIS:** En la gráfica 2 se presentan la comparación del primero (Azul) y segundo (anaranjado) resultado del Fósforo (mg kg-1), en la tabla 6 las zonas con densidad baja de plantas presento una disminución promedio de 55 (mg kg-1), en la tabla 7 las zonas con densidad normal de plantas la disminución fue de 41.5 (mg kg-1) en promedio.

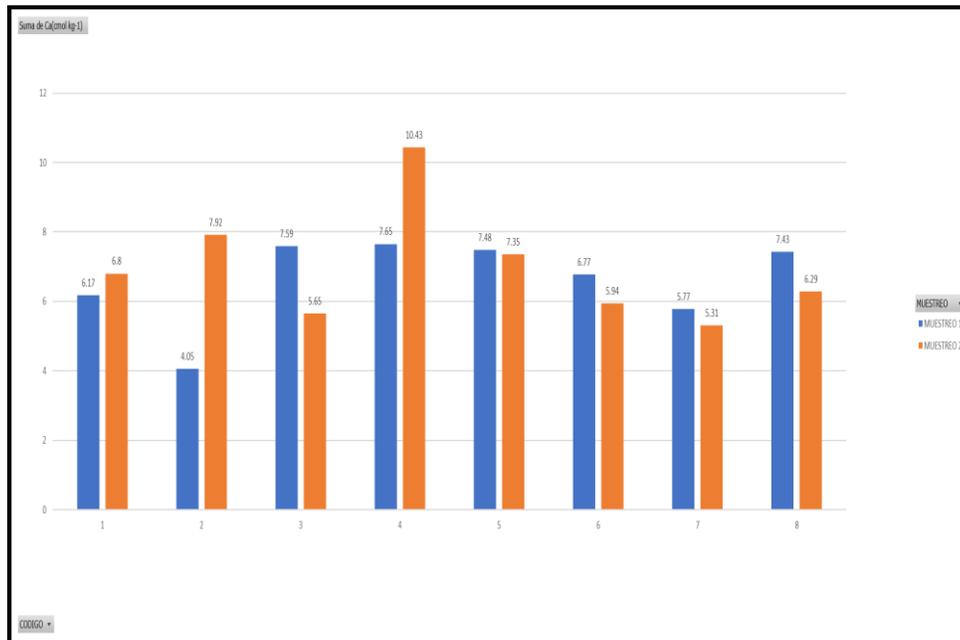
**INTERPRETACIÓN:** De acuerdo con la información obtenida se puede apreciar que el Fósforo en ambos casos (densidad baja de plantas y densidad normal) mostró pérdidas en su concentración, las variables ambientales fueron las únicas que intervinieron en la degradación del Fósforo en zonas con baja densidad de plantas, en el caso de las zonas con densidad normal, la pérdida fue también por la absorción del elemento por parte de las plantas.



**Gráfica 3. Comparación del primer y segundo muestreo del Potasio (mg kg-1) (Autoría propia)**

**ANÁLISIS:** En la gráfica 3 se presentan la comparación del primero (Azul) y segundo (anaranjado) resultado del Potasio (mg kg-1), en la tabla 6 las zonas con densidad baja de plantas, presentó una disminución promedio de 47.6 (mg kg-1), en la tabla 7 las zonas con densidad normal de plantas la disminución fue de 90 (mg kg-1) en promedio.

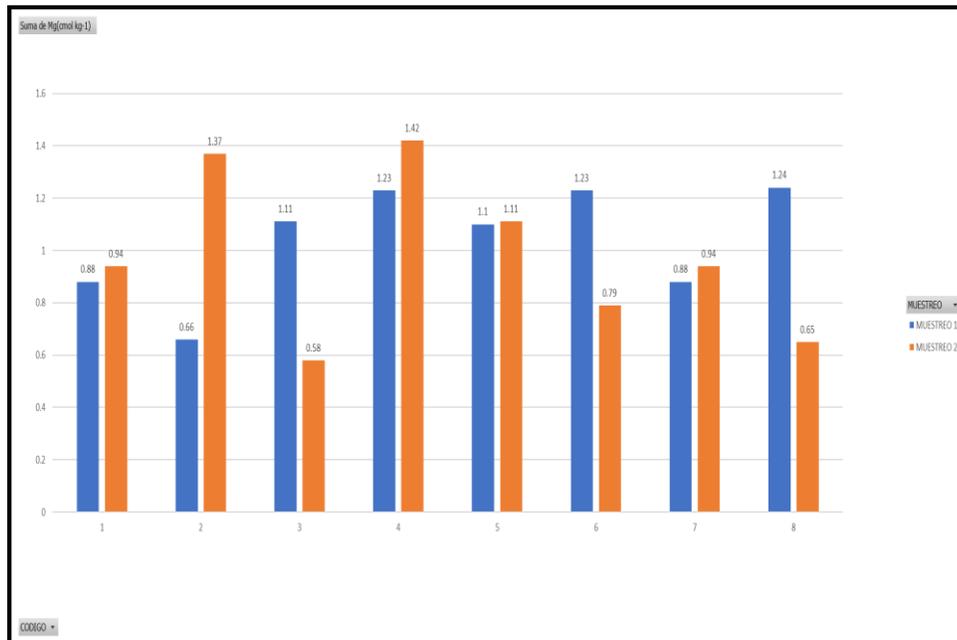
**INTERPRETACIÓN:** De acuerdo con la información obtenida se puede apreciar que el Potasio en ambos casos (densidad baja de plantas y densidad normal) mostró pérdidas en su concentración, las variables ambientales fueron las únicas que intervinieron en la degradación del Potasio en zonas con baja densidad de plantas, en el caso de las zonas con densidad normal, la pérdida fue también por la absorción del elemento por parte de las plantas.



**Gráfica 4. Comparación del primer y segundo muestreo del Ca (cmol kg-1) (Autoría propia)**

**ANÁLISIS:** En la gráfica 4 se presentan la comparación del primero (Azul) y segundo (anaranjado) resultado del Ca (cmol kg<sup>-1</sup>), en la tabla 6 la zona con densidad baja de plantas presentó una disminución en promedio de 0.105 (cmol kg<sup>-1</sup>), en la tabla 7 las zonas con densidad normal de plantas se incrementaron un 1.705 (cmol kg<sup>-1</sup>).

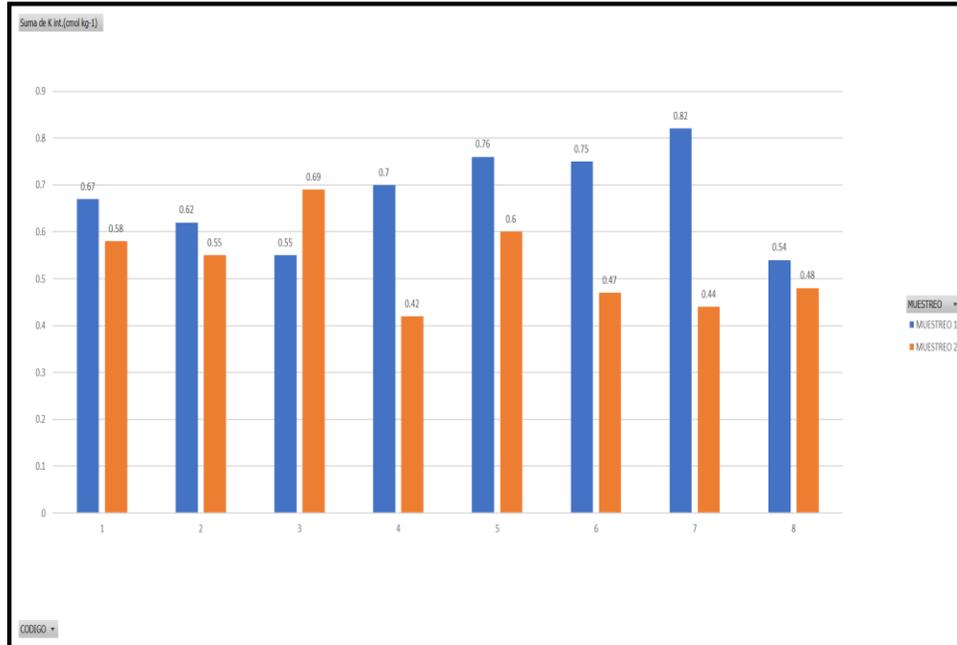
**INTERPRETACIÓN:** De acuerdo con la información obtenida se puede apreciar que el Calcio en el suelo mostró un comportamiento diferente en los 2 estratos estudiados, en zonas con baja densidad de plantas, el Calcio disminuyó por la falta de protección al suelo y en zonas con cobertura vegetal el valor del Calcio aumentó, debido a la protección que recibe el suelo por parte de las plantas.



**Gráfica 5. Comparación del primer y segundo muestreo del Mg (cmol kg-1) (Autoría propia)**

**ANÁLISIS:** En la gráfica 5 se presentan la comparación del primero (Azul) y segundo (anaranjado) resultado del Mg (cmol kg-1), en la tabla 6 las zonas con densidad baja de plantas presentaron una disminución en promedio de 0.216(cmol kg-1), en la tabla 7 las zonas con densidad normal de plantas se incrementaron un 0.385 (cmol kg-1).

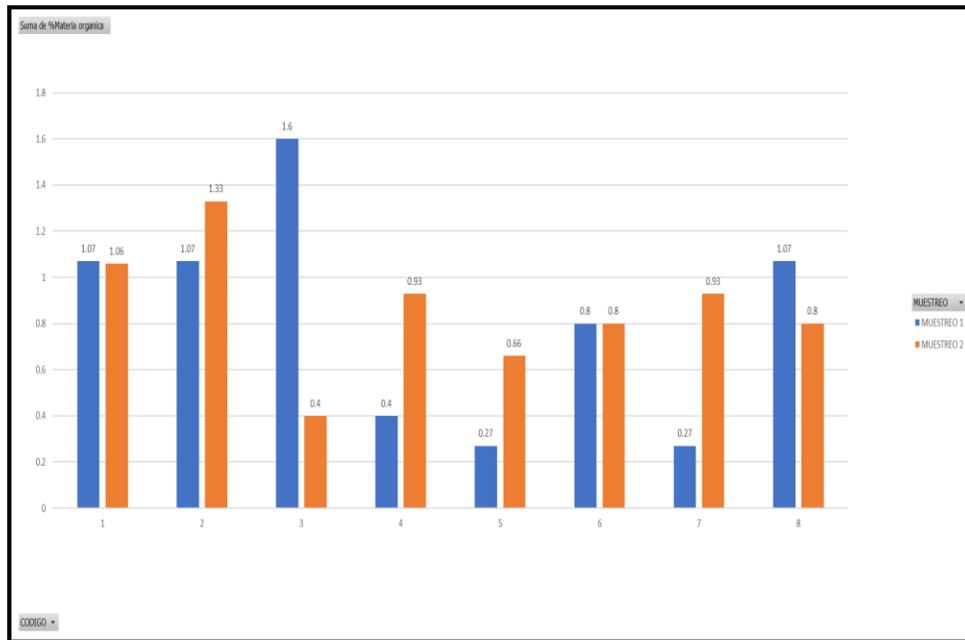
**INTERPRETACIÓN:** De acuerdo con la información obtenida se puede apreciar que el Magnesio en el suelo mostró un comportamiento diferente en los 2 estratos estudiados, en zonas con baja densidad de plantas, el Magnesio disminuyó por la falta de protección al suelo y en zonas con cobertura vegetal el valor del Calcio aumentó, debido a la protección que recibe el suelo por parte de las plantas.



**Gráfica 6. Comparación del primer y segundo muestreo del K int. (cmol kg-1) (Autoría propia)**

**ANÁLISIS:** En la gráfica 6 se presentan la comparación del primero (Azul) y segundo (anaranjado) resultado del K int. (cmol kg-1), en la tabla 6 las zonas con densidad baja de plantas presentaron una disminución en promedio de 0.1216 (cmol kg-1), en la tabla 7 las zonas con densidad normal de plantas disminuyeron también un 0.225 (cmol kg-1).

**INTERPRETACIÓN:** De acuerdo con la información obtenida se puede apreciar que el Potasio Int. En el suelo mostró disminución en promedio en ambos casos, la ligera disminución en las muestras donde el suelo tenía baja densidad de plantas, agudiza cuando es comparado contra el suelo con cobertura vegetal, sin embargo, el aumento no es significativo ni concluyente.

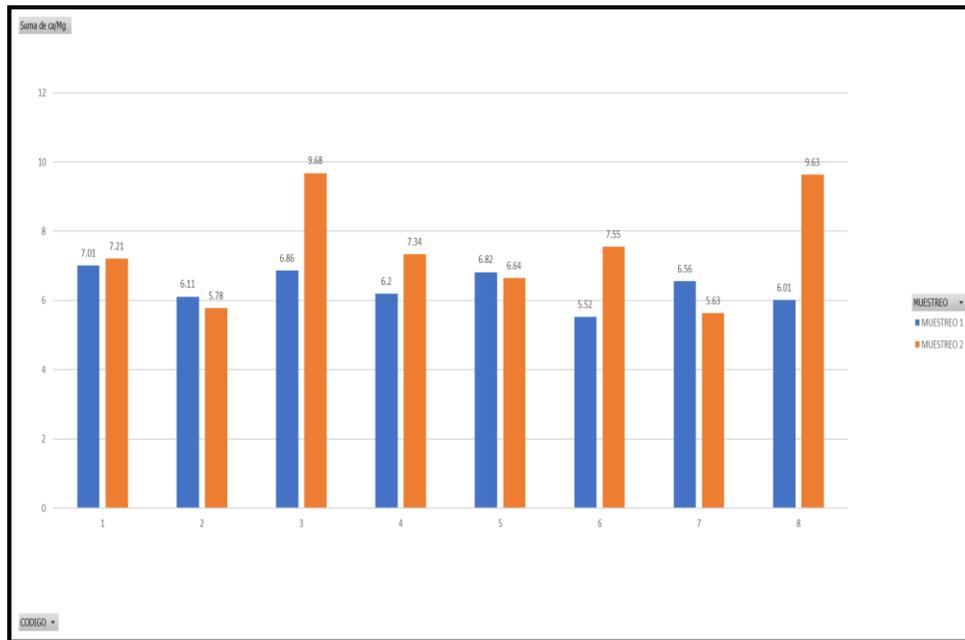


**Gráfica 7. Comparación del primer y segundo muestreo de Materia Orgánica (Autoría propia)**

#### ANÁLISIS:

En la gráfica 7 se presentan la comparación del primero (Azul) y segundo (anaranjado) resultado de la presencia de materia orgánica (%), en la tabla 6 las zonas con densidad baja de plantas presentaron una disminución promedio de 0.093(%), en la tabla 7 las zonas con densidad normal de plantas, el valor aumentó un 0.46 (%) en promedio.

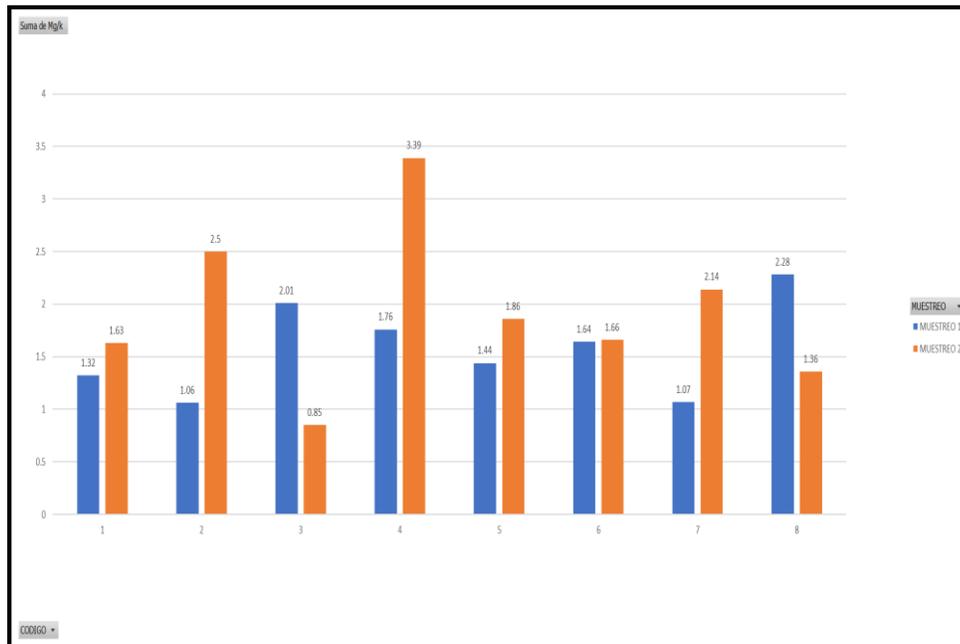
**INTERPRETACIÓN:** De acuerdo con la información obtenida se puede apreciar que la materia orgánica sufre una disminución de su porcentaje en los suelos que tiene baja densidad de plantas, en el caso de las zonas con densidad normal de plantas, el porcentaje aumentó, teniendo como factor influyente el grado de cobertura vegetal que le proporciona las plantas contra las inclemencias de las variables ambientales.



**Gráfica 8. Comparación del primer y segundo muestreo del Ca/Mg. (Autoría propia)**

**ANÁLISIS:** En la gráfica 8 se presentan la comparación del primero (Azul) y segundo (anaranjado) resultado de la relación Calcio/Magnesio, en la tabla 6 las zonas con densidad baja de plantas presentaron un incremento en promedio de 1.605, en la tabla 7 las zonas con densidad normal de plantas se disminuyeron en 0.63.

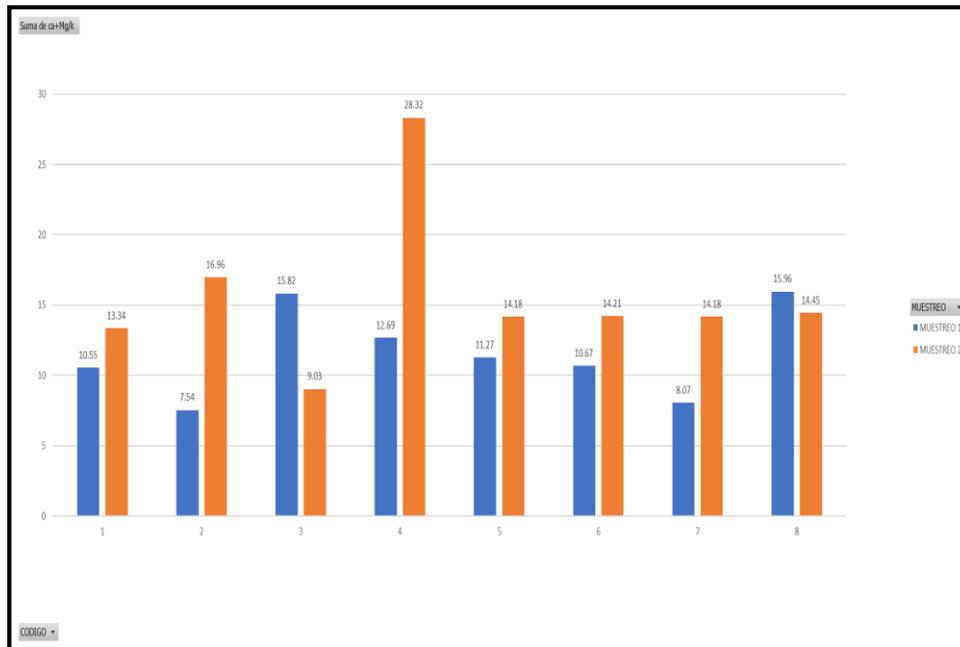
**INTERPRETACIÓN:** De acuerdo con la información obtenida se puede apreciar que la relación Ca/Mg en el suelo era alto al iniciar la investigación, mostró una ligera disminución en las muestras donde el suelo tenía cobertura vegetal, en las zonas con baja densidad de plantas el promedio aumento, sin embargo, el aumento no es significativo ni concluyente.



**Gráfica 9. Comparación del primer y segundo muestreo del Mg/K (Autoría propia)**

**ANÁLISIS:** En la gráfica 9 se presentan la comparación del primero (Azul) y segundo (anaranjado) resultado de la relación Magnesio/Potasio, en la tabla 6 las zonas con densidad baja de plantas presentaron un incremento en promedio de 0.05, en la tabla 7 las zonas con densidad normal de plantas la diferencia en promedio aumento 1.255.

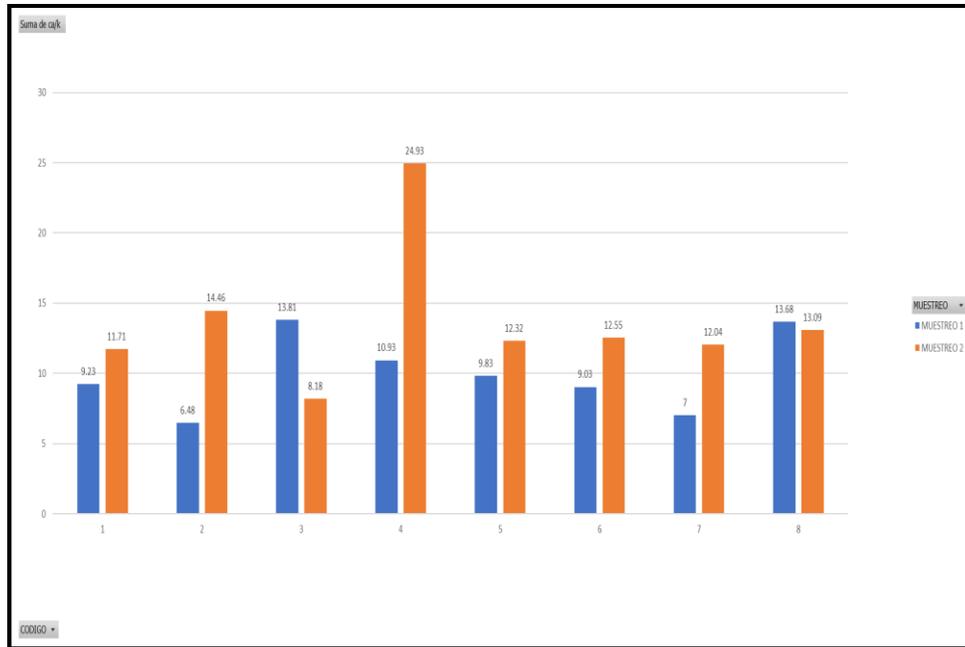
**INTERPRETACIÓN:** De acuerdo con la información obtenida se puede apreciar que la relación Mg/K en el suelo era baja al iniciar la investigación, mostró un ligero aumento en las muestras donde el suelo tenía cobertura vegetal, en las zonas con baja densidad de plantas el promedio también aumentó, pero en menor medida, la relación en el suelo sigue siendo baja, sin embargo, la cobertura vegetal prestó mejores resultados para mejorarla.



**Gráfica 10. Comparación del primer y segundo muestreo del Ca + Mg/K (Autoría propia)**

**ANÁLISIS:** En la gráfica 10 se presentan la comparación del primero (Azul) y segundo (anaranjado) resultado de la relación Calcio + Magnesio/Potasio, en la tabla 6 las zonas con densidad baja de plantas presento un incremento en promedio de 2.7616, que seguiría siendo un nivel aceptable en la relación Calcio + Magnesio/Potasio, en la tabla 7 las zonas con densidad normal de plantas la diferencia en promedio aumento 7.765.

**INTERPRETACIÓN:** De acuerdo con la información obtenida se puede apreciar que la relación Calcio + Magnesio/Potasio en el suelo era baja al iniciar la investigación, mostró una mejoría considerable en las muestras donde el suelo tenía cobertura vegetal, logrando llegar a una relación media, en las zonas con baja densidad de plantas el promedio también aumento, pero en menor medida y se puede seguir considerando como bajo en promedio.



**Gráfica 11. Comparación del primer y segundo muestreo del Ca/K (Autoría propia)**

**ANÁLISIS:** En la gráfica 11 se presentan la comparación del primero (Azul) y segundo (anaranjado) resultado de la relación Calcio/Potasio, en la tabla 6 la zona con densidad baja de plantas presentó un incremento en promedio de 2.7116, que seguiría siendo un nivel medio en la relación Calcio/Potasio, en la tabla 7 las zonas con densidad normal de plantas la diferencia en promedio aumentó 6.51.

**INTERPRETACIÓN:** De acuerdo con la información obtenida se puede apreciar que la relación Calcio/Potasio en el suelo era media al iniciar la investigación, mostró una mejoría considerable en las muestras donde el suelo tenía cobertura vegetal, pero sigue siendo una relación media, en las zonas con baja densidad de plantas el promedio también aumentó, pero en menor medida y se puede seguir considerando como nivel medio en promedio.

#### 4.4 Análisis metodológico de fertilización.

La baja densidad de plantas es calculada teniendo en cuenta los valores generados por el software SlantView 2 (Ver figura 3).

color negro	Color gris	Color lila oscuro	Total
9.07%	15.19%	7.85%	32.11%

Al sumar los 3 resultados que generaron menor valor NDVI en el vuelo de dron, resulta 32.11% de área con baja densidad de plantas, con este valor podemos calcular:

Fertilización	Ampliación /fertilización	Kg/ ha	Unidades de 45 Kg	Costo/ fertilizante- 45Kg	Costo/ha	Área de Investigación- 5.7 ha	Área Total-57 ha	Baja densidad de población/Perdida de plantas
								32.11%
1° Ampliación-Formula	24.6 -12- 18.4	256.95	5.71	\$24.86	\$141.95	\$809.12	\$7,807.28	\$2,506.92
2° Aplicación Urea	Urea-46%	256.96	5.71	\$22.00	\$125.62	\$716.03	\$6,909.10	\$2,218.51
					\$267.57	\$1,525.15	\$14,716.38	\$4,725.43

Tabla 11. Costos de fertilización en caña de azúcar, área de investigación: 5.7 ha- total de 57 ha. (Autoría propia)

También la reducción de uso del fertilizante utilizado en la hacienda achiotal disminuiría un 32.11%:

$$515 \text{ kg} \cdot 57 \text{ ha} = 29,355 \text{ kg.}$$

La aplicación de fertilizante total en la hacienda achiotal en cada ciclo significa la utilización de 29,355 kg de fertilizante químico al suelo

$$29,355 \text{ kg} * 0.3211 = 9,425.89 \text{ kg}$$

Esto significa que al utilizar una metodología más eficiente de fertilización lograríamos reducir el uso de 9,425.89 kg al suelo.

Para lograr reducir el 32.11% de las aplicaciones se debe de cumplir:

1. Realizar mínimo cada 2 años un análisis de suelo en la propiedad, para identificar elementos deficientes y niveles críticos (realizar 5 días antes de siembra).
2. Realizar formulación especial de fertilizante con sus elementos, en función de los resultados de laboratorio.
3. Utilización de dron y sensor multiespectral para determinar en porcentaje la baja densidad de plantas en la propiedad, a los 20 días después de siembra.
4. Procesar las imágenes en cualquier software para este fin, ejemplo: SlantView 2.
5. Exportar las coordenadas gps de las zonas con baja densidad de plantas.
6. Las coordenadas serán cargadas al gps de autoguía que puede ser por ejemplo el GPS-TMX-2050.
7. Ejecutar la fertilización autoguiada con el tractor, esparcidor cierre eléctrico y programado con el GPS-TMX-2050.

Ventajas:

- Se aplica solo los elementos y volumen necesario para el cultivo en función del análisis de suelo.
- No aplicar en zonas con baja densidad de plantas, representara un ahorro económico para el productor.
- Reduce el impacto ambiental del fertilizante químico.
- El costo del servicio de dron es accesible (\$1 por hectárea evaluada).

Desventajas:

- Se necesita equipo especializado (Dron, Gps autoguia del tractor, esparcidor con cierre eléctrico).
- Se necesita capital humano capacitado.
- El terreno debe de ser plano o trabajable con el tractor.

#### 4.5 Comprobación de hipótesis

OBJETIVOS	HIPÓTESIS	VARIABLES	INDICADORES
<b>HIPÓTESIS GENERAL</b>			
Medir el grado de contaminación al suelo por parte del fertilizante (24.6-12-18.4) en el cultivo de caña de azúcar.	La aplicación de fertilizante en ausencia de cultivo provoca un aumento en la contaminación al suelo.	VARIABLE INDEPENDIENTE: aplicación de fertilizante en ausencia de cultivo.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Espacio lineal de por lo menos 1 metro sin plantas.</li> </ul>
		VARIABLE DEPENDIENTE: aumento de elementos contaminantes en el suelo	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Cantidad de Fósforo en el suelo.</li> <li>• Cantidad de Potasio en el suelo.</li> </ul>
<b>HIPÓTESIS ESPECIFICA</b>			
Demostrar el beneficio de la utilización de drones y el software SlantView 2, para determinar la baja densidad de	Calcular la baja densidad de plantas en el cultivo de caña de azúcar con el sensor SlantRange, ayudara a ajustar el uso de	VARIABLE INDEPENDIENTE: Densidad de plantas en la unidad de investigación.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Detección de plantas con el Sensor SlantRange y el software SlantView 2</li> </ul>

plantas y la reducción del uso de fertilizantes al suelo en el cultivo de caña de azúcar.	fertilizantes al suelo por temporada.	VARIABLE DEPENDIENTE: Cantidad de fertilizante utilizado.	<ul style="list-style-type: none"> <li>El uso promedio por temporada es de 515 kg por hectárea de fertilizante.</li> </ul>
---	---------------------------------------	---	--

**Cuadro 1. Matriz de comparación de hipótesis (Autoría propia).**

La hipótesis que se planteó en la investigación fue que la aplicación de fertilizante en áreas con baja densidad de cultivo, provoca un aumento en la contaminación y degradación del suelo. Esta hipótesis se acepta de acuerdo con los siguientes resultados:

En la tabla 6 se presentan la diferencia promedio entre los resultados obtenidos de los análisis de suelo, obteniendo como resultado que elementos como Calcio, Magnesio y materia orgánica fueron muy afectados por la baja densidad de plantas, contribuyendo a la degradación del suelo y aumento del fenómeno de desertificación. Los elementos como Fósforo y Potasio presentaron disminuciones en sus concentraciones, con la diferencia que en zonas con baja densidad de plantas los elementos fueron degradados principalmente por los factores naturales, aumentando los impactos ambientales que esto conlleva.

Como segunda hipótesis de la investigación fue: calcular la baja densidad de plantas en el cultivo de caña de azúcar con el sensor SlantRange, ayudará a ajustar el uso de fertilizantes al suelo en cada temporada. Esta hipótesis se acepta de acuerdo con los siguientes resultados:

En la figura 7 los resultados obtenidos por el software SlantView 2, identifica las áreas que no poseen retorno de NDVI, que está directamente relacionado con la presencia de plantas. Identificando un valor de 32.11% (la suma de los 3 últimos niveles del análisis)

de despoblación de plantas, este valor significa la reducción y ajuste del uso de fertilizante en esta proporción.

#### 4.6 Presentación de los hallazgos principales

- ✓ Se determinó con el uso del sensor SlantRange en la hacienda Achiotal, que la baja densidad de plantas en el área investigada significaría el 32.11% del área sembrada (Ver figura 3).
- ✓ La aplicación de fertilizante en zonas despobladas significa la pérdida de \$4,725.43 relacionado con el área total de la hacienda que son 57ha.
- ✓ La utilización de herramienta dosificadora de precisión para el fertilizante, representaría la reducción de 29,355 kg de fertilizante al suelo despoblado en la hacienda Achiotal.
- ✓ El fósforo y potasio experimentaron una disminución de 55 (mg.kg-1 de suelo) y 47.6 (mg. kg-1 de suelo) en promedio respectivamente. Teniendo en cuenta que se encontraba en área despoblada de plantas, la perdida fue directamente por elementos ambientales.
- ✓ La materia orgánica en suelo con baja densidad de plantas disminuyó un 0.093% en promedio, mientras que en terrenos con densidades de plantas normales presentó un incremento del 0.46% en promedio.
- ✓ El comportamiento del calcio y magnesio en zonas con baja densidad de plantas, los valores tendieron a disminuir un 0.105 (cmol kg-1) y 0.216 (cmol kg-1) en promedio respectivamente. En zonas con densidad de plantas normales la tendencia fue de aumentar un 1.705(cmol kg-1) y 0.385 (cmol kg-1).

## CONCLUSIONES

- ✓ Después de analizar los estudios realizados, ha sido posible determinar que el suelo en la hacienda Achiotal se encuentra para elementos como Fosforo y Potasio en rangos MUY ALTOS, pero tolerables después de la aplicación de fertilizantes químicos, los resultados en zonas evaluadas con baja densidad de plantas presentaron mayor diferencia, pero no es suficiente para considerarlo como contaminado.
  
- ✓ Como se puede observar después de analizar los resultados de laboratorio, actualmente en la hacienda Achiotal, el suelo está perdiendo materia orgánica por tener suelo descubierto por la baja densidad de plantas, el suelo descubierto es una de las causas principales de contaminación, los fertilizantes en zonas descubiertas de vegetación son rápidamente lixiviados en suelos franco-arenosos, por la precipitación de agua, escorrentía y evaporados por poseer temperaturas de hasta 38 grados centígrados, influida por localizarse a 8.3 MSNM.
  
- ✓ La falta de un sistema de agricultura de precisión o manejo más eficientes de los recursos, incrementa el riesgo de contaminación por fertilizantes en la hacienda Achiotal y alrededores, la baja densidad de plantas produce mayor degradación del suelo y gastos innecesarios de fertilizantes en zonas no cultivadas.
  
- ✓ La utilización del dron M600PRO junto con el sensor SlantRange en agricultura, es una herramienta importante para adquirir la información pertinente y precisa, para poder dosificar el uso de fertilizantes químicos al suelo y la obtención del mosaico multiespectral brinda información sobre

densidad de plantas, deficiencia nutricional, estrés hídrico, plagas y enfermedades. Siendo una herramienta útil en la toma de decisiones y eficiencia en las producciones agrícolas.

- ✓ La materia orgánica aumentó en zonas con cultivo y disminuyó en zonas con baja densidad de plantas, de lo cual se concluye que es importante mantener el suelo con cobertura vegetal, para la mejora de las condiciones biológicas del suelo y disminuir la dependencia del uso de estos fertilizantes químicos.
  
- ✓ La falta de análisis de suelo para ajustar las dosis de fertilizante, es una de las causas principales del uso excesivo de fertilizantes químicos, se recomienda realizar un análisis de suelo cada 2 o 3 años, para poder tener una mejor gestión para el uso del fertilizante químico en la hacienda achiotal.
  
- ✓ Los análisis de suelos demuestran que los niveles de Fósforo y Potasio eran altos y los niveles de Magnesio en el suelo eran bajos, debido a que el productor ignoraba ese problema, utilizó fertilizantes con mucho Fosforo y Potasio, pero sin nada de Magnesio. Esto contribuye al deterioro del suelo en la hacienda achiotal.
  
- ✓ Para poder reducir el deterioro del suelo cuando el cultivo tiene problemas de baja densidad de plantas, es conveniente realizar monitoreos de población a partir del tercer año del establecimiento del cultivo y replantar cuando la baja densidad de plantas supere el 15% del área total.

## BIBLIOGRAFÍA

- Agricultura, O. d. (23 de 06 de 2020). *Portal de Suelos de la FAO*. Obtenido de <http://www.fao.org/soils-portal/soil-survey/clasificacion-de-suelos/sistemas-numericos/propiedades-quimicas/es/>
- Agricultura, O. d. (23 de 06 de 2020). *Portal de Suelos de la FAO*. Recuperado el 20 de mayo de 2020, de <http://www.fao.org/soils-portal/soil-survey/clasificacion-de-suelos/sistemas-numericos/propiedades-quimicas/es/>
- Alvarez, J. (6 de 07 de 2016). *Contaminación por fertilizantes químicos*. Recuperado el 21 de mayo de 2020, de [es.slideshare.net/JoannaAlvarez1/contaminacion-por-fertilizantes-quimicos](https://es.slideshare.net/JoannaAlvarez1/contaminacion-por-fertilizantes-quimicos)
- Alvarez, J. (6 de 07 de 2016). *contaminacion-por-fertilizantes-químicos*. Obtenido de [contaminacion-por-fertilizantes-quimicos: es.slideshare.net/JoannaAlvarez1/contaminacion-por-fertilizantes-quimicos](https://es.slideshare.net/JoannaAlvarez1/contaminacion-por-fertilizantes-quimicos)
- Calvo, S. (1999). *La contaminación del suelo*. Obtenido de <https://www.tesisenred.net/bitstream/handle/10803/11036/Tasm03de16.pdf>
- Calvo, S. (1999). *La contaminación del suelo*. Recuperado el 16 de mayo de 2020, de <https://www.tesisenred.net/bitstream/handle/10803/11036/Tasm03de16.pdf>
- Cárcamo, L. M. (11 de 01 de 2017). *FUSADES*. Obtenido de FUSADES: <http://fusades.org/lo-ultimo/blog/la-contaminacion-por-nutrientes-nitrogeno-y-fosforo#:~:text=LA%20CONTAMI>
- Cárcamo, L. M. (11 de 01 de 2017). *FUSADES*. Obtenido de FUSADES: <http://fusades.org/lo-ultimo/blog/la-contaminacion-por-nutrientes-nitrogeno-y-fosforo>
- Cárcamo, L. M. (11 de 01 de 2017). *FUSADES*. Recuperado el 11 de mayo de 2020, de <http://fusades.org/lo-ultimo/blog/la-contaminacion-por-nutrientes-nitrogeno-y-fosforo>
- Cárcamo, L. M. (11 de 01 de 2017). *FUSADES*. Recuperado el 20 de mayo de 2020, de FUSADES: <http://fusades.org/lo-ultimo/blog/la-contaminacion-por-nutrientes-nitrogeno-y-fosforo#:~:text=LA%20CONTAMI>
- Díaz García-Cervigón, J. J. (2015). *Estudio de Índices de vegetación a partir de imágenes aéreas tomadas desde UAS/RPAS y aplicación de estos a la agricultura de precisión (tesis de postgrado)*. Universidad Complutense de Madrid, Madrid., España.
- Díaz García-Cervigón, J. J. (2015). *Estudio de Índices de vegetación a partir de imágenes aéreas tomadas desde UAS/RPAS y aplicación de estos a la agricultura de precisión (tesis de postgrado)*. Universidad Complutense De Madrid, Madrid., España. Recuperado el 27 de mayo de 2020, de [https://eprints.ucm.es/31423/1/TFM\\_Juan\\_Diaz\\_Cervignon.pdf](https://eprints.ucm.es/31423/1/TFM_Juan_Diaz_Cervignon.pdf)

- ECHEVERRI, J. (2018). *Dinámica del fósforo en el suelo- plantas en regiones tropicales*. Universidad Nacional de Colombia Facultad de ciencias, departamento de Biociencias., Colombia. Recuperado el 15 de junio de 2020
- Echeverri, J. (2018). *Dinámica del fósforo en el suelo- plantas en regiones tropicales*. Universidad Nacional De Colombia Facultad De Ciencias, Departamento De Biociencias., Colombia. Recuperado el 15 de junio de 2020
- Espinosa, H. H. (2020). *Los Contaminantes en el Cultivo e Industrialización de la Caña de Azúcar*, 18. Recuperado el 25 de mayo de 2020, de <http://revista-agroproductividad.org/index.php/agroproductividad/article/view/594/463>
- FAO, P. d. (Jueves de Junio de 2006). *Portal de Suelos de la FAO*. Recuperado el 15 de junio de 2020, de <http://www.fao.org/soils-portal/soil-survey/propiedades-del-suelo/propiedades-fisicas/es/>
- FAO.org. (s.f.). *Portal de Suelos de la FAO*. Recuperado el 13 de Junio de 2020, de Portal de Suelos de la FAO: <http://www.fao.org/soils-portal/soil-survey/clasificacion-de-suelos/sistemas-numericos/propiedades-quimicas/es/>
- FAO-Agronoticias:. (20 de Junio de 2018). *Actualidad agropecuaria de América Latina y el Caribe*. Obtenido de Los contaminantes agrícolas: una grave amenaza para el agua del planeta: <http://www.fao.org/in-action/agronoticias/detail/es/c/1141955/>
- Lenntech, T. d. (miercoles de Junio de 2020). *Efectos ambientales del Potasio*. Recuperado el mayo 22 de 2020, de <https://www.lenntech.es/periodica/elementos/k.htm>
- López-Acevedo, M. (1994). *La Contaminación del Suelo*. Recuperado el 17 de mayo de 2020, de <https://www.tesisenred.net/bitstream/handle/10803/11036/Tasm03de16.pdf>
- Macmillan, B. (1984). *Contaminación por fertilizantes*. Recuperado el 22 de mayo de 2020, de [http://www.edafologia.net/conta/tema14/potasio.htm#:~:text=Potasio.&text=Este%20elemento%20alcanza%20en%20la,1%20\(fundamentalmente%20las%20micas\)](http://www.edafologia.net/conta/tema14/potasio.htm#:~:text=Potasio.&text=Este%20elemento%20alcanza%20en%20la,1%20(fundamentalmente%20las%20micas)).
- Martínez, R. B. (21 de 02 de 2018). *Los peligros de los fertilizantes químicos*. Recuperado el 20 de mayo de 2020, de Bio Eco Actual Febrero 2018: <http://www.bioecoactual.com>
- Montes, f. (jueves de Junio de 2020). *Nociones Ambientales Basicas para profesores rurales y extensionistas / enseñanza rural y ecología*. Recuperado el 16 de mayo de 2020, de [http://www.fao.org/3/w1309s/w1309s04.htm#P5\\_56](http://www.fao.org/3/w1309s/w1309s04.htm#P5_56)
- NATURALES, M. D. (5 de 6 de 2020). *Servicio Nacional de Estudios Territoriales*. Recuperado el 16 de mayo de 2020, de <http://www.snet.gob.sv/Geologia/pcbbase2/parametros-mapa.php>
- Ortez, L. M. (Mayo de 2015). *www.transparencia.gob.sv*. Recuperado el 13 de Julio de 2020, de [file:///C:/Users/Administrador/Downloads/Producto\\_III\\_SPM%20\(1\).PDF](file:///C:/Users/Administrador/Downloads/Producto_III_SPM%20(1).PDF)

- Pellegrini, A. E. (4 de 05 de 2020). *aulavirtualagro.com*. Recuperado el 20 de Julio de 2020, de [https://aulavirtual.agro.unlp.edu.ar/pluginfile.php/35408/mod\\_resource/content/1/14%20-%20CALCIO%2C%20MAGNESIO%20Y%20POTASIO.pdf](https://aulavirtual.agro.unlp.edu.ar/pluginfile.php/35408/mod_resource/content/1/14%20-%20CALCIO%2C%20MAGNESIO%20Y%20POTASIO.pdf)
- Pendas, K. &. (1992). *La contaminación del suelo*. Recuperado el 20 de Julio de 2020.
- Porta, J., & López Acevedo, M. &. (1994). *La contaminación del suelo*. Recuperado el 17 de mayo de 2020
- Ramírez, R. (septiembre de 1997). *propiedades físicas, químicas y biológicas*. Recuperado el 22 de mayo de 2020
- Sanabria, P. (19 de junio de 2019). *Los fertilizantes químicos generan efectos negativos en la agricultura del país*. (D. Colatino, Editor, & L. f. país, Productor) Recuperado el 15 de mayo de 2020, de Diario colatino: <https://www.diariocolatino.com/los-fertilizantes-quimicos-generan-efectos-negativos-en-la-agricultura-del-pais/>
- Sanzano, A. (Miercoles de Junio de 2020). *El fósforo del suelo*. Recuperado el 22 de mayo de 2020, de [https://www.academia.edu/30243808/EL\\_F%C3%93SFORO\\_DEL\\_SUELO](https://www.academia.edu/30243808/EL_F%C3%93SFORO_DEL_SUELO)
- Servicios. Educarm. es.* (s.f.). Recuperado el 14 de Julio de 2020, de [http://www.educarm.es/templates/portal/ficheros/websDinamicas/20/suelos\\_tema\\_2..pdf](http://www.educarm.es/templates/portal/ficheros/websDinamicas/20/suelos_tema_2..pdf)
- Urbina Zamora, C. (2016). *Nutrición y Suelos*. Recuperado el 12 de mayo de 2020, de <https://www.atamexico.com.mx/wp-content/uploads/2017/11/2-NUTRICI%C3%93N-Y-SUELOS-2016.pdf>

## ANEXOS

### **Dificultades para la realización de la investigación.**

- ✓ El tiempo de ejecución de la investigación limitada a cuatro meses, para desarrollar toda la temática.
- ✓ El presupuesto económico para la investigación era limitado.
- ✓ La zona de investigación, hacienda El Achiotal tenía cultivos escalonados, imposibilitando un muestreo general.
- ✓ La investigación se realizó en época de verano limitando el área a muestreos.
- ✓ El riesgo por inseguridad en la zona de investigación, por ser un territorio con alto nivel de violencia.
- ✓ La cuarentena nacional por la pandemia del COVID-19 limitó las salidas de campo, reuniones de grupo y asesorías, para la realización de la investigación. El Decreto Ejecutivo N.24, el cual hizo énfasis que las personas debían circular solamente para “el abastecimiento de alimentos, adquisición de medicinas o transacciones en agencias de bancos, con forme a la terminación del último dígito de su Documento Único de Identidad, pasaporte o carné de residente para extranjeros (Diario Oficial, 2020, pág. 3)”.
- ✓ El exceso de humedad provocada por las tormentas tropicales Amanda y Cristóbal, en el periodo del 22 de mayo al 21 de junio, se registró un acumulado de lluvia, cerca de los 650 milímetros. Esto originó la aceleración del proceso de lixiviación del fertilizante en la zona de investigación. (Ver anexo, gráfica 12)



**Gráfica 12.** Lluvia Acumulada en el periodo del 22 de mayo al 21 de junio de 2020. (SNET MARN)



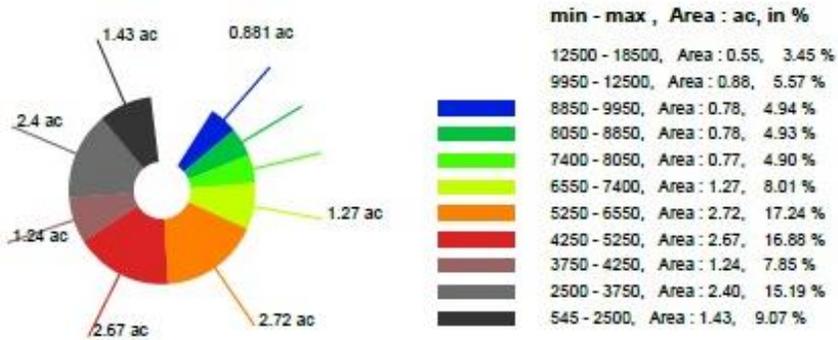
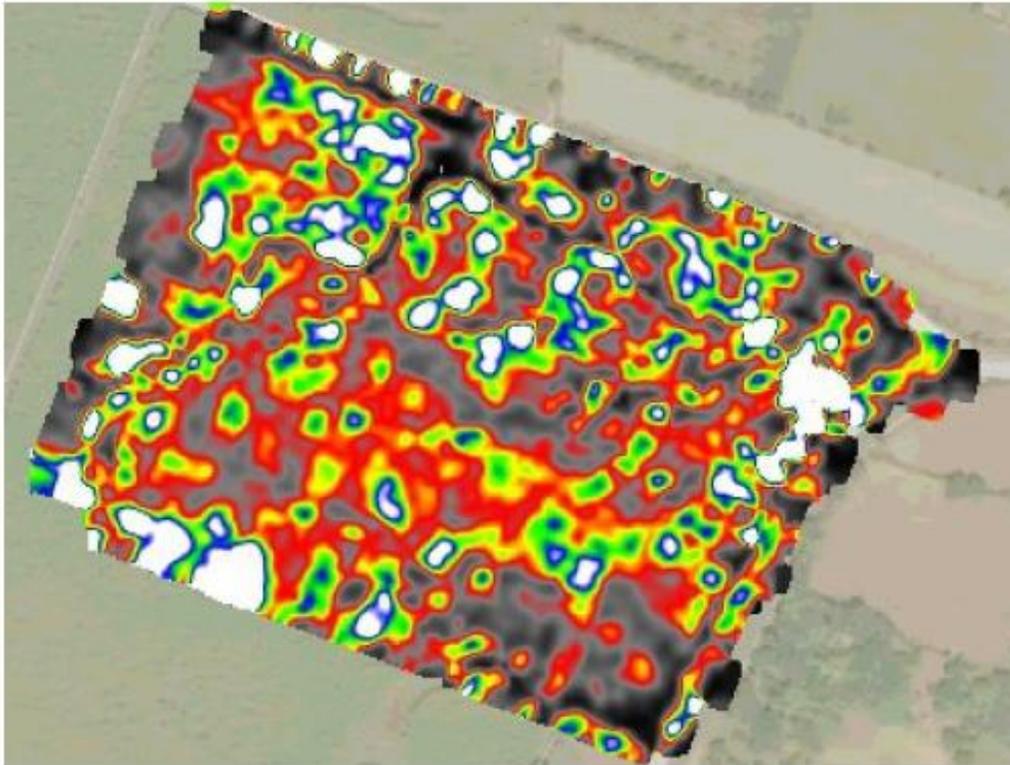
**Figura 2.** Puntos geográficos del primer muestreo (Autoría propia).

31 MAR 2020, 17:14:21 UTC

Map Center Point (Lon, Lat) : ( -89.047524, 13.382345 )

**POPULATION DENSITY**

Total map area: 28.2 acres, Valid data area: 15.8 acres.



This report was created using SlantView ver 2.15.0.2509 on 19 Apr 2020, at 12:58:42 Central America Standard Time.

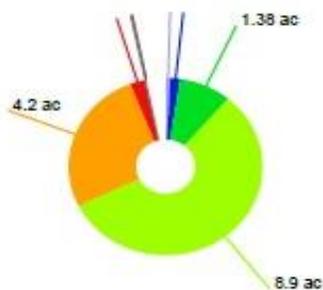
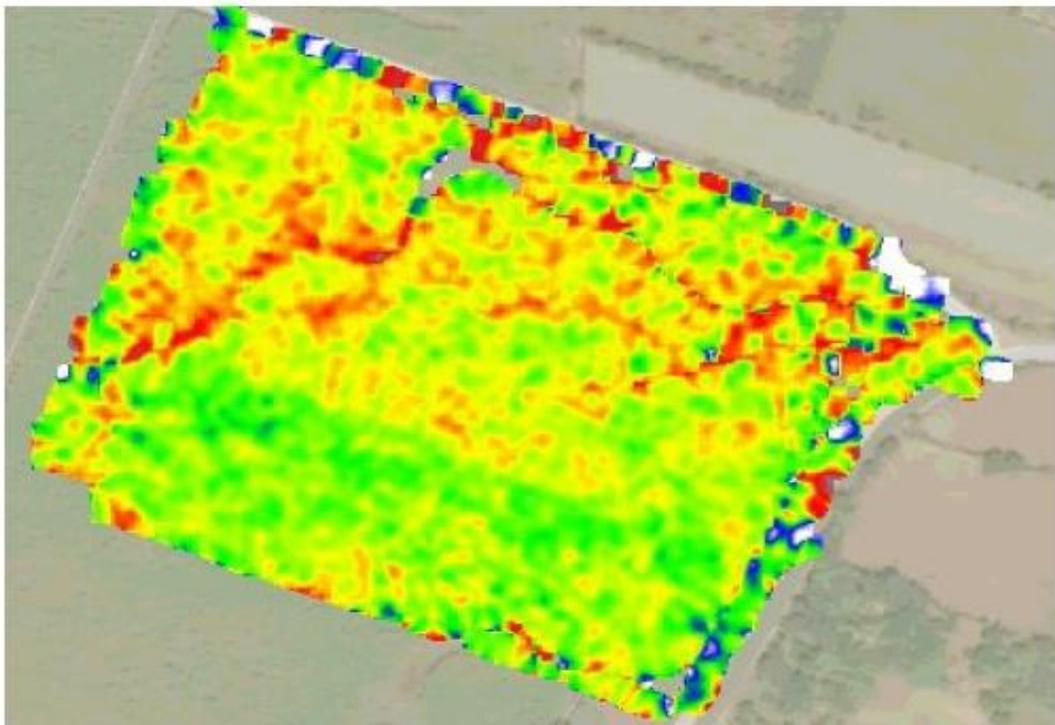
Figura 3. . Informe generado por Slant View 2 de detección de baja densidad de plantas (*Autoría propia*).

31 MAR 2020, 17:14:21 UTC

Map Center Point (Lon, Lat) : ( -89.047524, 13.382345 )

**PLANT SIZE**

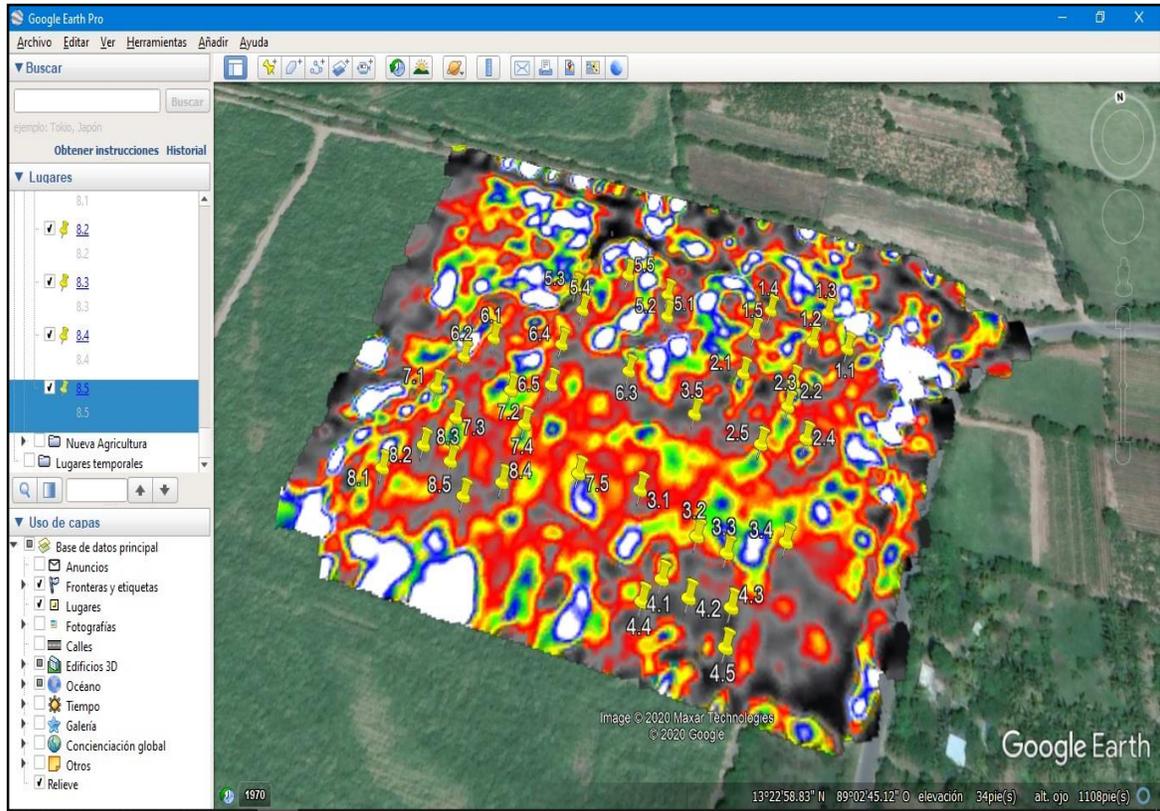
Total map area: 28.2 acres, Valid data area: 15.8 acres.



min - max	Area : ac	in %
1.350 - 1.500	Area : 0.13	0.85 %
1.200 - 1.350	Area : 0.26	1.63 %
1.050 - 1.200	Area : 1.38	8.73 %
0.900 - 1.050	Area : 8.93	56.51 %
0.750 - 0.900	Area : 4.17	26.39 %
0.600 - 0.750	Area : 0.39	2.44 %
0.450 - 0.600	Area : 0.04	0.27 %
0.300 - 0.450	Area : 0.01	0.04 %
Other	Area : 0.49	3.13 %

This report was created using SlantView ver 2.15.0.2509 on 19 Apr 2020, at 12:58:53 Central America Standard Time.

Figura 4. Informe generado por Slant View 2 para detección de tamaño de plantas (Autoría propia).

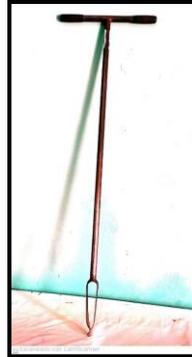


**Figura 5. Puntos Geográficos del segundo muestreo (Autoría propia).**

## Instrumentos utilizados para muestreo



**Figura 6.** Equipo trimble (GPS, antena y mochila) (Autoría propia).



**Figura 8.** Barreno (Autoría propia).



**Figura 10.** Marcador y bolsa para muestra (Autoría propia).



**Figura 7.** Cinta métrica (Autoría propia).



**Figura 9.** Balde (Autoría propia).

Fecha de muestreo: (dd/mm/aa) _____
No. de orden: _____
Producto: _____
Origen de la muestra: _____
Cliente: _____
Identificación de la muestra: _____
Responsable: _____
Muestra para <input type="checkbox"/> Análisis <input type="checkbox"/> Retención <input type="checkbox"/> Otro
Observaciones: _____
_____
_____

**Figura 11.** Ficha técnica para registro de muestra (Autoría propia).



**Figura 12.** Mavic mini, Instrumento para video. (Autoría propia).

## Instrumentos utilizados para procesamiento de imágenes



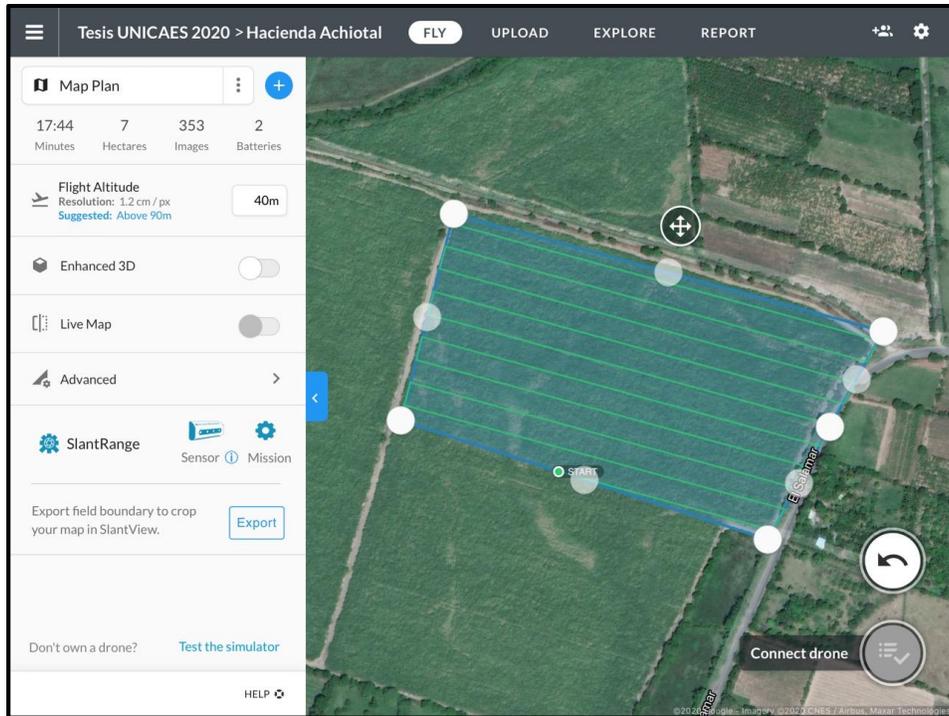
*Figura 13. Computadora para el procesamiento de imágenes multiespectrales (Autoría propia).*



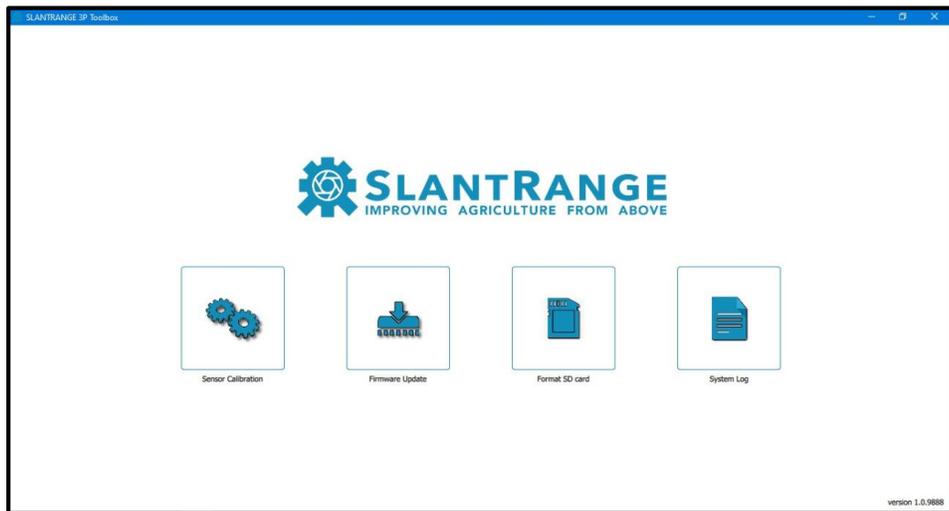
*Figura 14. Ipad para el control de vuelo del dron (Autoría propia).*



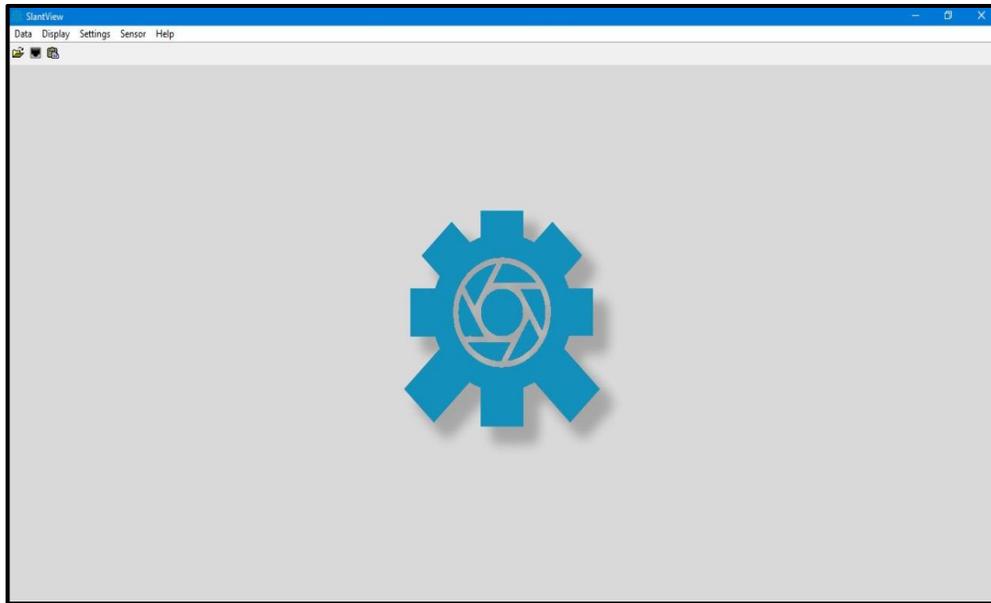
*Figura 15. Adaptador de memoria microSD para la transferencia de imágenes (Autoría propia).*



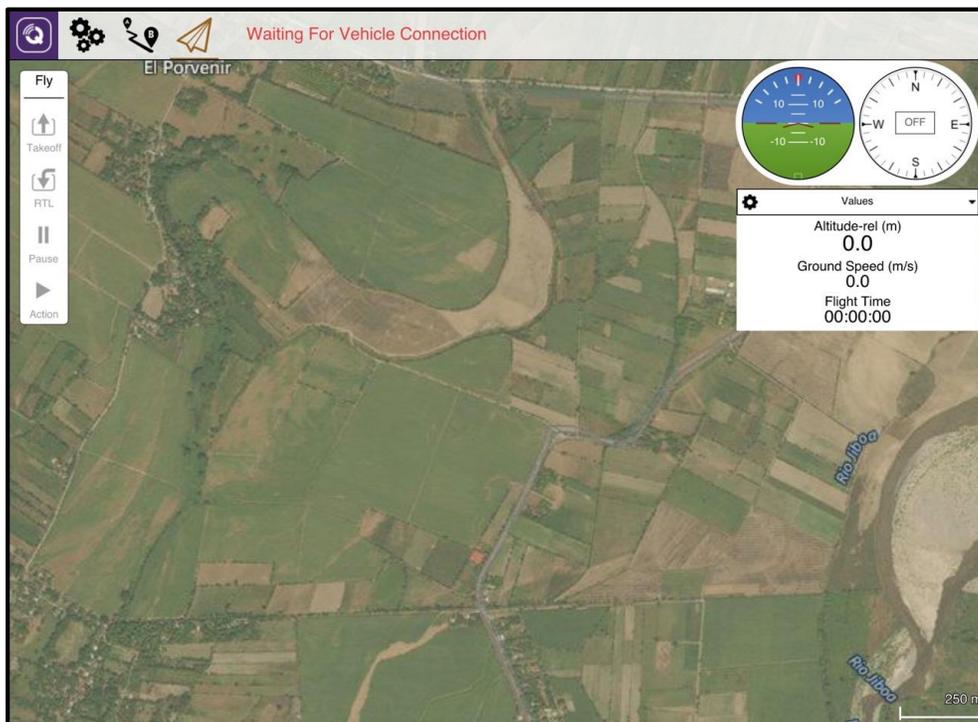
**Figura 16.** Software Drone Deploy para la planificación y vuelo del Dron (Autoría propia).



**Figura 17.** Software 3P Toolbox de calibración de sensor SlantRange (Autoría propia).



**Figura 18.** Software SlantView 2 para el procesamiento de imágenes multispectrales. (Autoría propia).



**Figura 19.** Software QGroundControl para calibración de IMU del dron M600PRO. (Autoría propia).

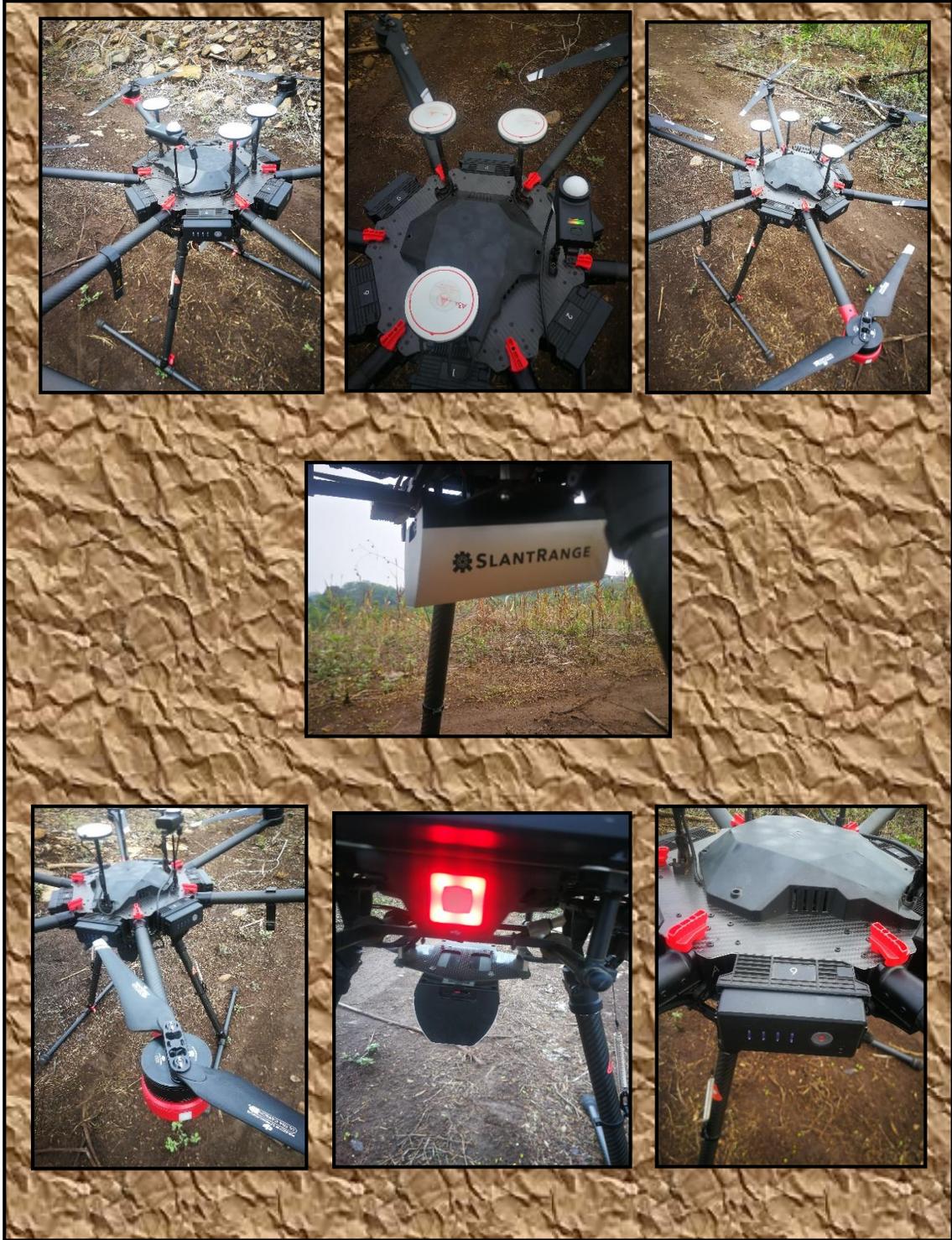


Figura 20. Dron de vuelo M600PRO (Autoría propia).



*Figura 21. Primer Muestreo de Suelo (Autoría propia).*



**Figura 22. Segundo Muestreo de Suelo. (Autoría propia).**



Figura 23. Revisión del equipo (dron, sensor, baterías). (Autoría propia)



MINISTERIO  
DE AGRICULTURA  
Y GANADERÍA

CENTRO NACIONAL DE TECNOLOGÍA AGROPECUARIA Y FORESTAL  
CENTA "ENRIQUE ALVAREZ CORDOVA"

LABORATORIO DE SUELOS

AÑO 2020

TEL. 2397-2248

Correo electronico: [labsuelos@centa.gob.sv](mailto:labsuelos@centa.gob.sv)

No. Carta	No. Muestra	Nombre del Productor	Nombre de la Finca	Canton	Municipio	Departamento	Ident.	Profundidad cm	Utilizará riego sí o no.	Cultivo a fertilizar	Nombre del responsable
c20174	m20298	NORMA LETICIA HENRIQUEZ VARGAS	SAN PEDRO MASAHUAT	LAS ISLETAS	SAN PEDRO MASAHUAT	LA PAZ	P1 JM	30cm	SI	CAÑA DE AZÚCAR	NORMA HENRIQUEZ
	m20299	NORMA LETICIA HENRIQUEZ VARGAS	SAN PEDRO MASAHUAT	LAS ISLETAS	SAN PEDRO MASAHUAT	LA PAZ	P2 JM	20cm	SI	CAÑA DE AZÚCAR	NORMA HENRIQUEZ
	m20300	NORMA LETICIA HENRIQUEZ VARGAS	SAN PEDRO MASAHUAT	LAS ISLETAS	SAN PEDRO MASAHUAT	LA PAZ	P3 JM	20cm	SI	CAÑA DE AZÚCAR	NORMA HENRIQUEZ
	m20301	NORMA LETICIA HENRIQUEZ VARGAS	SAN PEDRO MASAHUAT	LAS ISLETAS	SAN PEDRO MASAHUAT	LA PAZ	P4 JM	20cm	SI	CAÑA DE AZÚCAR	NORMA HENRIQUEZ

ANÁLISIS DE MUESTRAS PAGADAS

N° Muestra	Textura al tacto	pH en agua 1:2.5		Fósforo (mg kg <sup>-1</sup> )		Potasio (mg kg <sup>-1</sup> )		Ca (cmol kg <sup>-1</sup> )		Mg (cmol kg <sup>-1</sup> )		K int. (cmol kg <sup>-1</sup> )	%Materia orgánica	Ca/Mg		Mg/k		Ca+Mg/k		Ca/k		
M20302	FRANCO ARENOSO	6.10	LA	240	MA	297	MA	7.48	A	1.10	B	0.76	0.27	B	6.82	A	1.44	B	11.27	M	9.83	M
M20303	FRANCO ARENOSO	5.70	MA	161	MA	292	MA	6.77	A	1.23	B	0.75	0.80	B	5.52	A	1.64	B	10.67	M	9.03	M
M20304	FRANCO ARENOSO	5.80	MA	202	MA	322	MA	5.77	A	0.88	B	0.82	0.27	B	6.56	A	1.07	B	8.07	B	7.00	M
M20305	FRANCO ARENOSO	5.90	MA	148.0	MA	212	MA	7.43	A	1.24	B	0.54	1.07	B	6.01	A	2.28	B	15.96	M	13.68	M

Detalle: (mg kg<sup>-1</sup>) = ppm

(cmol kg<sup>-1</sup>) = meq/100 g de suelo

Figura 24. Resultados del primer muestreo de suelo. Centro Nacional de Tecnología Agropecuaria y Forestal (CENTA)



MINISTERIO DE AGRICULTURA Y GANADERÍA  
GOBIERNO DE EL SALVADOR

CENTRO NACIONAL DE TECNOLOGÍA AGROPECUARIA Y FORESTAL  
CENTA "ENRIQUE ALVAREZ CORDOVA"

LABORATORIO DE SUELOS

AÑO 2020

TEL. 2397-2248

Correo electrónico: [iabsuelos@centa.gob.sv](mailto:iabsuelos@centa.gob.sv)

No. Carta	No. Muestra	Nombre del Productor	Nombre de la Finca	Canton	Municipio	Departamento	Ident.L	Profundidad cm	Utilizará riego si o no	Cultivo a fertilizar	Nombre del responsable
c20175	m20302	NORMA LETICIA HENRIQUEZ VARGAS	SAN PEDRO MASAHUAT	LAS ISLETAS	SAN PEDRO MASAHUAT	LA PAZ	P1 CESAR	30cm	SI	CAÑA DE AZUCAR	NORMA HENRIQUEZ
	m20303	NORMA LETICIA HENRIQUEZ VARGAS	SAN PEDRO MASAHUAT	LAS ISLETAS	SAN PEDRO MASAHUAT	LA PAZ	P2 CESAR	20cm	SI	CAÑA DE AZUCAR	NORMA HENRIQUEZ
	m20304	NORMA LETICIA HENRIQUEZ VARGAS	SAN PEDRO MASAHUAT	LAS ISLETAS	SAN PEDRO MASAHUAT	LA PAZ	P3 CESAR	20cm	SI	CAÑA DE AZUCAR	NORMA HENRIQUEZ
	m20305	NORMA LETICIA HENRIQUEZ VARGAS	SAN PEDRO MASAHUAT	LAS ISLETAS	SAN PEDRO MASAHUAT	LA PAZ	P4 CESAR	20cm	SI	CAÑA DE AZUCAR	NORMA HENRIQUEZ

ANÁLISIS DE MUESTRAS PAGADAS																						
N° Muestra	Textura al tacto	pH en agua 1:2.5		Fósforo (mg kg <sup>-1</sup> )		Potasio (mg kg <sup>-1</sup> )		Ca (cmol kg <sup>-1</sup> )		Mg (cmol kg <sup>-1</sup> )		K int. (cmol kg <sup>-1</sup> )		%Materia orgánica	Ca/Mg		Mg/k		Ca+Mg/k		Ca/k	
<b>M20298</b>	ARENA FRANCA	6.00	MA	301	MA	260	MA	6.17	A	0.88	B	0.67	1.07	B	7.01	A	1.32	B	10.55	M	9.23	M
<b>M20299</b>	ARENA FRANCA	5.60	MA	130	MA	244	MA	4.05	A	0.66	MB	0.62	1.07	B	6.11	A	1.06	B	7.54	B	6.48	M
<b>M20300</b>	FRANCO ARENOSO	5.80	MA	196	MA	214	MA	7.59	A	1.11	B	0.55	1.60	B	6.86	A	2.01	B	15.82	M	13.81	M
<b>M20301</b>	FRANCO ARENOSO	5.80	MA	184.0	MA	273	MA	7.65	A	1.23	B	0.70	0.40	B	6.20	A	1.76	B	12.69	M	10.93	M

Detalle: (mg kg<sup>-1</sup>) = ppm

(cmol kg<sup>-1</sup>) = meq/100 g de suelo

Figura 25. Resultados del primer muestreo de suelo. Centro Nacional de Tecnología Agropecuaria y Forestal (CENTA)



MINISTERIO  
DE AGRICULTURA  
Y GANADERÍA

CENTRO NACIONAL DE TECNOLOGÍA AGROPECUARIA Y FORESTAL  
CENTA "ENRIQUE ALVAREZ CORDOVA"

LABORATORIO DE SUELOS

AÑO 2020

TEL. 2397-2248

Correo electrónico: [labsuelos@centa.gob.sv](mailto:labsuelos@centa.gob.sv)

No. Carta	No. Muestra	Nombre del Productor	Nombre de la Finca	Canton	Municipio	Departamento	Ident.	Profundidad cm	Utilizará riego al año	Cultivo a fertilizar	Nombre del responsable
20184	M20324	CÉSAR ERNESTO QUEZADA	ACHIDTALES	ACHIDTAL	ACHIDTAL	LA PAZ	P1	30cm	SI	CAÑA	CÉSAR QUEZADA
	M20325	CÉSAR ERNESTO QUEZADA	ACHIDTALES	ACHIDTAL	ACHIDTAL	LA PAZ	P2-0	30cm	SI	CAÑA	CÉSAR QUEZADA
	M20326	CÉSAR ERNESTO QUEZADA	ACHIDTALES	ACHIDTAL	ACHIDTAL	LA PAZ	P3	30cm	SI	CAÑA	CÉSAR QUEZADA
	M20327	CÉSAR ERNESTO QUEZADA	ACHIDTALES	ACHIDTAL	ACHIDTAL	LA PAZ	P4	30cm	SI	CAÑA	CÉSAR QUEZADA

ANÁLISIS DE MUESTRAS PAGADAS																						
N° Muestra	Textura al tacto	pH en agua 1:2.5		Fósforo (mg kg <sup>-1</sup> )		Potasio (mg kg <sup>-1</sup> )		Ca (cmol kg <sup>-1</sup> )		Mg (cmol kg <sup>-1</sup> )		K int. (cmol kg <sup>-1</sup> )	%Materia orgánica	Ca/Mg		Mg/k		Ca+Mg/k		Ca/k		
M20324	ARENA FRANCA	5.7	MA	173	MA	226	MA	6.80	A	0.94	B	0.58	1.06	B	7.21	A	1.63	B	13.34	M	11.71	M
M20325	ARENA FRANCA	5.9	MA	162	MA	214	MA	7.92	A	1.37	B	0.55	1.33	B	5.78	A	2.50	M	16.96	M	14.46	M
M20326	FRANCO ARENOSO	6.5	LA	196	MA	269	MA	5.65	A	0.58	MB	0.69	0.40	B	9.68	A	0.85	B	9.03	B	8.18	M
M20327	FRANCO ARENOSO	6.2	LA	130	MA	163	A	10.43	A	1.42	B	0.42	0.93	B	7.34	A	3.39	M	28.32	M	24.93	M

Detalle: (mg kg<sup>-1</sup>) = ppm

(cmol kg<sup>-1</sup>) = meq/100 g de suelo

Figura 26. Resultados del segundo muestreo de suelo. Centro Nacional de Tecnología Agropecuaria y Forestal (CENTA)



MINISTERIO  
DE AGRICULTURA  
Y GANADERÍA

CENTRO NACIONAL DE TECNOLOGÍA AGROPECUARIA Y FORESTAL  
CENTA "ENRIQUE ALVAREZ CORDOVA"

LABORATORIO DE SUELOS

AÑO 2020

TEL. 2397-2248

Correo electrónico: [labsuelos@centa.gob.sv](mailto:labsuelos@centa.gob.sv)

No. Carta	No. Muestra	Nombre del Productor	Nombre de la Finca	Canton	Municipio	Departamento	Ident.	Profundidad cm	Utrizará riego si o no	Cultivo a fertilizar	Nombre del responsable
20185	M20328	CÉSAR ERNESTO QUEZADA	ACHIOTALES	ACHIOTAL	ACHIOTAL	LA PAZ	P5	30cm	SI	CAÑA	CÉSAR QUEZADA
	M20329	CÉSAR ERNESTO QUEZADA	ACHIOTALES	ACHIOTAL	ACHIOTAL	LA PAZ	P6	30cm	SI	CAÑA	CÉSAR QUEZADA
	M20330	CÉSAR ERNESTO QUEZADA	ACHIOTALES	ACHIOTAL	ACHIOTAL	LA PAZ	P7	30cm	SI	CAÑA	CÉSAR QUEZADA
	M20331	CÉSAR ERNESTO QUEZADA	ACHIOTALES	ACHIOTAL	ACHIOTAL	LA PAZ	P8	30cm	SI	CAÑA	CÉSAR QUEZADA

ANÁLISIS DE MUESTRAS PAGADAS																						
Nº Muestra	Textura al tacto	pH en agua 1:2.5		Fósforo (mg kg <sup>-1</sup> )		Potasio (mg kg <sup>-1</sup> )		Ca (cmol kg <sup>-1</sup> )		Mg (cmol kg <sup>-1</sup> )		K int. (cmol kg <sup>-1</sup> )		%Materia orgánica	Ca/Mg		Mg/k		Ca+Mg/k		Ca/k	
M20328	FRANCO ARENOSO	6.0	MA	158	MA	233	MA	7.35	A	1.11	B	0.50	0.66	B	6.64	A	1.86	B	14.18	M	12.32	M
M20329	FRANCO ARENOSO	5.8	MA	108	MA	184	A	5.94	A	0.79	MB	0.47	0.80	B	7.55	A	1.66	B	14.21	M	12.55	M
M20330	FRANCO ARENOSO	5.6	MA	87	MA	172	A	5.31	A	0.94	B	0.44	0.93	B	5.63	A	2.14	B	14.18	M	12.04	M
M20331	FRANCO ARENOSO	5.9	MA	135	MA	187	A	6.29	A	0.65	MB	0.48	0.80	B	9.63	A	1.36	B	14.45	M	13.09	M

Detalle: (mg kg<sup>-1</sup>) = ppm

(cmol kg<sup>-1</sup>) = meq/100 g de suelo

Figura 27. Resultados del segundo muestreo de suelo. Centro Nacional de Tecnología Agropecuaria y Forestal (CENTA)

Rangos de Análisis

Análisis	Valores	Rangos	Significado
pH en Agua	4.1 a 4.4	EA	EXTREMADAMENTE ÁCIDO
	4.5 a 5.0	MFA	MUY FUERTEMENTE ÁCIDO
	5.1 a 5.5	FA	FUERTEMENTE ÁCIDO
	5.6 a 6.0	MA	MODERADAMENTE ÁCIDO
	6.1 a 6.5	LA	LIGERAMENTE ÁCIDO
	6.6 a 7.3	N	NEUTRO
	7.4 a 8.0	MAL	MODERADAMENTE ALCALINO
	8.1 a 9.0	FAL	FUERTEMENTE ALCALINO
	> 9.0	EAL	EXTREMADAMENTE ALCALINO

Rangos	Significado
MB	MUY BAJO
B	BAJO
M	MEDIO
A	ALTO
MA	MUY ALTO
NS	NO SODICO
S	SODICO

Analistas: Inga. Claudia Lino  
 Licda. Sonia de Alegria  
 Licda. Yaneth Valencia  
 Inga. Sandra Najarro

Tabla 12. Rangos de análisis. Centro Nacional de Tecnología Agropecuaria y Forestal (CENTA)