

**EVALUACIÓN DE LAS PROPIEDADES FÍSICAS Y QUÍMICAS DE SUELOS  
ORIENTADOS A LA AGRICULTURA DE PRECISIÓN EN ZONAS CULTIVADAS  
CON CAÑA DE AZÚCAR DEL VALLE GEOGRÁFICO DEL RÍO CAUCA**

**ANDRÉS VIVAS JARAMILLO**

**UNIVERSIDAD DEL CAUCA  
FACULTAD DE CIENCIAS NATURALES, EXACTAS Y DE LA EDUCACIÓN  
DEPARTAMENTO DE QUÍMICA  
POPAYÁN  
2011**

**EVALUACIÓN DE LAS PROPIEDADES FÍSICAS Y QUÍMICAS SUELOS  
ORIENTADOS A LA AGRICULTURA DE PRECISIÓN EN ZONAS CULTIVADAS  
CON CAÑA DE AZÚCAR DEL VALLE GEOGRÁFICO DEL RÍO CAUCA**

**ANDRÉS VIVAS JARAMILLO**

**Trabajo de grado en modalidad pasantía presentado como requisito parcial  
para optar al título de QUÍMICO**

**DIRECTOR**

**Jesús E. Larrahondo, Ph.D.**

Químico Jefe

Centro de Investigación de la Caña de Azúcar de Colombia,  
CENICAÑA

**CODIRECTORA**

**Isabel Bravo Realpe, M.Sc**

Grupo de Investigación AGROQUÍMICA

Universidad del Cauca

**UNIVERSIDAD DEL CAUCA**

**FACULTAD DE CIENCIAS NATURALES, EXACTAS Y DE LA EDUCACIÓN**

**DEPARTAMENTO DE QUÍMICA**

**POPAYÁN**

**2011**

**Nota de Aceptación**

---

---

---

**Director**

---

Jesús Eliécer Larrahondo  
Ph.D.

**Jurado**

---

Giovanni Rojas  
Ph.D.

**Jurado**

---

Edier Humberto Pérez  
Ph.D.

**Fecha de Sustentación: Popayán, 28 de Enero de 2011**

*“Heredarás el suelo sagrado y la fertilidad será transmitida de generación en generación. Protegerás tus campos contra la erosión y tus florestas contra la desolación, e impedirás que tus fuentes se sequen y tus campos sean devastados por el fuego, para que tus descendientes tengan abundancia para siempre. Si fallas, o alguien después de ti, en la eterna vigilancia de tus tierras, tus campos abundantes se transformarán en suelo estéril y pedregoso o en grutas áridas. Tus descendientes serán cada vez menos numerosos, vivirán miserablemente y serán eliminados de la tierra”*

*Walter Clay*

*“A la memoria de mi mascota quien me acompañó  
en todos mis estudios primarios, secundarios y universitarios  
durante 16 largos años.”*

## AGRADECIMIENTOS

*Estas líneas son tal vez las más difíciles, pero así mismo las más merecidas de ser plasmadas en negro sobre blanco. En este punto, se hace necesario volver la mirada al pasado, para recordar y agradecer a todas las personas que de una u otra forma brindaron su apoyo y ayudaron a llevar este trabajo a su punto seguido, más nunca final.*

*El autor expresa su agradecimiento al Centro de Investigación de la Caña de Azúcar CENICAÑA, y en especial al Doctor Jesús Larrahondo, Camilo Isaacs y Javier Carbonell por darle la oportunidad de realizar el presente estudio.*

*Sincera gratitud a sus padres José Darley Vivas y Gloria Stella Jaramillo quienes, con la bendición de Dios, le brindaron todo el respaldo, la confianza, los estímulos y los consejos que enseñan que al final todo esfuerzo se ve recompensado; un sentido agradecimiento a toda su familia por el invariable e ilimitado apoyo, especialmente a sus abuelos Lilita, Napoleón, Ruby y a su hermana Andrea por toda la colaboración brindada, resaltando el apoyo moral, económico y emocional; finalmente, un grato e inmenso cariño a la familia Moreno Vivas por haberse convertido en su segundo hogar durante la culminación de este largo proceso. Todos sus esfuerzos y sacrificios han dado sus frutos, por todo ello, este logro también es de ustedes. Que Dios los bendiga a todos.*

*Un reconocimiento especial a la Universidad del Cauca, al departamento de Química y a los profesores que lo acompañaron en el camino hacia la formación profesional, en particular a Isabel Bravo, Fabio Cabezas y Edier H. Pérez por la orientación, la amistad, el apoyo y la enseñanza de todo aquello que hoy se muestra en gran parte de este trabajo*

*Reconoce el apoyo brindado y la amistad incondicional de muchos de sus compañeros de carrera. Los amigos, esa familia que dichosamente se gana día tras día, hacen que todos aquellos gratos momentos nunca se olviden. Marcela Suárez, Liliana Bastidas, Yohanna Tobar, Lisbeth Benavides y Ángela Correa, quienes siempre tuvieron ese gran espíritu de colaboración durante esta larga etapa universitaria.*

*Así mismo agradece a la Química Liliana Echeverry, al Ingeniero Oscar García, al estadístico Carlos Moreno, a los Tecnólogos Miriam Rojas y Cristhian Yarce, a los auxiliares Freiman Urrutía, Yeison Campo y Luis Nuñez, y por supuesto a Floralba Coral y demás operarios del centro de investigación por su valiosa e invaluable colaboración en la realización de este estudio.*

## TABLA DE CONTENIDO

	<b>Pág.</b>
<b>RESUMEN</b>	20
<b>1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA</b>	22
<b>2. OBJETIVOS</b>	23
2.1 Objetivo General	23
2.2 Objetivos Específicos	23
<b>3. FUNDAMENTO TEÓRICO Y ESTADO DEL ARTE</b>	24
<b>3.1 CULTIVO DE LA CAÑA DE AZÚCAR (<i>Saccharum officinarum</i>)</b>	24
<b>3.2 AGRICULTURA DE PRECISIÓN (AP)</b>	27
<b>3.3 ZONIFICACIÓN AGROECOLÓGICA</b>	28
3.3.1 Grupos Homogéneos de Suelos	29
3.3.2 Grupos de Humedad	31
<b>3.4 VARIABILIDAD DE LAS PROPIEDADES DEL SUELO</b>	32
3.4.1 Componentes de la Variabilidad	33
3.4.2 Medición de la Variabilidad	34
3.4.3 Evaluación de la Variabilidad y su Importancia	34
<b>3.5 ESPECTROSCOPIA DE INFRARROJO CERCANO (NIRS)</b>	34
3.5.1 Fundamento Físicoquímico	35
3.5.1.1 Origen de la Absorción en el Infrarrojo Cercano (NIR)	36
3.5.2 Espectroscopía de Reflectancia	41
3.5.2.1 Principio del Método	41
3.5.3 Instrumentación	43
3.5.4 Ventajas e Inconvenientes de la Espectroscopia NIR	44
3.5.5 Estandarización y Calibración del Equipo NIR	45
3.5.6 Aplicaciones de la Espectroscopía NIR	46

<b>3.6 SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA (SIG)</b>	<b>47</b>
3.6.1 Componentes de un SIG	47
3.6.2 Preguntas que puede responder un SIG	49
<b>3.7 SISTEMAS DE POSICIONAMIENTO GLOBAL (GPS)</b>	<b>50</b>
3.7.1 Componentes de un GPS	50
3.7.2 Funcionamiento de un GPS	51
<b>4. METODOLOGÍA</b>	<b>53</b>
<b>4.1 UBICACIÓN GEOGRÁFICA</b>	<b>53</b>
<b>4.2 DURACIÓN</b>	<b>53</b>
<b>4.3 SELECCIÓN DE LAS SUERTES</b>	<b>54</b>
<b>4.4 MUESTREOS</b>	<b>55</b>
<b>4.5 ANÁLISIS DE SUELOS</b>	<b>56</b>
4.5.1 Análisis Físicos	56
➤ Textura	56
➤ Densidad Aparente	57
4.5.2 Análisis Químicos	57
➤ pH	57
➤ Materia Orgánica	57
➤ Nitrógeno	58
➤ Fósforo disponible	58
➤ Bases Intercambiables (Ca, Mg, Na y K)	59
➤ Capacidad de Intercambio Catiónico (CIC)	59
➤ Elementos Menores (Fe, Cu, Mn y Zn)	59
➤ Boro	60
<b>4.6 ANÁLISIS ESTADÍSTICO</b>	<b>60</b>
<b>5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN</b>	<b>61</b>
<b>5.1 SELECCIÓN DE LAS SUERTES PARA LA REALIZACIÓN DEL ESTUDIO</b>	<b>61</b>
<b>5.2 DEFINICIÓN DE LOS LOTES SELECCIONADOS</b>	<b>61</b>



<b>5.3 ANÁLISIS DE SUELOS</b>	67
5.3.1 Análisis de los suelos de la hacienda Peralonso, suerte 121.	67
5.3.1.1 Análisis de los suelos de la hacienda Peralonso, suerte 121, al inicio de cultivo (T1).	67
5.3.1.2 Análisis de los suelos de la hacienda Peralonso, suerte 121, después de la segunda fertilización (T2).	74
5.3.2 Análisis de los suelos de la hacienda Santa Elena, suerte 80.	80
5.3.2.1 Análisis de los suelos de la hacienda Santa Elena, suerte 80, al inicio de cultivo (T1).	80
5.3.2.2 Análisis de los suelos de la hacienda Santa Elena, suerte 80, después de la segunda fertilización (T2).	86
5.3.3 Análisis de los suelos de la hacienda San Rafael, suerte 261.	91
5.3.3.1 Análisis de los suelos de la hacienda San Rafael, suerte 261, al inicio de cultivo (T1).	92
5.3.3.2 Análisis de los suelos de la hacienda San Rafael, suerte 261, después de la fertilización (T2).	97
<b>6. DISCUSIÓN GLOBAL</b>	103
<b>7. CONCLUSIONES</b>	116
<b>BIBLIOGRAFÍA</b>	119
<b>ANEXOS</b>	126

## LISTA DE TABLAS

		Pág
<b>Tabla 1.</b>	Extracción de nutrimentos por cada 100 toneladas de tallos de caña y de la variedad CC 85-92 cosechadas. Valle del río Cauca, Colombia.	25
<b>Tabla 2.</b>	Características principales de los grupos homogéneos de suelos correspondientes a las zonas agroecológicas de las suertes en estudio (Denominación CENICAÑA).	30
<b>Tabla 3.</b>	Características principales de los grupos de humedad correspondientes a las zonas agroecológicas de las suertes en estudio (Denominación CENICAÑA).	32
<b>Tabla 4.</b>	Diferentes tipos de variabilidad en sistemas agrícolas.	33
<b>Tabla 5.</b>	División de la región infrarroja del espectro y el origen de la absorción.	41
<b>Tabla 6.</b>	Principales ventajas e inconvenientes de la espectroscopía NIR.	45
<b>Tabla 7.</b>	Suertes designadas para la realización del estudio.	62
<b>Tabla 8.</b>	Área total, área experimental y puntos de muestreo de las suertes designadas para la realización del estudio.	62
<b>Tabla 9.</b>	Parámetros del desarrollo del cultivo de caña de la variedad CC 85-92, sembrada en la hacienda Peralonso, suerte 121.	67
<b>Tabla 10.</b>	Parámetros del desarrollo del cultivo de caña de la variedad CC 85-92, sembrada en la hacienda Santa Elena, suerte 80.	80
<b>Tabla 11.</b>	Parámetros del desarrollo del cultivo de caña de la variedad CC 93-2804, sembrada en la hacienda San Rafael, suerte 261.	91
<b>Tabla 12.</b>	Estimación de componentes de varianza entre e intrasuerte para cada una de las variables medidas en el T1.	110
<b>Tabla 13.</b>	Estimación de componentes de varianza entre e intrasuerte para cada una de las variables medidas en el T2.	111

<b>Tabla 14.</b>	Correlaciones lineales de Pearson para las diferentes variables medidas en las tres suertes, en el T1.	112
<b>Tabla 15.</b>	Tabla de frecuencias para la relación MO/N en las diferentes suertes, tratamientos T1 y T2.	113
<b>Tabla 16.</b>	Correlaciones lineales de Pearson para las diferentes variables medidas en las tres suertes, en el T2.	114

## LISTA DE FIGURAS

		Pág.
<b>Figura 1.</b>	Grupos homogéneos de suelos en el valle geográfico del río Cauca.	29
<b>Figura 2.</b>	Grupos de humedad del valle geográfico del río Cauca.	31
<b>Figura 3.</b>	Espectro electromagnético.	35
<b>Figura 4.</b>	Representación esquemática de los modelos armónico y anarmónico para la energía potencial de una molécula diatómica.	37
<b>Figura 5.</b>	Espectro típico de la región NIR.	38
<b>Figura 6.</b>	Espectro de varias muestras de suelo tomado en el espectrofotómetro de infrarrojo cercano de CENICAÑA, mediante el programa VISION® versión 2.5.	39
<b>Figura 7.</b>	Tabla de asignación de bandas en la región NIR.	40
<b>Figura 8.</b>	Diferentes modalidades de medida en espectroscopía NIR.	42
<b>Figura 9.</b>	Representación del efecto de reflectancia difusa.	43
<b>Figura 10.</b>	Esquema óptico de un espectrofotómetro de infrarrojo cercano (NIR).	43
<b>Figura 11.</b>	Componentes básicos de un SIG.	48
<b>Figura 12.</b>	Algunas áreas de aplicación de los SIG.	50
<b>Figura 13.</b>	Componentes del Sistema GPS.	51
<b>Figura 14.</b>	Ubicación de la estación experimental del Centro de Investigación de la Caña de Azúcar, CENICAÑA.	54
<b>Figura 15.</b>	Esquema de la georreferenciación de los puntos para el muestreo de los suelos.	55

<b>Figura 16.</b>	Esquema de la grilla de 25 x 25 m utilizada para el muestreo de los suelos.	55
<b>Figura 17.</b>	Muestréos realizados con barreno y almacenamiento de las muestras en bolsas de plástico para posterior traslado al laboratorio de análisis de suelos.	56
<b>Figura 18.</b>	Espectrofotómetro de infrarrojo cercano Foss NIRSystems Model 6500 + PC y celda con muestra de suelo antes de la lectura (Cenicaña).	57
<b>Figura 19.</b>	Ubicación geográfica de las suertes designadas para la realización del estudio.	63
<b>Figura 20.</b>	Área experimental y puntos de muestreo correspondientes a la hacienda Peralonso, suerte 121.	64
<b>Figura 21.</b>	Área experimental y puntos de muestreo correspondientes a la hacienda Santa Elena, suerte 80.	65
<b>Figura 22.</b>	Área experimental y puntos de muestreo correspondientes a la hacienda San Rafael, suerte 261.	66
<b>Figura 23.</b>	Porcentajes de arcilla y Densidad aparente, presentes en la hacienda Peralonso, suerte 121.	68
<b>Figura 24.</b>	pH en la hacienda Peralonso, suerte 121, tratamiento 1 (T1).	69
<b>Figura 25.</b>	Espectro NIR de la MO en la hacienda Peralonso, suerte 121, tratamiento 1 (T1).	69
<b>Figura 26.</b>	MO y N en la hacienda Peralonso, suerte 121, tratamiento 1 (T1).	70
<b>Figura 27.</b>	Concentración de P en la hacienda Peralonso, suerte 121, tratamiento 1 (T1).	71
<b>Figura 28.</b>	CIC y concentración de bases intercambiables en la hacienda Peralonso, suerte 121, tratamiento 1 (T1).	72
<b>Figura 29.</b>	Concentración de elementos menores en la hacienda Peralonso, suerte 121, tratamiento 1 (T1).	73
<b>Figura 30.</b>	pH en la hacienda Peralonso, suerte 121, tratamiento 2 (T2).	74

<b>Figura 31.</b>	Espectro NIR de la MO en la hacienda Peralonso, suerte 121, tratamiento 2 (T2).	75
<b>Figura 32.</b>	MO y N en la hacienda Peralonso, suerte 121, tratamiento 2 (T2).	76
<b>Figura 33.</b>	Concentración de P en la hacienda Peralonso 121, tratamiento 2 (T2).	76
<b>Figura 34.</b>	CIC y concentración de bases intercambiables en la hacienda Peralonso, suerte 121, tratamiento 2 (T2).	78
<b>Figura 35.</b>	Concentración de elementos menores en la hacienda Peralonso, suerte 121, tratamiento 2 (T2).	79
<b>Figura 36.</b>	Porcentajes de arcilla y Densidad aparente, presentes en la hacienda Santa Elena, suerte 80.	81
<b>Figura 37.</b>	pH en la hacienda Santa Elena, suerte 80, tratamiento 1 (T1).	81
<b>Figura 38.</b>	Espectro NIR de la MO en la hacienda Santa Elena, suerte 80, tratamiento 1 (T1).	82
<b>Figura 39.</b>	MO y N en la hacienda Santa Elena, suerte 80, tratamiento 1 (T1).	82
<b>Figura 40.</b>	Concentración de P en la hacienda Santa Elena, suerte 80, tratamiento 1 (T1).	83
<b>Figura 41.</b>	CIC y concentración de bases intercambiables en la hacienda Santa Elena, suerte 80, tratamiento 1 (T1).	84
<b>Figura 42.</b>	Concentración de elementos menores en la hacienda Santa Elena, suerte 80, tratamiento 1 (T1).	85
<b>Figura 43.</b>	pH en la hacienda Santa Elena, suerte 80, tratamiento (T2).	86
<b>Figura 44.</b>	Espectro NIR de la MO en la hacienda Santa Elena, suerte 80, tratamiento 2 (T2).	87
<b>Figura 45.</b>	MO y N en la hacienda Santa Elena, suerte 80, tratamiento 2 (T2).	88
<b>Figura 46.</b>	Concentración de P en la hacienda Santa Elena, suerte 80, tratamiento 2 (T2).	88

<b>Figura 47.</b>	CIC y concentración de bases intercambiables en la hacienda Santa Elena, suerte 80, tratamiento 2 (T2).	89
<b>Figura 48.</b>	Concentración de elementos menores en la hacienda Santa Elena, suerte 80, tratamiento 2 (T2).	90
<b>Figura 49.</b>	Estructura química del 3,4-dimetilpirazol fosfato.	91
<b>Figura 50.</b>	Porcentajes de arcilla y Densidad aparente, presentes en la hacienda San Rafael, suerte 261.	92
<b>Figura 51.</b>	pH en la hacienda San Rafael, suerte 261, tratamiento 1 (T1).	93
<b>Figura 52.</b>	Espectro NIR de la MO en la hacienda San Rafael, suerte 261, tratamiento 1 (T1).	94
<b>Figura 53.</b>	MO y N en la hacienda San Rafael, suerte 261, tratamiento 1 (T1).	94
<b>Figura 54.</b>	Concentración de P en la hacienda San Rafael, suerte 261, tratamiento 1 (T1).	95
<b>Figura 55.</b>	CIC y concentración de bases intercambiables en la hacienda San Rafael, suerte 261, tratamiento 1 (T1).	96
<b>Figura 56.</b>	Concentración de elementos menores en la hacienda San Rafael, suerte 261, tratamiento 1 (T1).	97
<b>Figura 57.</b>	pH en la hacienda San Rafael, suerte 261, tratamiento 2 (T2).	98
<b>Figura 58.</b>	Espectro NIR de la MO en la hacienda San Rafael, suerte 261, tratamiento 2 (T2).	99
<b>Figura 59.</b>	MO y N en la hacienda San Rafael, suerte 261, tratamiento 2 (T2).	99
<b>Figura 60.</b>	Concentración de P en la hacienda San Rafael, suerte 261, tratamiento 2 (T2).	100
<b>Figura 61.</b>	CIC y concentración de bases intercambiables en la hacienda San Rafael, suerte 261, tratamiento 2 (T2).	101
<b>Figura 62.</b>	Concentración de elementos menores en la hacienda San Rafael, suerte 261, tratamiento 2 (T2).	102

<b>Figura 63.</b>	Importancia de la época de fertilización nitrogenada.	104
<b>Figura 64.</b>	Esquema del ciclo global del fósforo en el sistema suelo-planta	105
<b>Figura 65.</b>	Esquema de las reacciones que puede tener la materia orgánica con los micronutrientes en el suelo.	107
<b>Figura 66.</b>	Coeficientes de variación de cada una de las variables medidas en las tres suertes, en el tratamiento 1 (T1).	108
<b>Figura 67.</b>	Coeficientes de variación de cada una de las variables medidas en las tres suertes, en el tratamiento 2 (T2).	109



## LISTA DE ANEXOS

	<b>Pág.</b>
<b>ANEXO 1.</b> Resultados de las propiedades físicas y químicas evaluadas en cada suerte (lote).	126
<b>ANEXO 2.</b> Parámetros de comparación para niveles de fertilidad en suelos.	138
<b>ANEXO 3.</b> Parámetros estadísticos de las propiedades físicas y químicas evaluadas en cada suerte (lote).	140
<b>ANEXO 4.</b> Tablas de frecuencias para la relación MO/N en las diferentes suertes analizadas.	144

## LISTA DE ACRÓNIMOS

<b>AEPS</b>	Agricultura Específica por Sitio
<b>AP</b>	Agricultura de Precisión
<b>Ar</b>	Arcilloso
<b>Ar-L</b>	Arcillo-limoso
<b>B1</b>	Boro en T1
<b>B2</b>	Boro en T2
<b>C/N</b>	Relación Carbono/Nitrógeno
<b>Ca1</b>	Calcio en T1
<b>Ca2</b>	Calcio en T2
<b>Ca/Mg</b>	Relación Calcio/Magnesio
<b>(Ca+Mg)/K</b>	Relación (Calcio+Magnesio)/Potasio
<b>CIC1</b>	Capacidad de Intercambio Catiónico en T1
<b>CIC2</b>	Capacidad de Intercambio Catiónico en T2
<b>Cu1</b>	Cobre en T1
<b>Cu2</b>	Cobre en T2
<b>Da</b>	Densidad Aparente
<b>DAP</b>	Fosfato diamónico
<b>F-Ar</b>	Franco-arcilloso
<b>F-Ar-L</b>	Franco-arcillo-limoso
<b>Fe1</b>	Hierro en T1
<b>Fe2</b>	Hierro en T2
<b>FIR</b>	Infrarrojo lejano
<b>GPS</b>	Sistemas de Posicionamiento Global
<b>K1</b>	Potasio en T1
<b>K2</b>	Potasio en T2
<b>KCl</b>	Cloruro de Potasio
<b>Kg/ha</b>	Kilogramo/hectárea

<b>meq/100gss</b>	Miliequivalentes/100 gramos de suelo seco
<b>Mg1</b>	Magnesio en T1
<b>Mg2</b>	Magnesio en T2
<b>MIR</b>	Infrarrojo medio
<b>Mn1</b>	Manganeso en T1
<b>Mn2</b>	Manganeso en T2
<b>MO1</b>	Materia Orgánica en T1
<b>MO2</b>	Materia Orgánica en T2
<b>N1</b>	Nitrógeno en T1
<b>N2</b>	Nitrógeno en T2
<b>Na1</b>	Sodio en T1
<b>Na2</b>	Sodio en T2
<b>NIR</b>	Infrarrojo Cercano
<b>NIRS</b>	Espectroscopía de Infrarrojo Cercano
<b>P1</b>	Fósforo en T1
<b>P2</b>	Fósforo en T2
<b>pH1</b>	Potencial de Hidrógeno en T1
<b>pH2</b>	Potencial de Hidrógeno en T2
<b>RDS</b>	Rastrillo de la soca
<b>SIG</b>	Sistemas de Información Geográfica
<b>T1</b>	Tratamiento realizado al inicio del cultivo
<b>T2</b>	Tratamiento realizado después de la (segunda) fertilización
<b>ZA</b>	Zona Agroecológica
<b>Zn1</b>	Cinc en T1
<b>Zn2</b>	Cinc en T2

## RESUMEN

En esta investigación se estudiaron 340 muestras de suelos de tres suertes (lotes) de la región del valle geográfico del río Cauca, pertenecientes a los ingenios Castilla y Riopaila, aplicando la agricultura de precisión (AP), mediante el empleo de herramientas tecnológicas como Sistemas de Información Geográfica (SIG) y Sistemas de Posicionamiento Global (GPS). Estas herramientas facilitan la obtención y análisis de datos georreferenciados. La evaluación consistió en la medición de propiedades físicas y químicas de los suelos, mediante las determinaciones de textura, densidad aparente, pH, materia orgánica (MO), nitrógeno, fósforo, bases intercambiables (calcio, magnesio, sodio, potasio), capacidad de intercambio catiónico (CIC) y elementos menores (hierro, cobre, manganeso cinc y boro), utilizando la metodología debidamente estandarizada en el laboratorio del Centro de Investigación de la Caña de Azúcar (CENICAÑA). Para la medición de la MO y boro, se utilizó la espectroscopía de infrarrojo cercano (NIRS), obteniendo los valores de concentración, mediante interpolación en una curva de calibración, elaborada con patrones de suelo con rangos de MO y de boro comprendidos entre 1.25% a 6.14% y 0.05 a 3.40ppm respectivamente.

Los resultados obtenidos de las propiedades físicas y químicas medidas, fueron integrados en los programas de geoestadística de CENICAÑA para la obtención de los mapas de contorno de cada una de las variables medidas, y así poder visualizar espacialmente, interpretar y correlacionar, con la ayuda de la estadística, dichos resultados. Posteriormente, en conjunto con el Servicio de Análisis Económico y Estadístico de CENICAÑA, se utilizó el paquete estadístico SAS para lograr establecer las diferentes correlaciones entre las variables físicas y químicas analizadas, e identificar las posibles causas de la variabilidad tanto entre suerte (entre lotes) como intrasuerte (dentro de lotes) en las propiedades de los diferentes suelos.

Se encontró que los suelos estudiados en las tres suertes, reflejan, en general, textura franca fina, densidad aparente, pH y nivel de MO adecuados para el cultivo de la caña, altas concentraciones de P, Ca, Mg, Na y Mn; bajo a medio contenido de N, normal a alta CIC, bajos a altos niveles de K, deficiencias fuertes de Fe y B, y niveles variables de Cu y Zn. Dichos resultados evidenciaron variabilidad en las propiedades físicas y químicas tanto intrasuerte (dentro de lotes) como entre suerte (entre lotes), siendo más acentuada en ésta última.

Se demostró que no hay una relación numérica constante entre el porcentaje de MO y el porcentaje de N, como se predice teóricamente ( $\%N = \%MO/20$ ), puesto que los valores hallados son muy dispersos entre sí, mostrando de esta manera, la necesidad de determinar experimentalmente el porcentaje de N. Finalmente, el análisis estadístico permitió concluir que la fertilización realizada a las tres suertes (lotes) estudiadas, ejerce un efecto en las propiedades químicas del suelo, aún cuando los cambios en los valores de pH no sean significativos.

La contribución de esta investigación radicó en la aproximación a una optimización de las suertes (lotes) mediante la agricultura de precisión desde el punto de vista agronómico, económico y medioambiental, intentando aumentar la competitividad y sostenibilidad del sector azucarero mediante una mayor eficiencia en las prácticas agrícolas.

## 1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La agricultura es el principal sector en la economía de la región del Valle del río Cauca destacándose por ser una de las más tecnificadas del país, sin embargo sufre los efectos derivados de la variabilidad climática. El incremento de la temperatura en la tierra es una evidencia del cambio climático global y se refleja en anomalías del clima en el Valle del río Cauca <sup>[1]</sup>. El principal cultivo en esta región es la caña de azúcar, uno de los principales renglones en los cuales basa su economía, su importancia radica en el carácter de ser materia prima de un producto de consumo masivo: el azúcar. De ahí que las recomendaciones técnicas para su cultivo adquieran gran importancia.

La caña de azúcar es una planta altamente extractora de nutrientes del suelo que provoca inclusive su insuficiencia y agotamiento. La cantidad de nutrientes que extrae el cultivo varía de acuerdo con una serie de factores, pero principalmente la variedad, el tipo de suelo, el clima y el manejo del cultivo. Sin embargo, conocer los requerimientos nutricionales de la caña de azúcar, ayudará a determinar si se requiere implementar programas de fertilización <sup>[2]</sup>. Es reconocido que el potencial productivo de los suelos presenta heterogeneidades a diferentes escalas de resolución espacial. Sin embargo, este tipo de información no es comúnmente empleada en el diseño de recomendaciones de manejo, lo cual permite suponer la existencia de ineficiencia productiva derivada de la generalización de las recomendaciones agronómicas a nivel de tablonos y/o fincas <sup>[3]</sup>.

Se hace necesario entonces adoptar un sistema alternativo sostenible utilizado en la producción agropecuaria, mediante el cual se empleen diferentes métodos o herramientas tecnológicas, con el propósito de recopilar información en tiempo real sobre lo que sucede o puede suceder en el suelo y en el cultivo, para proceder a la toma de decisiones que permitan el incremento de los rendimientos, la disminución de los costos de producción y la reducción de los impactos ambientales, enfocando los esfuerzos al desarrollo de tecnologías, metodologías y todos los avances que promuevan la competitividad y sostenibilidad del sector azucarero.

## **2. OBJETIVOS**

### **2.1. OBJETIVO GENERAL**

Caracterizar física y químicamente suelos orientados a la agricultura de precisión en tres zonas cultivadas con caña de azúcar del valle geográfico del río Cauca.

### **2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Muestrear suelos de tres haciendas del Valle geográfico del río Cauca mediante el uso de herramientas tecnológicas disponibles tales como Sistemas de Información Geográfica (SIG) y Sistemas de Posicionamiento Global (GPS).
- Caracterizar edáficamente tres zonas de cultivo de caña de azúcar abarcando condiciones relativamente homogéneas, para evidenciar la variabilidad entre e intrasuerte en dicho cultivo.
- Caracterizar los suelos mediante los respectivos análisis físicos y químicos.
- Aplicar la espectroscopía de infrarrojo cercano (NIRS) para la evaluación de de la materia orgánica y el boro de dichos suelos.

### 3. FUNDAMENTO TEÓRICO Y ESTADO DEL ARTE

Colombia y en especial el Valle geográfico del río Cauca cuenta con una extensión de 406.000 hectáreas de las cuales 216.750 están sembradas con caña de azúcar, de allí que el sector azucarero es de gran impacto en la economía suroccidental de Colombia <sup>[4]</sup>. Las variaciones continuas en el conjunto clima-suelo-cultivo-manejo, ocasionados por cambios en las condiciones agroclimáticas y socioeconómicas inciden sobre la producción de caña en el campo y, por ende, en el manejo del sector azucarero. Cada combinación de los factores que afectan la producción requiere un manejo distinto para optimizar el uso de los recursos <sup>[5]</sup>.

Dentro de las estrategias planteadas para cumplir con el objetivo del sector se encuentra el sistema Agricultura Específica por Sitio (AEPS). Este tiene como uno de sus componentes principales la zonificación agroecológica, la cual se ha basado en la caracterización agroclimática y edáfica en el área de cultivo. Las zonas agroecológicas integran elementos del suelo como también del clima y abarcan condiciones relativamente homogéneas que inciden en el manejo agronómico del cultivo y la producción <sup>[6]</sup>.

#### 3.1. CULTIVO DE LA CAÑA DE AZÚCAR (*Saccharum officinarum*)

La caña de azúcar se adapta a un amplio rango de condiciones climáticas pero se desarrolla mejor en regiones tropicales cálidas con amplia radiación solar. La temperatura óptima para el desarrollo de la caña de azúcar oscila entre 25 y 28 °C. Las altas temperaturas, conjuntamente con altas humedades en el suelo y en el aire, favorecen el desarrollo vegetativo, mientras que el ambiente seco y caliente promueve la maduración de la planta. Crece satisfactoriamente en diferentes tipos de suelos, pero prefiere los francos o franco-arcillosos, bien drenados, profundos, ricos en materia orgánica, topografía plana y con pH entre 5.5 y 7.5 <sup>[7]</sup>.

El valle geográfico del río Cauca es una región que posee las condiciones idóneas para el crecimiento de la caña de azúcar: brillo solar permanente e intenso a lo largo del año, caída adecuada de temperatura entre el día y la noche, disponibilidad de agua, lluvias adecuadas y fertilidad en los suelos. El cultivo de la caña de azúcar se hace en forma continua durante todo el año y no en forma estacional como lo es en el resto del mundo. Lo anterior hace del valle del río Cauca una región especial que la sitúa dentro de las mejores regiones cañeras del mundo.



Este tipo de cultivo está influenciado no solamente por los factores nutricionales, sino también por factores como la estructura del suelo, enfermedades, plagas, malezas, residuos orgánicos, herbicidas, manejo, clima y por supuesto, la cantidad de agua disponible en el perfil del suelo <sup>[2]</sup>.

Debido a su elevada capacidad de producción de biomasa (tallos, follaje, cepa y raíces), la caña de azúcar posee altos requerimientos nutricionales <sup>[8]</sup>. La variedad Cenicaña Colombia (CC) 85-92 es la más común en todo el valle geográfico del río Cauca y se encuentra distribuida en 82500 hectáreas, equivalentes al 40% del área total sembrada en la zona azucarera. En cuanto a la extracción de nutrimentos, la variedad CC 85-92 al igual que el cultivo de caña en general, extraen del suelo grandes cantidades de potasio y de nitrógeno (tabla 1), siendo la cantidad extraída del primer nutrimento aproximadamente el doble de la del segundo <sup>[9]</sup>.

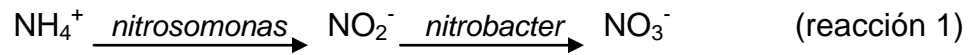
**Tabla 1.** Extracción de nutrimentos por cada 100 toneladas de tallos de caña y de la variedad CC 85-92 cosechadas. Valle del río Cauca, Colombia <sup>[9, 10]</sup>.

Variables	Extracción Total (Kg)	
	Caña en general	CC 85-92
Nitrógeno	105	111
Fósforo	26	24
Potasio	208	199
Calcio	69	60
Magnesio	52	52
Hierro	9,37	7.43
Manganeso	1,99	2.16
Cinc	0.49	0.12
Cobre	0.15	0.51

El N es asimilado por la planta en forma de  $\text{NH}_4^+$  y/o de  $\text{NO}_3^-$ , la incorporación de inhibidores de la nitrificación a las prácticas de fertilización de los cultivos provoca que el N en el suelo permanezca en forma de  $\text{NH}_4^+$  durante un mayor período de tiempo, el que debido a su carga, queda fijado en el complejo arcillo-húmico del suelo, evitándose así las pérdidas de N como  $\text{NO}_3^-$ , que es altamente soluble en el suelo y susceptible a ser lixiviado en profundidad, contaminando las aguas subterráneas.

Los inhibidores de la nitrificación son compuestos que, por un cierto período de tiempo, retrasan el primer paso de la nitrificación en el suelo, esto es la oxidación

bacteriana del ión amonio ( $\text{NH}_4^+$ ) a nitrito ( $\text{NO}_2^-$ ), mediante la inhibición de las bacterias *Nitrosomonas*. Normalmente los inhibidores de la nitrificación no tienen efecto sobre el segundo paso de la nitrificación, esto es, la transformación del nitrito a nitrato ( $\text{NO}_3^-$ ), mediada por bacterias del género *Nitrobacter*. La reacción 1 muestra el proceso de nitrificación del nitrógeno en el suelo.



Son muchos los compuestos conocidos por su capacidad de inhibir la nitrificación del suelo, sin embargo por razones de baja efectividad, alto costo, problemas fitotóxicos o razones medio ambientales, existen tres compuestos que han llegado al mercado de fertilizantes: la diaciandiamida (DCD), la nitrapirina (NI) y el más reciente y eficaz inhibidor de la nitrificación, el DMPP, que es efectivo a bajas dosis (0.5-1.0 Kg/ha), posee bajo riesgo de lixiviación en comparación a otros inhibidores y, a pesar de ser aplicado en bajas dosis, es más efectivo como inhibidor de la nitrificación que el DCD. Además, este inhibidor es absolutamente inocuo para el hombre, para el medio ambiente y para el resto de microorganismos presentes en el suelo.

Además de los beneficios ecológicos que implica el uso de inhibidores de nitrificación, diversos estudios han demostrado que el uso de fertilizantes con inhibidores de la nitrificación, reduce significativamente las pérdidas de nitrógeno en forma de  $\text{NO}_3^-$  en comparación a los fertilizantes convencionales, aumentando así la eficiencia en la utilización del nitrógeno por parte de las plantas, lo que se traduce directamente en un mayor rendimiento y mejor calidad de la producción agrícola. Esto se explica porque la utilización de inhibidores de la nitrificación provoca un incremento apreciable de los contenidos de  $\text{NH}_4^+$  en el suelo disponibles para ser absorbidos por los cultivos junto con los  $\text{NO}_3^-$  derivados de la nitrificación. El suministro combinado de ambas formas de N, ( $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{NO}_3^-$ ), promueve el aumento en los rendimientos de los cultivos, ya que la absorción de amonio requiere menos energía de la planta que la absorción de nitrato, hay un ahorro energético dentro de la planta al no ser necesario reducir el nitrato, el amonio estimula la síntesis de fitohormonas y poliaminas, y la absorción de amonio reduce el pH de la zona radicular, facilitando la absorción de otros nutrientes <sup>[11]</sup>.

### 3.2. AGRICULTURA DE PRECISIÓN (AP)

La AP se define como el conjunto de técnicas orientadas a optimizar el uso de los insumos agrícolas, cuantificando la variabilidad espacial y temporal de la producción agrícola. Estas técnicas proponen atender en forma diferenciada los factores de producción de acuerdo a las características específicas de cada sitio, con el fin de maximizar la eficiencia en el uso de los recursos, y minimizar los efectos de contaminación, usando como unidad de manejo, el área más pequeña para la cual se cuenta con información de respaldo <sup>[12]</sup>.

La AP es un concepto agronómico, basado en la existencia de variabilidad en campo. Metodológicamente implica la incorporación de las herramientas tecnológicas disponibles en la actualidad, especialmente aquellas que contemplan la referenciación geográfica de sitios vía satélite, unidos a bases de datos de información de sitios concretos, como sustento sobre la cual se apoyan las decisiones para el manejo. Requiere el uso de las tecnologías de Sistemas de Posicionamiento Global (GPS), satélites e imágenes aéreas junto con Sistemas de Información Geográfica (SIG) para recopilar datos en tiempo real sobre lo que sucede o sucedió en un cultivo y así poder estimar, evaluar y entender las posibles variaciones del mismo. La información recolectada puede ser usada para evaluar con mayor precisión la densidad óptima de siembra, estimar fertilizantes y otras entradas necesarias, y predecir con más exactitud la producción de los cultivos <sup>[13]</sup>.

La puesta en marcha de la AP comenzó en la década de los noventa, con la emergencia de nuevas tecnologías (GPS, SIG, sensores que estiman ciertas variables en tiempo real, imaginería satelital muy detallada, etc.) y herramientas matemáticas (como la geoestadística). Se puede señalar que tal aproximación ha sido más ampliamente aceptada en países como los EE.UU. y Australia, en donde ya existen algunos institutos de investigación en esta materia. La AP es una vía cada vez más explorada, porque permite optimizar los rendimientos, administrar mejor los costos de producción y limitar el impacto de ciertas poluciones. Sin embargo, la utilización de estas técnicas presenta algunos problemas tales como: acceso a la información limitada (equipo informático, conexión a Internet en las zonas rurales), oferta reducida en torno a las nuevas tecnologías (captadores de rendimiento, GPS), falta de compatibilidad entre los materiales existentes (necesidades de normas comunes para el intercambio de datos), necesidad de tiempo para la puesta en evidencia de las variaciones (varios años) y coste de puesta en marcha de las modulaciones <sup>[14]</sup>.

En el país son muy pocos los sectores agrícolas que están haciendo uso de levantamiento detallado de suelos, sistemas de programación de riegos y

caracterización meteorológica y climatológica, con fines de integrarlo dentro de un sistema de AEPS, con el objetivo de tener en el mediano plazo un medio ambiente sano y de mejorar la rentabilidad <sup>[6]</sup>. Recientemente en países como Colombia y Brasil, se comienza a valorar la importancia de la aplicación de las tecnologías de la agricultura de precisión para la producción cañera <sup>[15]</sup>. CENICAÑA ha realizado aproximaciones sucesivas de la zonificación agroecológica para el cultivo de la caña de azúcar en el valle del río Cauca y ha desarrollado una serie de herramientas que facilitan tanto la caracterización de condiciones específicas como la obtención de recomendaciones de manejo e información acerca del comportamiento productivo del cultivo en cada sitio y momento <sup>[16]</sup>.

Como se ha demostrado con anterioridad, las tecnologías de la AP tienen grandes oportunidades en el cultivo de la caña de azúcar. Resulta un reto muy importante poder mantener estas soluciones lo más simple posibles y con una interfaz adecuada para los productores.

### **3.3. ZONIFICACIÓN AGROECOLÓGICA**

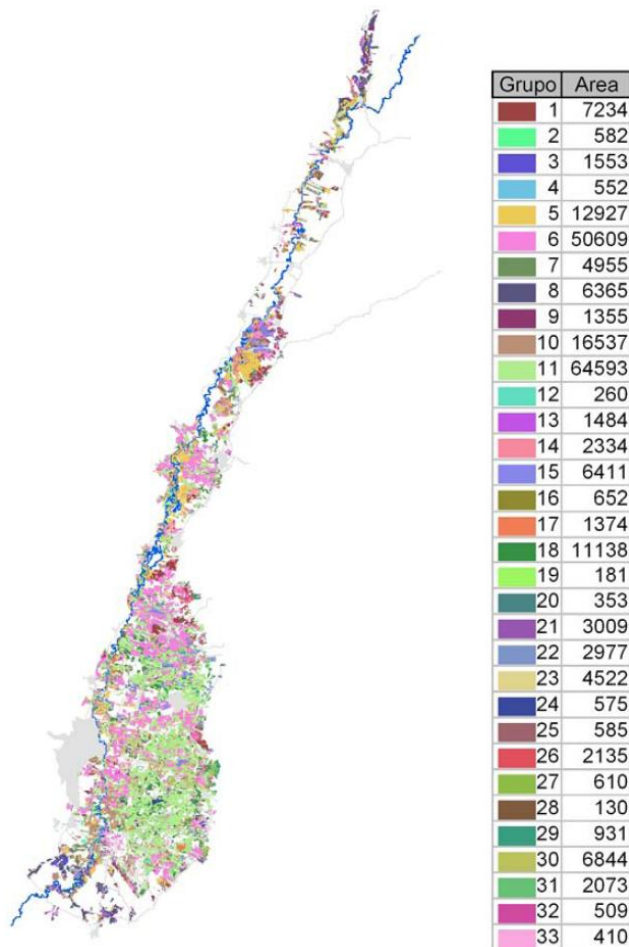
El área cultivada con caña de azúcar en el valle del río Cauca es heterogénea respecto a sus condiciones de suelo y clima. Además la productividad de caña y azúcar difiere de acuerdo con el ambiente, lo cual indica que es necesario caracterizar los ambientes o zonas agroecológicas apropiadas para cada sistema de producción.

CENICAÑA define una zona agroecológica (ZA) para el cultivo de la caña de azúcar como una zona relativamente homogénea en relación con la respuesta del cultivo en producción, caracterizada por factores biofísicos de largo plazo generalmente estables. Con el objetivo de determinar la heterogeneidad de las condiciones productivas y de esta forma orientar la investigación y el desarrollo tecnológico hacia una agricultura específica y sostenible por sitio, CENICAÑA ha realizado aproximaciones progresivas de la zonificación agroecológica para el cultivo de la caña en el valle del río Cauca. Los factores utilizados en la zonificación se basaron en el conocimiento detallado de los suelos, ordenados en 33 grupos homogéneos de suelos, y en las condiciones de humedad de éstos, ordenadas en seis grupos de humedad. La zonificación agroecológica permite cuantificar la extensión de áreas con determinadas cualidades, evaluar su aptitud para el cultivo de la caña, estimar el potencial de productividad según niveles de insumos, identificar las prácticas de cultivo que contribuyen al incremento del rendimiento y analizar el comportamiento de variedades en diferentes condiciones de suelo y clima <sup>[17]</sup>.

### 3.3.1. Grupos homogéneos de suelos

En los estudios detallados de suelos en 216765 hectáreas de la parte plana del valle del río Cauca se identificaron 238 consociaciones o suelos correspondientes a siete órdenes taxonómicos que indican la variabilidad edáfica de la región. Los suelos identificados en el valle del río Cauca cultivados con caña de azúcar correspondieron a 35 familias texturales con las que se conformaron 12 grupos texturales. Los grupos texturales junto con los regímenes de humedad ústico (seco), ústico (húmedo) y ácuico (encharcado periódicamente) y la profundidad del suelo generaron 33 grupos homogéneos de suelos <sup>[18]</sup>. La figura 1 muestra los grupos homogéneos de suelos en el valle geográfico del río Cauca y la tabla 2, describe las principales características de los grupos homogéneos de suelos correspondientes a las zonas agroecológicas de las suertes (lotes) en estudio.

**Figura 1.** Grupos homogéneos de suelos en el valle geográfico del río Cauca. Área dada en hectáreas <sup>[19]</sup>.



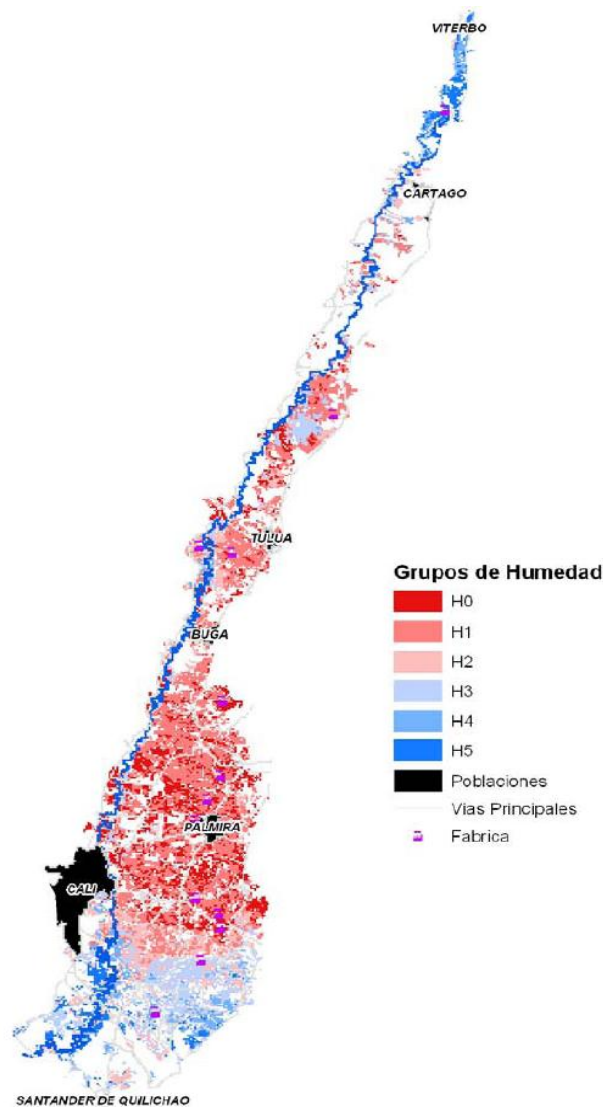
**Tabla 2.** Características principales de los grupos homogéneos de suelos correspondientes a las zonas agroecológicas de las suertes (lotes) en estudio (Denominación CENICAÑA) <sup>[17]</sup>.

<b>Grupos Homogéneos de Suelos</b>	<b>Órdenes</b>	<b>Características</b>
6	Mollisols Inceptisols Vertisols	Suelos de textura fina, secos, profundos y moderadamente profundos que se agrietan al secarse, ubicados en el cuerpo y pie de abanicos, planos de terraza y llanuras de desborde. Limitados por escasez de macroporos y permeabilidad lenta.
10	Inceptisols Vertisols Mollisols Alfisols	Suelos de textura fina, ácuicos, superficiales, muy pobremente drenados y ubicados en cuerpo y pie de abanicos y en cubetas de desborde. Limitados por escasa profundidad y encharcamientos periódicos.
11	Mollisols Inceptisols Vertisols Entisols Alfisols	Suelos de texturas franca fina y franca fina sobre arcillosas, secos, profundos o moderadamente profundos, bien drenados o moderadamente drenados y ubicados en el cuerpo y ápice de abanicos y en napas de desborde de la llanura aluvial.
14	Inceptisols Mollisols Vertisols	Suelos de texturas franca fina, ácuicos, superficiales, ubicados en cuerpo y pie de abanicos, cubetas de desborde y terrazas. Limitados por drenaje interno pobre, nivel freático superficial y encharcamiento periódicos.
15	Inceptisols Mollisols Vertisols	Suelos de textura limosa fina principalmente, secos, profundos o moderadamente profundos, bien drenados y ubicados en cuerpo de abanicos y en napas de explayamiento y de desborde. Limitados por permeabilidad mediana a lenta.
18	Inceptisols Mollisols Entisols	Suelos de textura franca gruesa, secos, profundos o moderadamente profundos, bien drenados y ubicados en albardones, explayamientos de desborde y cuerpo y pie de abanicos. Limitados por permeabilidad muy rápida.

### 3.3.2. Grupos de humedad

Son grupos conformados por los niveles de déficit o exceso de agua en el suelo, medidos en mm/año y la permeabilidad del suelo. Los niveles van desde el déficit de agua hasta más de 600 mm de exceso por año. La permeabilidad se califica en baja, media y alta <sup>[17]</sup>. Los grupos de humedad corresponden a seis condiciones que caracterizan zonas con déficit, humedad normal, baja, media, alta y muy alta. La figura 2 muestra los grupos de humedad del valle geográfico del río Cauca y la tabla 3, describe las principales características de los grupos de humedad correspondientes a las zonas agroecológicas de las suertes (lotes) en estudio.

**Figura 2.** Grupos de humedad del valle geográfico del río Cauca <sup>[19]</sup>.



**Tabla 3.** Características principales de los grupos de humedad correspondientes a las zonas agroecológicas de las suertes en estudio (Denominación CENICAÑA) [20]

Grupos de Humedad	Características
H1	(Humedad normal). En este grupo se incluyen las áreas con exceso de humedad inferior a 200mm/año y permeabilidad del suelo media a alta, así como aquellas áreas en donde, a pesar de presentar déficit de humedad, pueden ocurrir encharcamientos debido a la poca pendiente del terreno o por tener suelos de permeabilidad baja.
H2	(Humedad baja). Áreas con exceso de humedad entre 200mm/año y 400mm/año y suelos con permeabilidad media a alta; así mismo, incluye áreas con nivel bajo de excesos (menor de 200mm/año) y suelos de permeabilidad baja.
H3	(Humedad media). Este grupo incluye áreas con exceso de humedad entre 400mm/año y 600mm/año y suelos de permeabilidad media a alta y áreas con un exceso entre 200mm/año y 400mm/año con suelos de permeabilidad baja.

### 3.4. VARIABILIDAD DE LAS PROPIEDADES DEL SUELO

Una característica dominante de los suelos es su heterogeneidad, aún en pequeñas áreas que podrían considerarse como homogéneas. Esta heterogeneidad induce una variabilidad en las propiedades del suelo que puede llegar a ser de considerable magnitud, la cual puede afectar grandemente las generalizaciones y predicciones que se hagan con ellas.

La variabilidad de las propiedades del suelo es una condición inherente al mismo debido a que en su formación intervienen varios procesos diferentes, controlados a su vez, por los factores de formación; estas interacciones pueden ser muy variadas dando como consecuencia una alta cantidad de suelos posibles. La variabilidad depende de la propiedad que se analice, siendo más variables las propiedades químicas que las físicas. Además, hay menor variabilidad en las propiedades del suelo, en su condición natural, que cuando es sometido a uso y



por tanto, aquellas propiedades que más se afectan por el manejo del suelo serán las que presenten la mayor variabilidad <sup>[21]</sup>.

Dado que la AP se basa en el manejo de la variabilidad del agroecosistema, es necesario conocer los distintos tipos de variabilidad y su posible grado de control en la agricultura. La tabla 4 describe los diferentes tipos de variabilidad en los sistemas agrícolas. Cada tipo de variabilidad se puede medir, evaluar y posiblemente influenciar de acuerdo con su importancia. Dicha diferenciación es importante para lograr establecer las causas de la variabilidad y definir sistemas de manejo <sup>[22]</sup>.

**Tabla 4.** Diferentes tipos de variabilidad en sistemas agrícolas <sup>[22]</sup>.

Tipo de variabilidad	Característica	Ejemplos
Natural	Debida a procesos naturales	Origen del suelo, clima, topografía, especies animales y vegetales.
Inducida	Debida a las prácticas de manejo del suelo	Compactación del suelo por uso de maquinaria, uso indebido de agroquímicos.
Espacial	Variaciones que ocurren dentro de un mismo lote	Contenidos de un nutriente en el suelo o diferencias en el rendimiento de un cultivo.
Temporal	Variaciones que ocurren a través del tiempo	Cambios en el clima, en la humedad del suelo o en el contenido de un nutriente durante el ciclo del cultivo.

### 3.4.1. Componentes de la Variabilidad

La variabilidad presenta dos componentes fundamentales: uno **aleatorio** y otro **sistemático**, teniendo en cuenta la fuente de error que produce la variación.

La variabilidad sistemática es aquella que puede ser atribuida a causas conocidas, entendibles y predecibles. Esta variabilidad está representada por los cambios que presentan las propiedades del suelo que pueden ser entendidos y explicados en términos de sus factores y procesos de formación.

Cuando la variabilidad no puede relacionarse con causas conocidas, se definen como **variabilidad aleatoria** o debida al **azar** y se estima que en los suelos, en general, la variabilidad sistemática es mayor que la variabilidad aleatoria.

Cuando la acción de un factor de formación domina el desarrollo del suelo por largos periodos de tiempo, se puede llegar a reducir la variabilidad en él; con esta anotación puede concluirse que los suelos más evolucionados presentan menor variabilidad que aquellos que lo son menos <sup>[21]</sup>.

### **3.4.2. Medición de la Variabilidad**

La primera etapa de este proceso es la medición de los factores importantes que indican o afectan la eficiencia en el crecimiento del cultivo. El enfoque principal se basa en la creación de mapas de rendimiento a través de la instrumentación y adecuación de los sistemas de cosecha o evaluando los parámetros del suelo a través de muestreos. Ambas técnicas dan información sobre diferentes partes del sistema de cultivo <sup>[23]</sup>.

### **3.4.3. Evaluación de la Variabilidad y su Importancia**

Una vez la variabilidad ha sido medida, debe ser evaluada para ver qué tan significativa es para el cultivo y su manejo. Normalmente esto se hace revisando la dispersión de un histograma que se construye con una determinada variable u observando si los valores extremos permanecen fuera de los umbrales aceptables, como por ejemplo, los índices de nutrientes del suelo <sup>[23]</sup>.

## **3.5. ESPECTROSCOPIA DE INFRARROJO CERCANO (NIRS)**

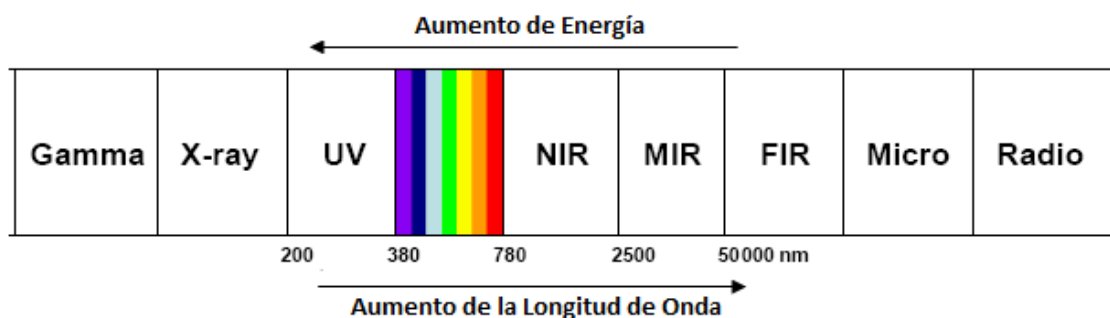
La evaluación convencional de la capacidad del suelo para la producción agrícola requiere medir las propiedades físicas y químicas del suelo mediante técnicas de análisis que son complejas, costosas y lentas. Además, es necesaria una alta densidad de muestreo para minimizar la variabilidad espacial del suelo. En la actualidad se requiere una técnica de análisis de suelo rápida y económica para que agricultores e investigadores, puedan utilizarla exitosamente en el monitoreo del suelo como una herramienta de apoyo para la agricultura de precisión, evaluación y manejo de la calidad del suelo <sup>[24]</sup>. La espectroscopia NIR ha sido adoptada como un método secundario para dichos análisis, por lo cual sus

resultados analíticos se basan en calibraciones y validaciones establecidas a partir de un método de referencia confiable (método primario).

### 3.5.1. Fundamento Físicoquímico

Tanto por razones instrumentales como por las características de la interacción de la radiación con la materia, comúnmente la región infrarroja del espectro se divide en tres zonas: infrarrojo cercano (NIR), infrarrojo medio (MIR) e infrarrojo lejano (FIR), tal como se muestra en la figura 3.

**Figura 3.** Espectro electromagnético.



La espectroscopía de infrarrojo cercano es una técnica que hace parte del campo de estudio de la espectroscopia molecular, la cual estudia la interacción de la radiación electromagnética con la materia <sup>[25]</sup>. La región espectral del infrarrojo cercano (NIR) se extiende desde el extremo superior de longitudes de onda del visible, a alrededor de 780 nm hasta 2500 nm.

La técnica NIRS obedece a la ley de Lambert-Beer, la cual establece que la absorbancia a cualquier longitud de onda es proporcional al número de moléculas absorbentes presentes en el camino recorrido por la radiación. Las uniones específicas entre átomos vibran a una cierta frecuencia y cada tipo de estas uniones absorben radiación de longitud de onda específica, las otras longitudes de onda no absorbidas serán reflejadas <sup>[26]</sup>. En la región NIR, la radiación es absorbida por diferentes uniones químicas, principalmente C-H, O-H, N-H, S-H y C-O entre otros, del compuesto presente en la muestra <sup>[24]</sup>.

### 3.5.1.1. Origen de la Absorción en el Infrarrojo Cercano (NIR)

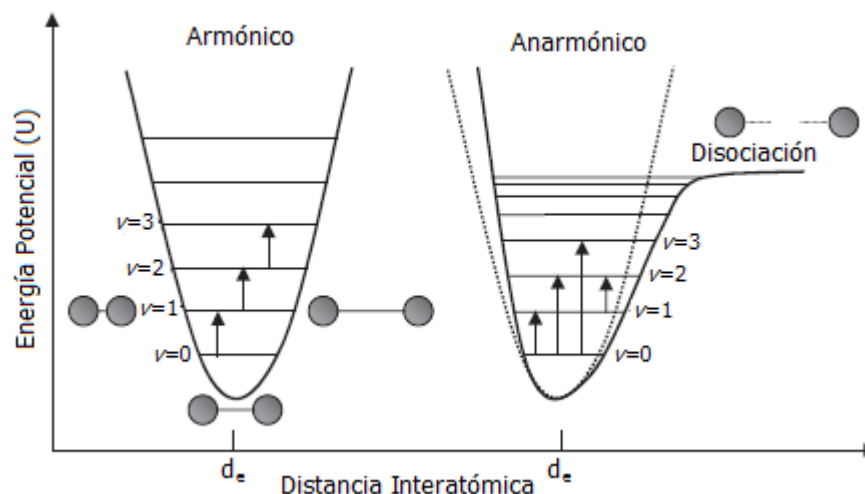
Para absorber radiación en el infrarrojo, una molécula debe sufrir un cambio neto en el momento dipolar como consecuencia de su movimiento de vibración o de rotación. Si esto ocurre, el campo eléctrico de la radiación puede interactuar con la molécula y provocar cambios en la amplitud de algunos de sus movimientos. Si la frecuencia de la radiación coincide exactamente con la frecuencia de vibración natural de la molécula, tiene lugar una transferencia neta de energía que origina un cambio en la amplitud de la vibración molecular; la consecuencia es la absorción de radiación.

Cuando se trata de especies homonucleares como el O<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>, H<sub>2</sub> o Cl<sub>2</sub>, el momento dipolar no se altera durante la vibración o rotación y, como consecuencia, este tipo de compuestos no absorben en el infrarrojo <sup>[27]</sup>.

Para una molécula diatómica, la frecuencia de vibración puede conocerse, aproximadamente, suponiendo el modelo del oscilador armónico (figura 4), en el que un átomo se desplaza de su posición de equilibrio con una fuerza proporcional al desplazamiento (ley de Hooke) <sup>[28]</sup>. La teoría cuántica demuestra que las únicas transiciones que pueden tener lugar son aquellas en las que el número cuántico vibracional cambia en una unidad; es decir, la denominada *regla de selección* establece que  $\Delta v = \pm 1$ . En este caso, la función de energía potencial será una parábola, centrada en la distancia de equilibrio. Dado que los niveles están igualmente espaciados, para una vibración molecular determinada solo tendría que observarse un pico de absorción <sup>[27]</sup>.

Este modelo del oscilador armónico resulta incompleto para describir moléculas reales, ya que cuando dos átomos se acercan, existe una repulsión coulombica entre sus núcleos, lo que implica un aumento más rápido de la energía potencial. Por otra parte, cuando los átomos se alejan, se produce una disminución de la energía potencial, originándose la disociación del enlace. Por tanto, las moléculas reales se acercan más al comportamiento de un oscilador anarmónico (figura 4). Las curvas energéticas de los osciladores armónico y no armónico son muy similares a niveles bajos, por lo que las moléculas sólo tienen un comportamiento armónico en torno a la posición de equilibrio <sup>[29]</sup>.

**Figura 4.** Representación esquemática de los modelos armónico y anarmónico para la energía potencial de una molécula diatómica.  $d_e$ =distancia interatómica <sup>[30]</sup>.



Una consecuencia que se deduce del modelo del oscilador anarmónico es que la regla de selección cambia; no sólo es posible observar la banda fundamental ( $\Delta v = \pm 1$ ) sino que también pueden ser observadas bandas correspondientes a transiciones  $\Delta v = \pm 2, \pm 3, \dots$ , las cuales contribuyen a los denominados sobretonos, que corresponden a parte de las bandas observadas a mayores longitudes de onda en la región NIR. Otra consecuencia de la anarmonicidad es que los niveles energéticos no están igualmente espaciados, es decir, a niveles de energía más altos el incremento de energía entre niveles consecutivos es menor, por lo que los sobretonos aparecen a frecuencias ligeramente menores que las correspondientes a múltiplos de las frecuencias fundamentales <sup>[28]</sup>.

El origen de la absorción de las bandas en el infrarrojo cercano es el mismo que para las bandas en el infrarrojo medio. La absorción NIR se da si la energía de la radiación corresponde a la diferencia energética entre dos niveles vibracionales y se da un cambio en su momento dipolar. Sin embargo, en la zona NIR no aparecen bandas correspondientes a vibraciones fundamentales  $\Delta v = \pm 1$  (MIR), sino que en esta zona aparecen las bandas denominadas sobretonos, correspondientes a transiciones energéticas en las que  $\Delta v > \pm 1$ . Estos sobretonos aparecen a frecuencias ligeramente menores que las predichas como múltiplos de las frecuencias fundamentales, debido al diferente espaciado entre los niveles energéticos en el modelo anarmónico. El primer sobretono ( $\Delta n = 2$ ) es de intensidad mayor que los siguientes. Además de estos sobretonos, en la región NIR también pueden observarse otro tipo de bandas de absorción, llamadas bandas de combinación, debidas a la interacción entre las diferentes frecuencias

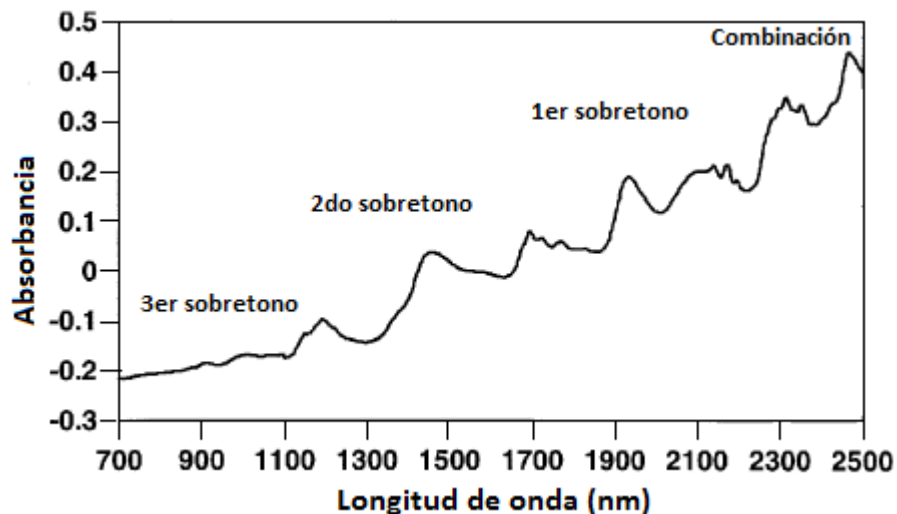
fundamentales de vibración de moléculas poliatómicas, que son sumas o restas de múltiplos de las frecuencias fundamentales:

$$V_{\text{comb}} = m_1V_1 + m_2V_2 + m_3V_3 + \dots + m_iV_i$$

donde  $m_i$  son números enteros y  $v_i$  las frecuencias de las transiciones que contribuyen a la banda de combinación. Las bandas de combinación más frecuentes son aquellas en que  $m_1 = m_2 = 1$ . Valores positivos de  $m_i$  corresponden a suma de tonos que originan bandas a altas frecuencias denominadas tonos de combinación. Valores negativos de  $m_i$  corresponden a diferencia de tonos que originan bandas llamadas tonos de sustracción. Estos últimos son posibles, pero raramente se observan en el espectro NIR.

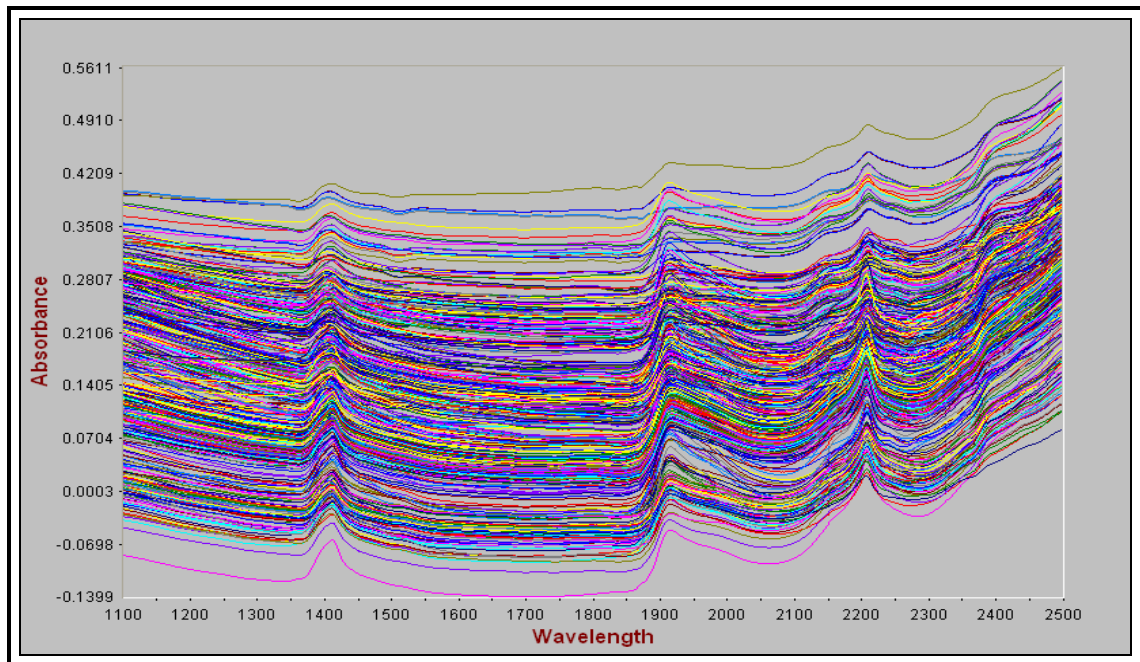
Las transiciones no fundamentales, ( $\Delta v > \pm 1$ ), son mucho menos probables que las correspondientes a transiciones entre niveles consecutivos, por lo que las bandas NIR son de intensidad menor que las que aparecen en la zona MIR, además de ser anchas y no tan bien definidas como resultado del solapamiento de sobretonos y bandas de combinación <sup>[29]</sup>. En la figura 5 se puede apreciar un espectro típico de la región NIR.

**Figura 5.** Espectro típico de la región NIR.



Para una muestra de naturaleza química heterogénea, o con numerosos componentes químicos, como sería un suelo, el espectro obtenido en la región NIR, será una compleja combinación de bandas o picos de absorción parciales sobrepuestos o muy cercanos, que suelen confundirse en una línea suavizada en que se encuentran picos, valles y curvaturas en forma de hombros y que sólo cobran sentido cuando dicha información se puede interpretar con la ayuda de un computador y programas matemáticos y estadísticos apropiados tales como primera y segunda derivada, MLR (regresión lineal múltiple) y PLSR (regresión parcial por mínimos cuadrados) <sup>[31]</sup>. La figura 6 muestra un espectro NIR de varias muestras de suelo tomado en el equipo de espectroscopia de infrarrojo cercano de CENICAÑA.

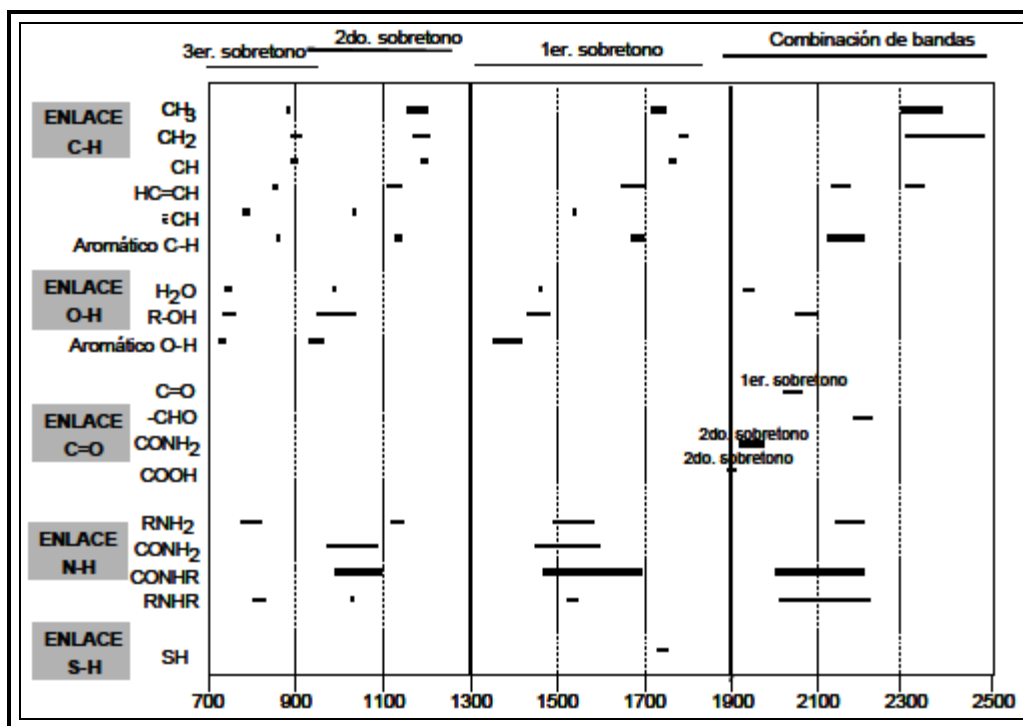
**Figura 6.** Espectro de varias muestras de suelo tomado en el espectrofotómetro de infrarrojo cercano de CENICAÑA, mediante el programa VISION<sup>®</sup> versión 2.5.



La información contenida en un espectro NIR difiere de un espectro MIR, en que las bandas de absorción en NIR normalmente están muy solapadas y son de baja intensidad, menor cuanto mayor es el orden del sobretono <sup>[28]</sup>. La intensidad de las bandas de combinación y los sobretonos dependen del grado de anarmonicidad del enlace. Los enlaces en los que están implicados los átomos de hidrógeno, vibran con una gran amplitud cuando sufren tensión y por lo tanto, se genera una desviación apreciable del modelo del oscilador armónico. Como consecuencia, casi todas las bandas de absorción observadas en el NIR proceden de sobretonos y bandas de combinación de vibraciones fundamentales que se producen en el

MIR, donde están implicados grupos H-átomo, o combinaciones de vibraciones de tensión o flexión de tales grupos. Las bandas más frecuentes en NIR son debidas a enlaces que contienen átomos ligeros como C-H, N-H, O-H, S-H, debido a su mayor anarmonicidad. En la figura 7 se representan las regiones del infrarrojo cercano donde absorben los diferentes enlaces, indicando si la banda de absorción corresponde al primer, segundo o tercer sobretono, o a combinaciones de frecuencias de vibración de diferentes enlaces. Las bandas de los grupos C=O, C-C, C-F o C-Cl, en general son muy débiles o no aparecen en la región NIR. Las vibraciones fundamentales de estos grupos tienen bajas frecuencias en la región IR y por tanto, los primeros sobretonos también aparecen en esa región <sup>[32]</sup>.

**Figura 7.** Tabla de asignación de bandas en la región NIR <sup>[28]</sup>.



Las intensidades de los sobretonos y de las bandas de combinación en el NIR, crecen con la magnitud del cambio de momento dipolar y con el grado de anarmonicidad en el enlace; así, las vibraciones que implican átomos de hidrógeno son más intensas que las de otros átomos; la baja masa y las elevadas constantes de fuerza para enlaces en los que está implicado el hidrógeno, son las responsables de que las vibraciones fundamentales de hidrógeno aparezcan a altas frecuencias y en consecuencia los primeros sobretonos aparezcan en la región NIR <sup>[32]</sup>. El origen de la absorción en las diferentes regiones del IR se muestra en la tabla 5.



**Tabla 5.** División de la región infrarroja del espectro y el origen de la absorción <sup>[28]</sup>.

Región	Longitud de onda (nm)	Origen de la absorción
NIR	780-2500	Sobretonos y bandas de combinación de vibraciones moleculares fundamentales
MIR	2500-50000	Vibraciones moleculares fundamentales
FIR	50000-10 <sup>6</sup>	Rotaciones moleculares

Como se dijo anteriormente, las absorciones espectrales en la región NIR están dominadas por sobretonos y combinación de bandas de absorción. Sin embargo, se pueden observar algunos otros efectos que contribuyen a la complejidad del espectro NIR, tales como acoplamiento o resonancia entre diferentes vibraciones del mismo grupo funcional <sup>[30]</sup>.

### 3.5.2. Espectroscopía de Reflectancia

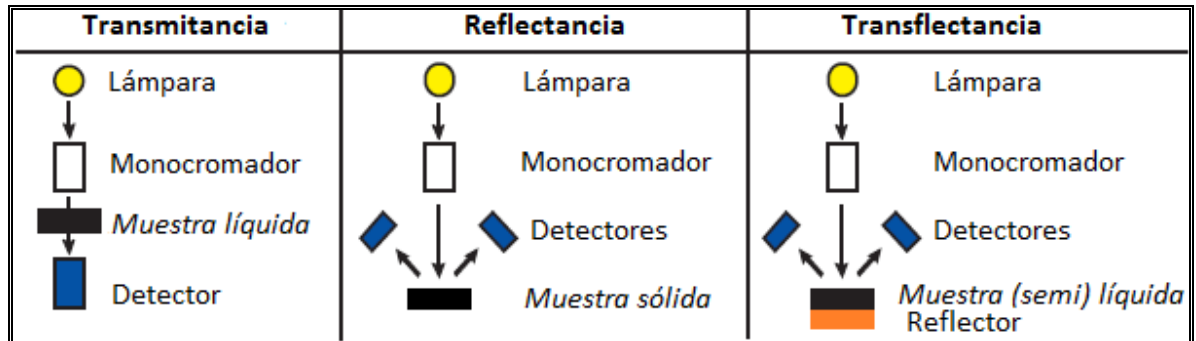
La espectroscopia de reflectancia en el infrarrojo (NIRS), es utilizada como una técnica alternativa a los métodos químicos tradicionales. En los últimos años se han desarrollado numerosas aplicaciones para evaluar composición, monitorear procesamiento y certificar calidad de alimentos, tanto para animales <sup>[33]</sup>, como para la población humana, en el análisis de la calidad de forrajes <sup>[31, 34]</sup>, suelos <sup>[24]</sup>, en la caracterización de pasto de guinea y maíz <sup>[35]</sup>, múltiples aplicaciones en la industria agroalimentaria <sup>[36]</sup>, por nombrar algunos trabajos y todo hace suponer que las aplicaciones aumentarán.

#### 3.5.2.1. Principio del Método

En el intervalo espectral del infrarrojo cercano se realizan medidas de reflectancia, transmitancia o transreflectancia. La diferencia básica entre los tres tipos de medidas es la posición de la muestra en el instrumento, como se muestra en la figura 8.

Dentro de las diferentes modalidades de medida en la espectroscopía NIR, se centrará el interés en la reflectancia, ya que fue la modalidad utilizada durante este estudio.

**Figura 8.** Diferentes modalidades de medida en espectroscopía NIR.



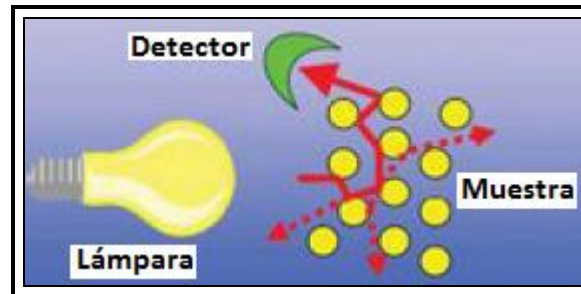
La espectroscopía de reflectancia difusa estudia la luz reflejada por la superficie de la muestra y puede ser de dos tipos: especular y difusa.

- *Reflectancia especular:* no aporta información sobre la composición de la muestra, por lo que solo contribuye al ruido. Predomina cuando el material sobre el que se produce la reflexión tiene altos valores de los coeficientes de absorción a la longitud de onda de la radiación incidente, cuando la penetración es muy pequeña en comparación con la longitud de onda y cuando las dimensiones de la superficie reflectante son mucho mayores que la longitud de onda.
- *Reflectancia difusa:* es la base de las medidas cuantitativas que se llevan a cabo en la espectroscopia NIR y tiene lugar en todas las direcciones de la superficie como consecuencia de los procesos de absorción y dispersión que varían además con la forma, tamaño, grado de compactación, etc. de la muestra. Este tipo de reflectancia predomina cuando los materiales de la superficie reflectante son débilmente absorbentes a la longitud de onda incidente y cuando la penetración de la radiación es grande respecto a la longitud de onda.

La figura 9 representa el efecto de reflectancia difusa. Para este caso, los rayos no son simplemente reflejados de la superficie externa, sino que realmente penetran la muestra. Cada vez que se halla que una unión química no absorbe una particular longitud de onda, los rayos son diseminados y reflejados en todas las direcciones. Estos haces dispersos pueden entonces ser absorbidos o reflejados por otras uniones químicas, hasta que una porción de los rayos eventualmente salga de la muestra en todas las direcciones. La profundidad de penetración del

haz dentro de la muestra no está determinada por la posición del detector, sino más bien por la potencia de la fuente de luz <sup>[32]</sup>.

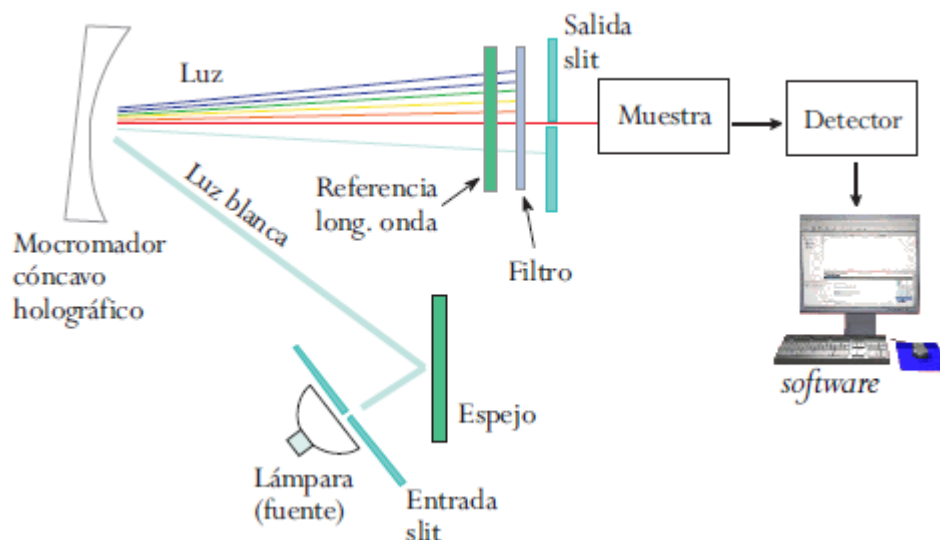
**Figura 9.** Representación del efecto de reflectancia difusa.



### 3.5.3. Instrumentación

De acuerdo a la figura 10, los componentes básicos de un espectrofotómetro NIR son: fuente de radiación, sistema de selección de longitud de onda, compartimiento para la muestra y detector, además del software necesario para el procesamiento de los resultados obtenidos y su posterior tratamiento <sup>[28, 29, 32]</sup>.

**Figura 10.** Esquema óptico de un espectrofotómetro de infrarrojo cercano (NIR).



- *Fuente de radiación:* La fuente de radiación más utilizada es la lámpara halógena de filamento de tungsteno con ventana de cuarzo, que soporta altas temperaturas, capaz de proporcionar un espectro continuo en la región de 320-2500 nm.
- *Sistema de selección de longitud de onda:* el sistema de selección de longitud de onda más utilizado es un monocromador. La radiación generada en la lámpara se dirige mediante un espejo a un monocromador holográfico cóncavo, el cual emite a su vez luz monocromática como función de la longitud de onda. Esta radiación dispersa incide en la muestra, donde interactúa con las moléculas presentes y parte de la energía incidente es absorbida por las sustancias que la constituyen, como se observa en la figura 10. Así, la absorción de luz se estima por diferencia entre la luz incidente y la reflejada o transmitida.
- *Compartimento para la muestra:* una de las principales ventajas que presenta la espectroscopia NIR es que el tratamiento de la muestra a analizar es prácticamente nulo. Para registrar el espectro de una muestra, ésta se coloca entre el sistema de selección de longitud de onda y el detector. Así pues, para el análisis de sólidos por reflectancia, se han desarrollado sondas de fibra óptica, dispositivos de cubeta, dispositivos para el análisis directo de comprimidos y cápsulas, etc.
- *Detector de reflectancia:* recibe la radiación reflejada de la superficie de la muestra. El más utilizado es el de sulfuro de plomo PbS, que presenta una sensibilidad adecuada en la región 1100-2500nm. Un aspecto importante es la disposición de los sistemas detectores; para medidas de reflectancia se acostumbra a trabajar con más de un detector, los cuales se sitúan a 45° de la superficie de la muestra para intentar minimizar la reflectancia especular (figura 8).
- *Software:* corresponde al programa o programas que se utilizan en la adquisición de datos y en el posterior tratamiento de los mismos.

#### **3.5.4. Ventajas e Inconvenientes de la Espectroscopia NIR.**

En la tabla 6 se relacionan las principales ventajas e inconvenientes de la espectroscopia NIR como herramienta de análisis cualitativo y cuantitativo.

**Tabla 6.** Principales ventajas e inconvenientes de la espectroscopía NIR <sup>[26, 30]</sup>.

<b>Ventajas</b>	<b>Inconvenientes</b>
Técnica analítica no destructiva	Costo elevado del equipo NIR
Rapidez de análisis ya que se requiere escasa o nula preparación de muestra	Bandas muy anchas y superpuestas en el espectro NIR
No se generan subproductos y no es necesario utilizar disolventes contaminantes	Señal muy compleja, por lo que las bandas del espectro NIR son de difícil interpretación
La muestra puede estar forma sólida, líquida o pastosa	Laboriosa calibración del equipo
Determinación de varios parámetros simultáneamente (multiparamétrica)	Dificultad en la transferencia de calibraciones entre diferentes equipos
Proporciona información sobre la naturaleza física y química de la muestra	Reducida sensibilidad en el análisis de componentes minoritarios
Exactitud comparable a otras técnicas analíticas y precisión, en muchas ocasiones, mayor que otras técnicas analíticas	Imposible analizar muestras que muestren una variabilidad (física o química) no contemplada en la calibración

### 3.5.5. Estandarización y Calibración del Equipo NIR.

Previamente al registro de las muestras, el equipo NIR debe ser estandarizado. En general, la estandarización consta de las siguientes etapas: respuesta del instrumento (medida de reflectancia, test de lámpara y comprobación de la actuación de los detectores), precisión de la longitud de onda (medida de alineación de la longitud de onda del instrumento) y ruido (medida de la precisión del dato óptico a cada longitud de onda). Una vez pasados los tests se puede comenzar los registros de las diferentes muestras <sup>[32]</sup>. La estandarización del instrumento produce un ajuste matemático, el cual permite que los espectros colectados en el instrumento estandarizado sean similares a los espectros colectados del equipo, con el propósito de reducir la variación instrumental cuando se transfieren espectros y ecuaciones de un instrumento a otro <sup>[24]</sup>.

La calibración del instrumento, es a menudo, la tarea más complicada. En primer lugar se debe disponer de un gran número de muestras a analizar con una concentración de analito semejante a la que se va a encontrar en la muestra verdadera. Se realiza entonces un análisis químico mediante el método primario para la determinación del analito. Para la medida de la reflectancia, las muestras

se pulverizan hasta un tamaño de partícula reproducible y se mide su reflectancia a dos o más longitudes de onda. A partir de este estudio, se desarrollan y comprueban las ecuaciones que relacionan las reflectancias medidas con los valores medidos mediante el método primario. Una vez que se ha calibrado el equipo, puede ser implementado para los análisis de rutina en el laboratorio. Sin embargo, una vez calibrado, se puede realizar el análisis de varias especies en muestras sólidas en pocos minutos y se encuentran, en general, exactitudes y precisiones relativas del 1 al 2% <sup>[27]</sup>.

### **3.5.6. Aplicaciones de la Espectroscopia NIR.**

Durante los últimos años, la espectroscopia NIR asociada con el análisis multivariable, ha ido ganando aceptación en el mundo industrial como técnica de control rutinario debido, en gran parte, a las demandas de aplicaciones analíticas en la industria. El análisis cuantitativo mediante esta técnica constituye quizás la aplicación con mayores aportaciones. Hoy en día, tanto la espectroscopia NIR como la calibración multivariable, aparecen como herramientas destacadas en el control de procesos y sus aplicaciones abarcan campos tan diferenciados como la biotecnología, las ciencias del suelo, mineralogía, monitorización ambiental, industria química y agroalimentaria, la química clínica y médica, la industria petroquímica, la producción farmacéutica, entre otros <sup>[28]</sup>.

A pesar de los avances en la aplicación del NIR en la investigación y en el proceso industrial de cereales, aceites, forrajes y análisis de remolacha azucarera, el avance en la adopción de esta tecnología para trabajos de rutina en la industria de la caña de azúcar en Colombia se ha venido implementando desde hace 10 años. Las principales aplicaciones de la espectroscopia NIR en la agroindustria azucarera se encuentra en los análisis de jugos de caña, mieles, masas, bagazo, caña desfibrada y azúcar <sup>[25]</sup>.

Recientes investigaciones han demostrado las ventajas de la espectroscopia de infrarrojo cercano para predecir en forma rápida y no destructiva las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo. Mientras que el suelo ha sido analizado mediante NIRS por más de cuatro décadas para propiedades tales como la humedad, capacidad de intercambio catiónico, fracciones de tamaño, fracción arcilla, metales pesados, la respiración microbiana y la biomasa microbiana, hay pocos estudios sobre el análisis de estas propiedades en suelos por NIRS.

Aunque este tipo de espectroscopía ha sido utilizada ampliamente en los EE.UU. y Europa para el análisis de suelos, pocos reportes se encuentran en la literatura acerca de la aplicación de esta tecnología en América del Sur para el análisis de rutina. Sin embargo, en el limitado número de estudios, NIRS ha demostrado ser factible para la determinación del grado de humificación y el contenido de humedad en diferentes tipos de muestras entre las que se encuentran los suelos. Recientemente, esta técnica ha sido extendida al análisis de pH, contenido de MO, concentración de cationes (K, Ca, Mg), nitrógeno total, carbono, azufre y fósforo en suelos <sup>[37, 38]</sup>, donde los resultados muestran que la espectroscopia NIR podría ser una buena herramienta para la aplicación de agricultura de precisión.

### **3.6. SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA (SIG)**

Un SIG se define como un conjunto de métodos y herramientas que actúan coordinada y lógicamente para capturar, almacenar, analizar, transformar y presentar toda la información geográfica con sus correspondientes atributos, con el fin de satisfacer múltiples propósitos. Existen otras muchas definiciones de SIG, algunas de ellas acentúan su componente de base de datos, otras sus funcionalidades y otras enfatizan el hecho de ser una herramienta de apoyo en la toma de decisiones, pero todas coinciden en referirse a un SIG como un sistema integrado para trabajar con información espacial y con otro tipo de información para su manipulación y análisis, facilitando la toma de decisiones en diversas áreas <sup>[39]</sup>.

#### **3.6.1. Componentes de un SIG**

En la forma más simple y de acuerdo a la figura 11, los componentes de un SIG son: el usuario o recurso humano, los programas para el SIG (software), el equipo electrónico (hardware), los datos o información y los procedimientos.

- *Usuario o recurso humano:* es la parte más importante del sistema porque es él quien realiza complicados análisis y modelamientos con el fin de encontrar un resultado esperado. Generalmente se requiere de gran habilidad para escoger las herramientas de software más adecuadas, buen conocimiento del equipo, de los datos que se van a usar y del problema por resolver.

**Figura 11.** Componentes básicos de un SIG.



- *Software:* es la herramienta necesaria para almacenar, analizar y mostrar información geográfica. Consta de sistemas de entrada, almacenamiento, manejo, análisis, modelamiento, salida y presentación de datos.
- *Hardware:* en general, el equipo electrónico o hardware se compone de un computador (con buena capacidad de memoria y velocidad para almacenar datos y programas), un digitalizador u otro dispositivo que permita convertir los datos de mapas u otros documentos a forma digital, y un graficador para representar los resultados de los datos procesados.
- *Datos o información:* se requieren de buenos datos de soporte para que el SIG pueda resolver los problemas y contestar a preguntas de la forma más acertada posible.
- *Procedimientos:* para que un SIG tenga una implementación exitosa debe basarse en un buen diseño y reglas de actividad definidas, que son los modelos y prácticas operativas exclusivas en cada organización. Además de contar con equipos y programas adecuados para realizar el trabajo, la utilización eficaz del SIG requiere contar con servicios de planificación, organización y supervisión, que permitan mantener la calidad de los datos y la integridad de los productos finales <sup>[39]</sup>.



### 3.6.2. Preguntas que puede contestar un SIG

En forma genérica, las principales tareas o serie de preguntas típicas que puede responder el SIG son:

*Localización:* ¿Qué hay en...? ¿Qué se encuentra en...?

Con esta pregunta se pretende encontrar qué existe en un sitio en particular. La localización puede estar dada por el nombre, la dirección o las coordenadas.

*Condición:* ¿Dónde hay...? ¿Dónde se encuentra...?

Esta pregunta complementa la primera y requiere un análisis espacial para su respuesta. Es necesario encontrar un lugar donde ciertas condiciones son satisfechas.

*Tendencia:* ¿Qué ha cambiado desde...?

Esta interrogación involucra la primera y la segunda preguntas y busca encontrar las diferencias existentes de un área a través del tiempo.

*Patrones:* ¿Qué patrón espacial existe...?

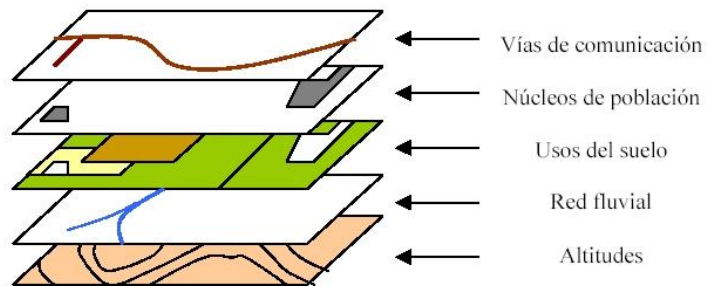
Con esta pregunta se puede identificar la existencia de un fenómeno que se repite ante ciertas condiciones.

*Modelamiento:* ¿Qué pasa si...?

La pregunta está dada para determinar qué pasa cuando se realiza un cambio. Las respuestas necesitan información geográfica, técnica y económica.

En los últimos años, la aplicación de herramientas SIG se ha convertido en imprescindible en campos profesionales muy diversos como la ingeniería donde se realizan estudios de factibilidad para el trazado de vías, rutas vehiculares, cartografía, entre otros y en el área de recursos naturales donde se encuentran el manejo de bosques y tierras, preservación de ríos y selvas, análisis de impacto ambiental, análisis del recurso agua, geología, agricultura, estudio de suelos, etc., como se esquematiza en la figura 12.

**Figura 12.** Algunas áreas de aplicación de los SIG.



Los SIG también tienen gran utilidad en gestión catastral, planeamiento urbanístico y territorial, gestión de espacios naturales, gestión de todo tipo de infraestructuras, etc., convirtiéndose en uno de los sectores profesionales de más rápido crecimiento y evolución técnica constante <sup>[39]</sup>.

### **3.7. SISTEMA DE POSICIONAMIENTO GLOBAL (GPS)**

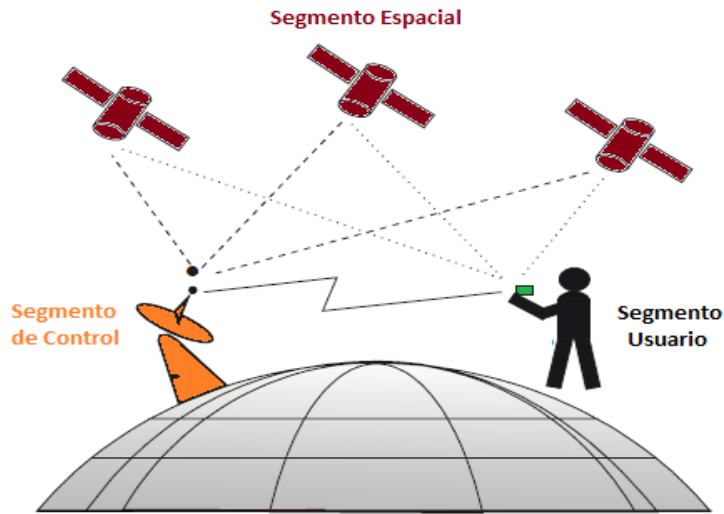
El GPS es un sistema de localización que permite conocer la posición de algo o alguien en cualquier lugar del mundo con una gran precisión. Actualmente este sistema consta de 24 satélites artificiales y sus respectivas estaciones en tierra, para determinar por triangulación, la altitud, longitud y latitud de cualquier objeto en la superficie terrestre las 24 horas del día sin importar las condiciones del tiempo <sup>[40]</sup>.

#### **3.7.1. Componentes de un GPS**

Como se muestra en la figura 13, un GPS está compuesto por tres segmentos diferentes: segmento espacial, segmento de control y segmento usuario.

- *Segmento Espacial:* constituido por los satélites. Los satélites del GPS se encuentran girando alrededor de la tierra a una altura aproximada de 20200Km, siendo posible conocer con exactitud la ubicación de un satélite en un instante de tiempo dado, convirtiéndose por tanto los satélites en puntos de referencia en el espacio <sup>[41]</sup>.

**Figura 13.** Componentes del Sistema GPS.



- *Segmento de Control:* el cerebro del sistema. Consta de 5 estaciones monitoras encargadas de mantener en órbita los satélites y supervisar su correcto funcionamiento, 3 antenas terrestres que envían a los satélites las señales que deben transmitir y una estación experta de supervisión de todas las operaciones <sup>[40]</sup>.
- *Segmento Usuario:* formado por los receptores pasivos situados en tierra. Los receptores, a partir de los mensajes que provienen de cada satélite visible, proporcionan casi instantáneamente la posición, altitud, velocidad y tiempo preciso al usuario desde cualquier parte del mundo las 24 horas del día <sup>[42]</sup>.

### 3.7.2. Funcionamiento de un GPS

El funcionamiento de un GPS se basa en una red de 24 satélites que en todo momento describen órbitas sincronizadas alrededor del globo terráqueo, los cuales emiten su señal durante las 24 horas del día. Los receptores GPS reciben la información precisa de la hora y la posición del satélite. Exactamente reciben 2 tipos de datos: los datos sobre la ubicación y la operatividad de cada satélite en relación a los otros satélites de la red; una vez el receptor GPS tiene esta información y la hora precisa, sabe dónde buscar los otros satélites en el espacio; la otra serie de datos hace referencia a los datos precisos, únicamente, del satélite que está siendo captado por el receptor, y se utilizan para calcular la distancia

exacta del receptor al satélite la cual se mide multiplicando el tiempo de vuelo de la señal emitida desde el satélite por su velocidad de propagación. Cuando el receptor ha captado la señal de al menos tres satélites, calcula su propia posición en la tierra mediante la triangulación de la posición de los satélites captados, y presenta los datos de longitud, latitud y altitud calculados.

La ventaja más importante del GPS con respecto a los sistemas habituales de orientación o ubicación, es que facilita localizar una posición y altitud en la tierra, con una precisión casi exacta, incluso en condiciones meteorológicas muy adversas. Sin embargo se pueden presentar algunas fuentes de error que afectan de forma significativa a las medidas realizadas con el GPS tales como: error en el cálculo de la posición del satélite, inestabilidad del reloj del satélite y propagación anormal de la señal, entre otros.

Los GPS suponen uno de los más importantes avances tecnológicos en las últimas décadas y son múltiples los campos de aplicación, entre los cuales se encuentran el estudio de fenómenos atmosféricos, la ingeniería civil, cartografía, navegación marítima, terrestre o aérea, topografía y agricultura de precisión, entre otros<sup>[42]</sup>.

## **4. METODOLOGÍA**

Para la obtención de los resultados de esta investigación, se utilizó la información de los avances que se han obtenido durante el proyecto Agricultura Específica por Sitio (AEPS) Fase IV, realizado por CENICAÑA y cofinanciado por COLCIENCIAS.

En dicho proyecto, se identificaron, en las zonas agroecológicas (ZA) de mayor influencia en el valle geográfico del río Cauca, todas las unidades productivas y las suertes (lotes) de caña con dos consociaciones de suelos o dos ZA clasificadas como contrastantes y que históricamente presentan una diferencia de la producción de 15 toneladas de caña de azúcar por hectárea (TCH) o más. Esta selección se realizó teniendo en cuenta la información del estudio detallado de suelos <sup>[5]</sup>, y utilizando el Sistema de Información Geográfica (SIG) de CENICAÑA.

Se buscaron unidades productivas pertenecientes a productores de caña (ingenios) identificados como innovadores, ya que cuentan con suficientes recursos e infraestructura de riego que garantizan la realización y administración del cultivo de caña de azúcar en forma adecuada.

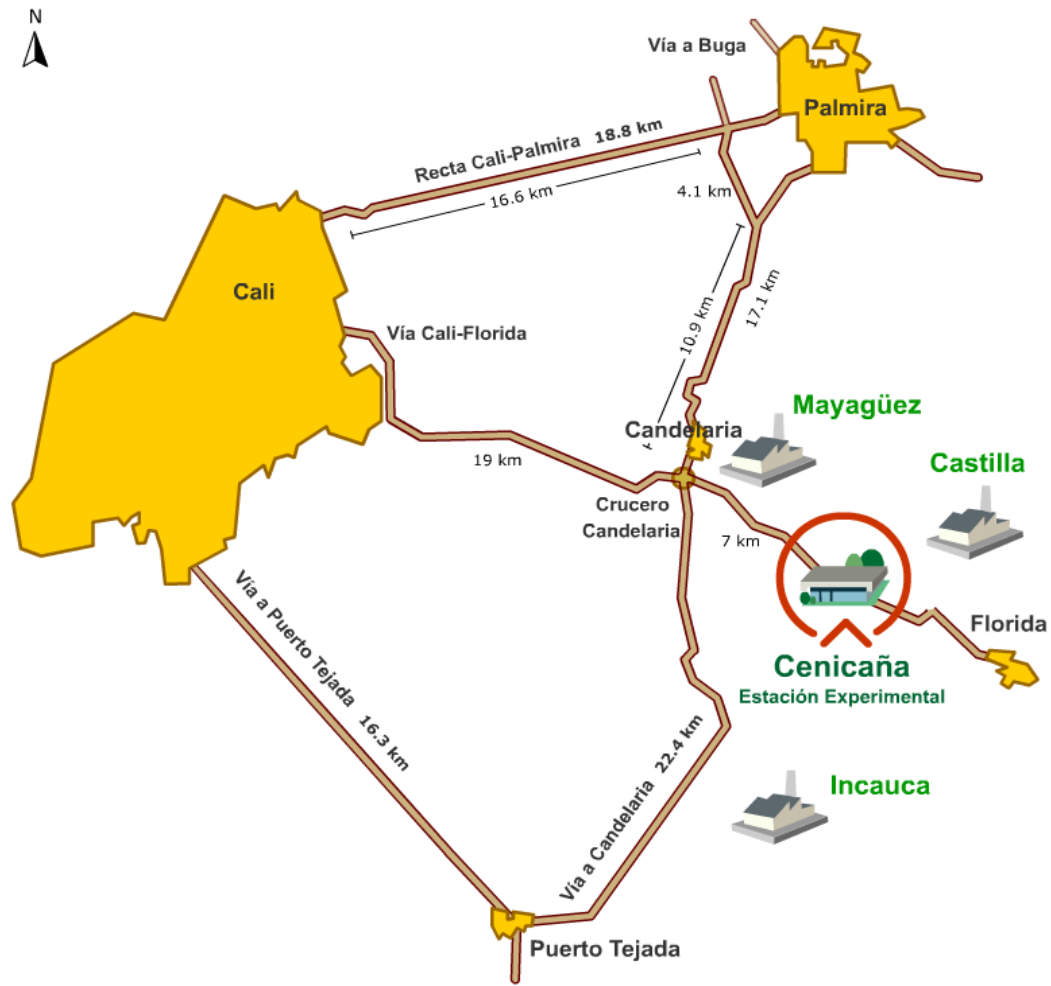
### **4.1. UBICACIÓN GEOGRÁFICA**

El análisis de suelos se llevó a cabo en la Estación Experimental del Centro de Investigación de la Caña de Azúcar de Colombia (CENICAÑA), ubicado en el kilómetro 26, vía Cali-Florida (figura 14), en el corregimiento de San Antonio de los Caballeros, municipio de Florida, Valle del Cauca (Colombia), en la latitud 3° Norte a 1024 metros sobre el nivel del mar con una temperatura promedio de 23.5°C, precipitación media anual de 1160 mm y humedad relativa del 77%.

### **4.2. DURACIÓN**

El trabajo se inició con la selección y toma de los suelos de tres suertes (lotes) diferentes y su posterior traslado a la Estación Experimental de CENICAÑA en el mes de agosto del 2009. Terminó en mayo del 2010 con un total de 340 muestras a las cuales se les realizaron 16 análisis de parámetros físicos y químicos para un total de 5440 datos obtenidos.

**Figura 14.** Ubicación de la estación experimental del Centro de Investigación de la Caña de Azúcar, CENICAÑA.



### 4.3. SELECCIÓN DE LAS SUERTES (LOTES)

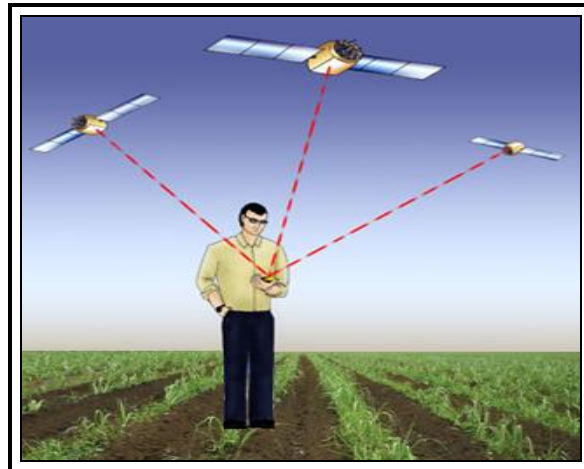
Una vez identificados los sitios y las unidades productivas con las características deseadas, se seleccionaron dentro de ellas tres suertes con las condiciones de suelos y zonas agroecológicas diferentes dentro de una misma suerte. Las suertes seleccionadas correspondieron a los ingenios Riopaila y Castilla.

De acuerdo a los estudios de la zonificación agroecológica <sup>[16]</sup>, las tres zonas agroecológicas de mayor influencia tienen un área aproximada de 70.000 hectáreas equivalente al 32% del área con caña de azúcar en el valle geográfico del río Cauca.

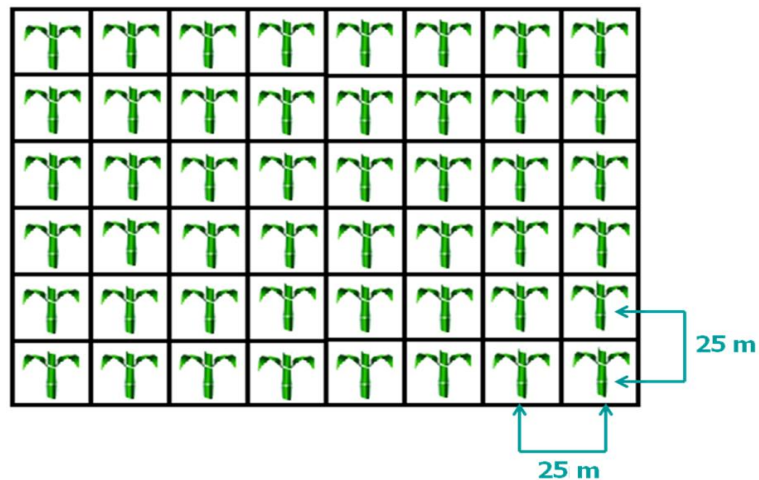
#### 4.4. MUESTREOS

Cada punto de muestreo fue georreferenciado con la ayuda de un GPS como se muestra en la figura 15. Todos los muestreos fueron realizados sobre una grilla de 25 x 25 m (figura 16) considerando la capa superficial entre 0-20 cm. Las muestras se recolectaron con la ayuda de un barreno y se almacenaron en bolsas de plástico para posterior traslado al laboratorio de análisis de suelos de la estación experimental (figura 17), obteniendo un total de 340 muestras.

**Figura 15.** Esquema de la georreferenciación de los puntos para el muestreo de los suelos.



**Figura 16.** Esquema de la grilla de 25 x 25 m utilizada para el muestreo de los suelos.



**Figura 17.** Muestreos realizados con barreno y almacenamiento de las muestras en bolsas de plástico para posterior traslado al laboratorio de análisis de suelos.



## 4.5. ANÁLISIS DE SUELOS

Con el fin de caracterizar los suelos a estudiar, se realizaron determinaciones físicas y químicas de acuerdo a la metodología implementada en el laboratorio de Química de Cenicaña <sup>[41]</sup>. Para ello, inicialmente se secaron las muestras a capacidad de campo a una temperatura de 40 °C durante 72 horas. Posteriormente se trituraron en un molino Siemens para lograr la homogenización total de las muestras.

### 4.5.1. Análisis Físicos

Los análisis físicos comprenden las siguientes determinaciones:

- **Textura** por el método de Bouyoucos, que consiste en dejar sedimentar una muestra de suelo en un medio líquido durante un determinado tiempo, al cabo del cual se cuantifica la cantidad de partículas de un determinado tamaño que hay en suspensión; la medida de las partículas en suspensión se hace directamente en la suspensión por medio de un hidrómetro. Con este método se determinan los porcentajes de arcilla, limo y arena que se encuentran en el suelo, de acuerdo con el peso de una muestra seca del mismo; a los 40 segundos, todas las partículas mayores de 0.05mm (arenas) se sedimentan de tal manera que no tienen influencia sobre el hidrómetro. La lectura realizada 1 hora después corresponde a las partículas entre 0.002 y 0.05mm (limos) y a las 2 horas a las partículas menores de 0.002mm (arcillas).



- **Densidad aparente:** es la densidad que se calcula teniendo en cuenta el espacio ocupado por los poros al cuantificar el volumen de la muestra de suelo. La evaluación de la densidad aparente se hace con el suelo a capacidad de campo por el método del cilindro <sup>[18]</sup>.

#### 4.5.2. Análisis Químicos

Los análisis químicos comprenden las siguientes determinaciones:

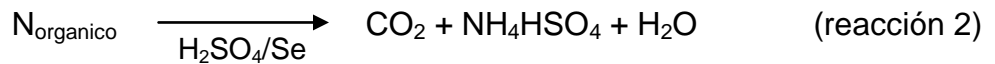
- **pH** por método potenciométrico en una suspensión de 25 g de suelo y 50 mL de agua destilada (relación 1:2) con agitación durante 20 minutos y utilizando un pHmetro SCHOTT Lab 850 con electrodo combinado de vidrio.
- **Materia orgánica** por Espectroscopía de Infrarrojo Cercano (NIRS). Se tomaron aproximadamente 50 g de suelo en una celda de vidrio y se introdujo la muestra en el espectrofotómetro. El contenido de MO se obtuvo mediante interpolación en una curva de calibración, elaborada con patrones de suelo en un rango de concentración de 1.25-6.14 % y rango espectral de 1114-2484 nm. La medición se realizó en el espectrofotómetro Foss NIRSystems Model 6500, en módulo RCA (Rapid Content Analyzer) y con detector de sulfuro de plomo, mostrado en la figura 18.

**Figura 18.** Espectrofotómetro de infrarrojo cercano Foss NIRSystems Model 6500 + PC y celda con muestra de suelo antes de la lectura (Cenicaña).

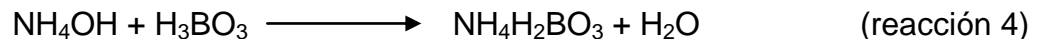
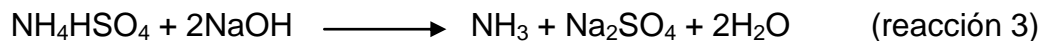


- **Nitrógeno** por el método Kjeldahl que es el método utilizado universalmente para la determinación cuantitativa de nitrógeno procedente de diversos materiales y comprende tres etapas <sup>[44]</sup>:

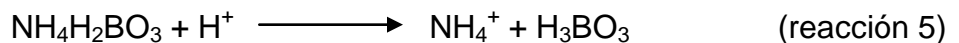
1) Oxidación de la muestra con ácido sulfúrico selenizado (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>/Se) para oxidar la MO y convertir el nitrógeno en sulfato ácido de amonio (NH<sub>4</sub>HSO<sub>4</sub>) de acuerdo a la siguiente reacción:



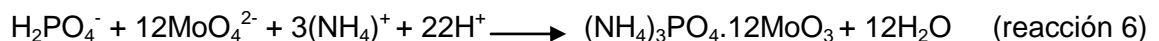
2) Descomposición del sulfato ácido de amonio por medio de un exceso de álcali para liberar el amoniaco (NH<sub>3</sub>) el cual se recoge por destilación sobre ácido bórico (H<sub>3</sub>BO<sub>3</sub>). Las reacciones son las siguientes:



3) Titulación del borato de amonio (NH<sub>4</sub>H<sub>2</sub>BO<sub>3</sub>) con ácido sulfúrico (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) 0.00714 N, utilizando como indicador una mezcla de rojo de metilo y verde de bromocresol (indicador mixto). La reacción es la siguiente:



- **Fósforo disponible** empleando el método de Bray II. Se pesaron 3.00 g de suelo al cual se le adicionaron 21 mL de solución extractora (mezcla de NH<sub>4</sub>F 0.03 N y HCl 0.1 N) y se agitó por 40 segundos. Una vez extraído el fósforo, se procedió a su determinación por el método colorimétrico, el cual consistió en formar un complejo del fósforo con el ácido molíbdico que absorbe a 660 nm. El método sulfo-molíbdico utiliza una solución de H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>-(NH<sub>4</sub>)<sub>6</sub>Mo<sub>7</sub>O<sub>24</sub>•4H<sub>2</sub>O, que al reaccionar produce ácido molíbdico (H<sub>2</sub>MoO<sub>4</sub>). Posteriormente, este ácido reacciona con el ácido fosfórico de acuerdo a la reacción 6:

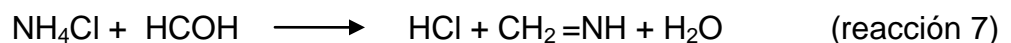


Por reducción con ácido ascórbico, este heterocompuesto incoloro forma un compuesto de color azul que absorbe a 660 nm.

El equipo utilizado en esta determinación fue el Espectrofotómetro UV-VIS SHIMADZU UV-1601 PC.

A pesar que en varios suelos el valor de pH es ligeramente alcalino, se utilizó el método Bray II, porque estadísticamente ha sido igualmente efectivo a otros métodos en la predicción de la disponibilidad del fósforo, y a su vez se encontró altamente relacionado con el fósforo en el tejido foliar, por lo que se considera como método de referencia para el análisis de suelos para el cultivo de la caña de azúcar en el valle geográfico del río Cauca <sup>[45]</sup>.

- **Bases intercambiables (Ca, Mg, Na y K)** por Espectrofotometría de Absorción Atómica (EAA). Se pesaron 2.5 g de suelo y se adicionaron 25 mL de acetato de amonio 1 N y pH 7, la mezcla se agitó durante 40 minutos, posteriormente se adicionaron 25 mL más de acetato y finalmente se filtró la suspensión. Sobre este extracto se realizó la medición en el espectrofotómetro Perkin Elmer AAnalyst 400, cada una a su respectiva longitud de onda.
- **Capacidad de Intercambio Catiónico (CIC):** Es la medida de la capacidad que posee un suelo para adsorber cationes y es equivalente a la carga negativa del suelo. Consiste en desplazar todos los cationes del suelo y reemplazarlos por otro catión, en este caso, amonio  $\text{NH}_4^+$ ; el suelo seco, tamizado y muy fino, se saturó con acetato de amonio 1 N y pH 7.0. Los iones  $\text{NH}_4^+$  adsorbidos se desplazaron con  $\text{Na}^+$  (NaCl al 10%), obteniéndose  $\text{NH}_4\text{Cl}$  en solución. Posteriormente, se adicionó formaldehído neutro al 40%, generándose ácido clorhídrico (HCl). La reacción es:



El HCl obtenido se tituló con NaOH 0,1 N en presencia de fenolftaleína.

- **Elementos menores (Cu, Fe Mn y Zn)** por Espectrofotometría de Absorción Atómica (EAA). Se pesaron 5.0 g de suelo y se adicionaron 20 mL de mezcla ácida HCl/ $\text{H}_2\text{SO}_4$  (Método de Melich), la mezcla se agitó durante 15 minutos y finalmente se filtró. Sobre este extracto se realizó la medición en el

espectrofotómetro Perkin Elmer AAnalyst 400, cada uno a su respectiva longitud de onda.

- **Boro** mediante Espectroscopía de Infrarrojo Cercano (NIRS). Se tomaron aproximadamente 50 g de suelo en una celda de vidrio y se introdujo la muestra en el espectrofotómetro. El contenido de boro se obtuvo mediante interpolación en una curva de calibración, elaborada con patrones de suelo en un rango de concentración 0.05-3.40 ppm y rango espectral de 410-2488 nm. La medición se realizó en el espectrofotómetro Foss NIRSystems Model 6500, en módulo RCA (Rapid Content Analyzer) y con detector de sulfuro de plomo, mostrado en la figura 18.

Con el fin de lograr visualizar espacialmente, interpretar y correlacionar (con la ayuda de la estadística) las diferentes propiedades físicas y químicas medidas y sus respectivas tendencias, los resultados obtenidos fueron integrados en los programas de geoestadística (GS+ y módulo de geoestadística de ArcGIS) de CENICAÑA, para la obtención de los mapas de contorno de cada una de las variables medidas. Cabe anotar que el rango (mínimo-máximo) de los resultados, nunca va a coincidir con el rango mostrado en los mapas de contorno ya que, durante la generación de los mismos, se hace un descarte de datos (atípicos o extremos), además de los errores generados por la propia interpolación.

#### **4.6. ANÁLISIS ESTADÍSTICO**

Con los resultados obtenidos se procedió, en conjunto con el Servicio de Análisis Económico y Estadístico de Cenicaña, utilizando el paquete estadístico SAS, a establecer las diferentes correlaciones entre las variables físicas y químicas analizadas, e identificar las posibles causas de la variabilidad tanto entre suerte (entre lotes) como intrasuerte (dentro de lotes) en las propiedades de los diferentes suelos.

## **5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

Para obtener los resultados correspondientes a la selección de las suertes, la definición de los lotes seleccionados y los mapas de contorno de cada una de las propiedades físicas y químicas evaluadas en esta investigación, se utilizó la información de los avances que se han obtenido durante el proyecto Agricultura Específica por Sitio (AEPS) Fase IV, realizado por CENICAÑA y cofinanciado por COLCIENCIAS.

La información recopilada en este estudio se presentará primero considerando la selección de las suertes para el análisis, posteriormente se hace la definición de cada uno de los lotes seleccionados con las respectivas áreas experimentales y puntos de muestreo, luego se hará el análisis de las propiedades físicas y químicas evaluadas al inicio del cultivo y después de la fertilización del mismo (tratamiento T1 y tratamiento T2 respectivamente), teniendo en cuenta el respectivo programa de fertilización establecido en cada suerte (lote). Finalmente se realizará una discusión global del comportamiento de cada parámetro determinado y el efecto de la aplicación de fertilizantes en las propiedades del suelo.

### **5.1. SELECCIÓN DE LAS SUERTES PARA LA REALIZACIÓN DEL ESTUDIO**

De acuerdo con información solicitada en el mes de marzo de 2009 a los ingenios Castilla y Riopaila, las suertes (lotes) que cumplieron con los requisitos para llevar a cabo los experimentos requeridos por el proyecto, de acuerdo a las condiciones de suelos y zonas agroecológicas diferentes dentro de una misma suerte, se relacionan en la tabla 7 y figura 19.

### **5.2. DEFINICIÓN DE LOS LOTES SELECCIONADOS**

En la tabla 8 se describe el área total, área experimental y puntos de muestreo de cada una de las suertes (lotes) seleccionadas.

Las figuras 20, 21 y 22 muestran las áreas experimentales y puntos de muestreo de cada una de las suertes seleccionadas para la evaluación de cada una de las propiedades físicas y químicas del suelo.

**Tabla 7.** Suertes designadas para la realización del estudio. Fuente: Cenicaña, 2009. Proyecto Agricultura Específica por Sitio (AEPS) Fase IV <sup>[4]</sup>.

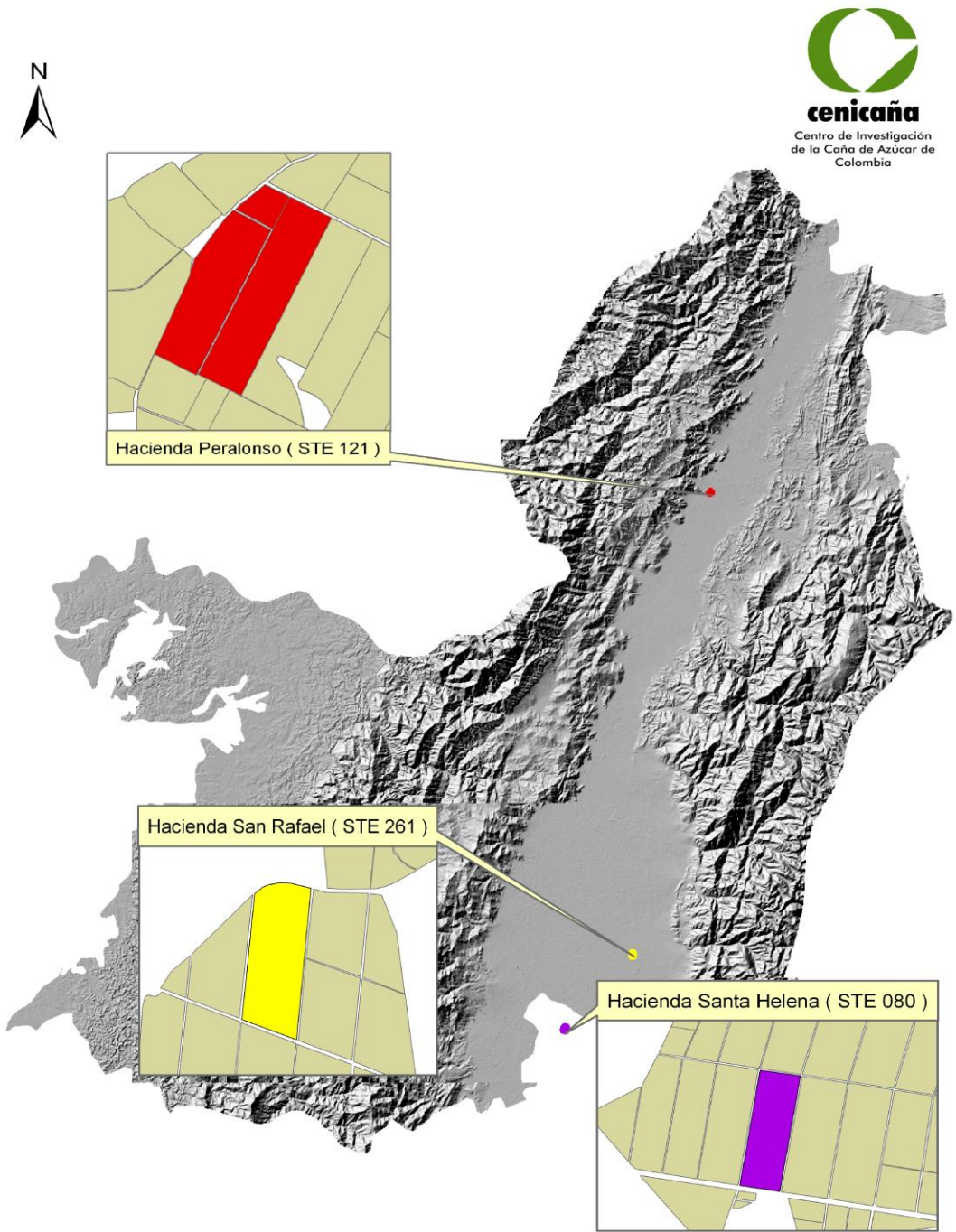
Ingenio	Hacienda	Suerte (lote)	Ubicación	ZA*	Área (ha)	Consociaciones
Riopaila	Peralonso	121	La Paila (Corregimiento el Overo)	14H1	4.9	Canelo (CL). Fluvaquentic Endoaquepts
				10H3	11.4	Cascajal (KJ). Aerico Endoaquepts
Castilla	Santa Elena	80	Puerto Tejada	6H1	4.1	Arroyo (AY). Udertic Haplustolls
				11H2	2.5	Franciscano (FR). Aquic Haplustolls
				18H2	9.9	Río Paila (RL). Fluventic Haplustolls
Castilla	San Rafael	261	Candelaria (Vereda la Tupia)	15H1	7.9	Joya (JO). Fluventic Haplusteps
				11H1	8.6	Palmira (PL). Pachic Haplustolls

\* La nomenclatura de las zonas agroecológicas está definida por un número inicial entre 1 y 33 que identifica el grupo homogéneo de suelos, seguido de la letra "H" unida a un número entre 0 y 5 que identifica el grupo de humedad (ver tablas 2 y 3).

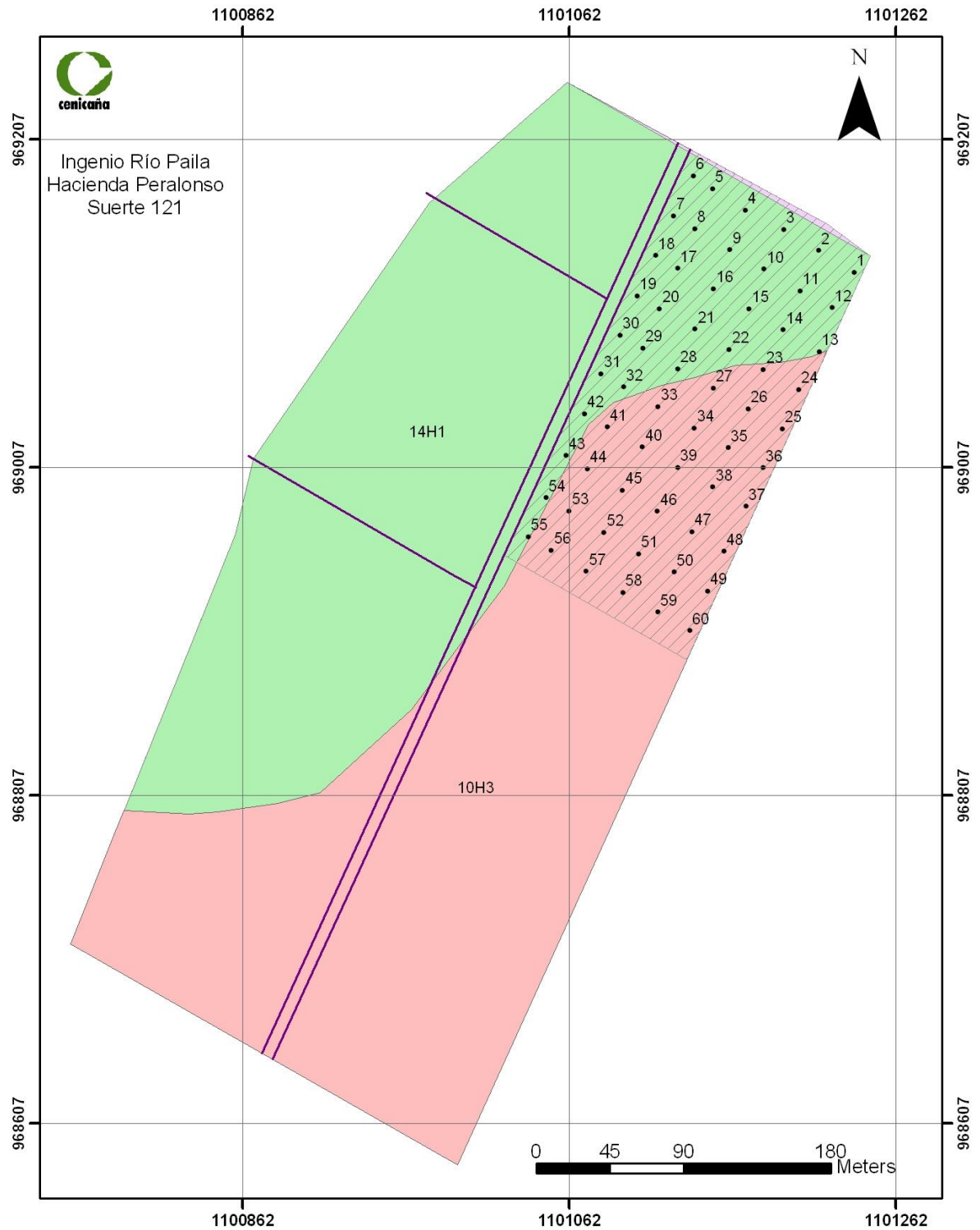
**Tabla 8.** Área total, área experimental y puntos de muestreo de las suertes designadas para la realización del estudio. Fuente: Cenicaña, 2009. Proyecto AEPS Fase IV <sup>[4]</sup>.

Ingenio	Hacienda	Suerte (lote)	Área total (ha)	Área Experimental (ha)	Puntos de muestreo
Río Paila	Peralonso	121	16.50	3.63	60
Castilla	Santa Elena	80	16.50	3.05	50
Castilla	San Rafael	261	16.60	4.63	60

**Figura 19.** Ubicación geográfica de las suertes designadas para la realización del estudio. Fuente: Cenicaña, 2009. Proyecto AEPS Fase IV <sup>[4]</sup>.

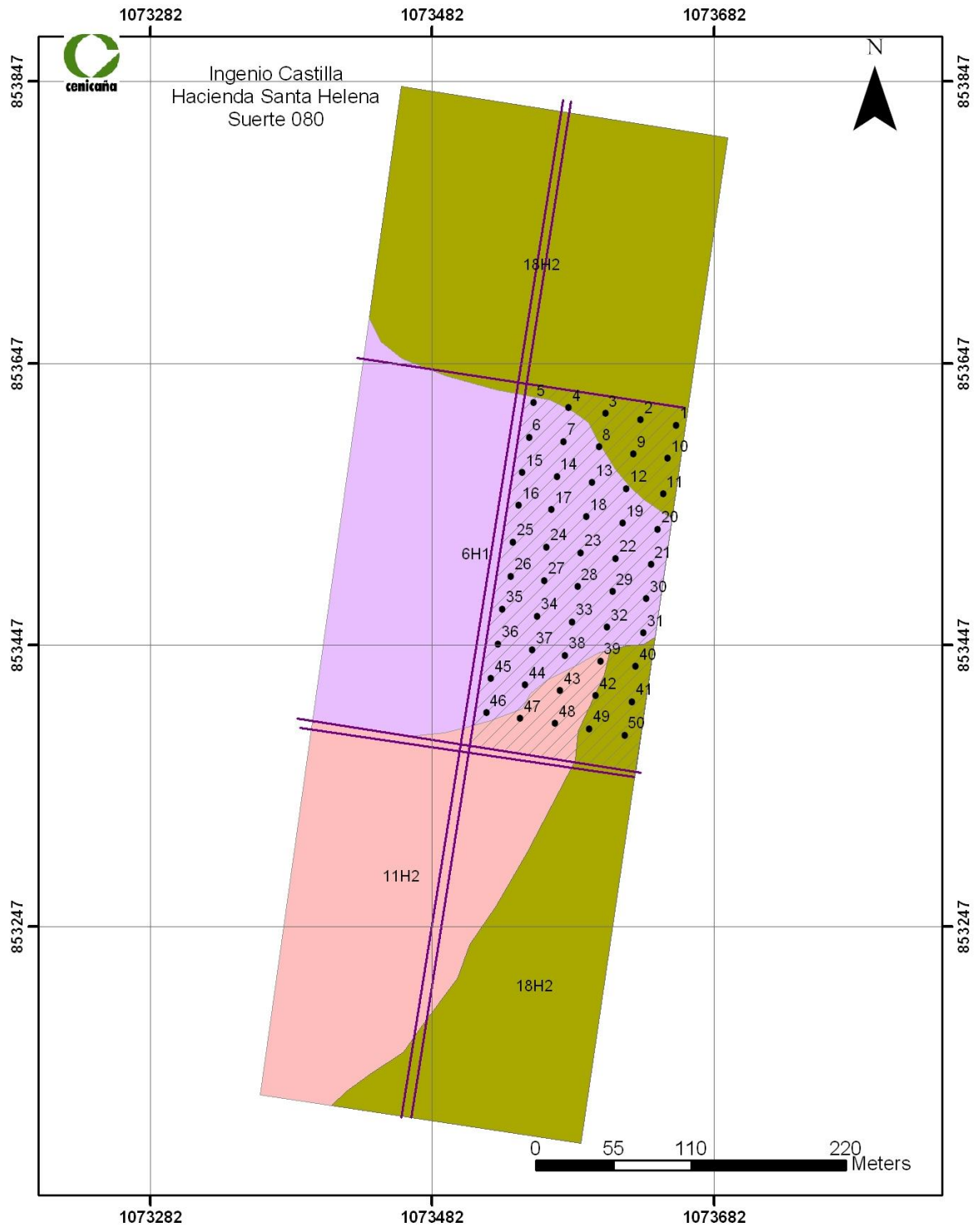


**Figura 20.** Área experimental y puntos de muestreo correspondientes a la hacienda Peralonso, suerte 121. Fuente: Cenicaña, 2009. Proyecto AEPS Fase IV.

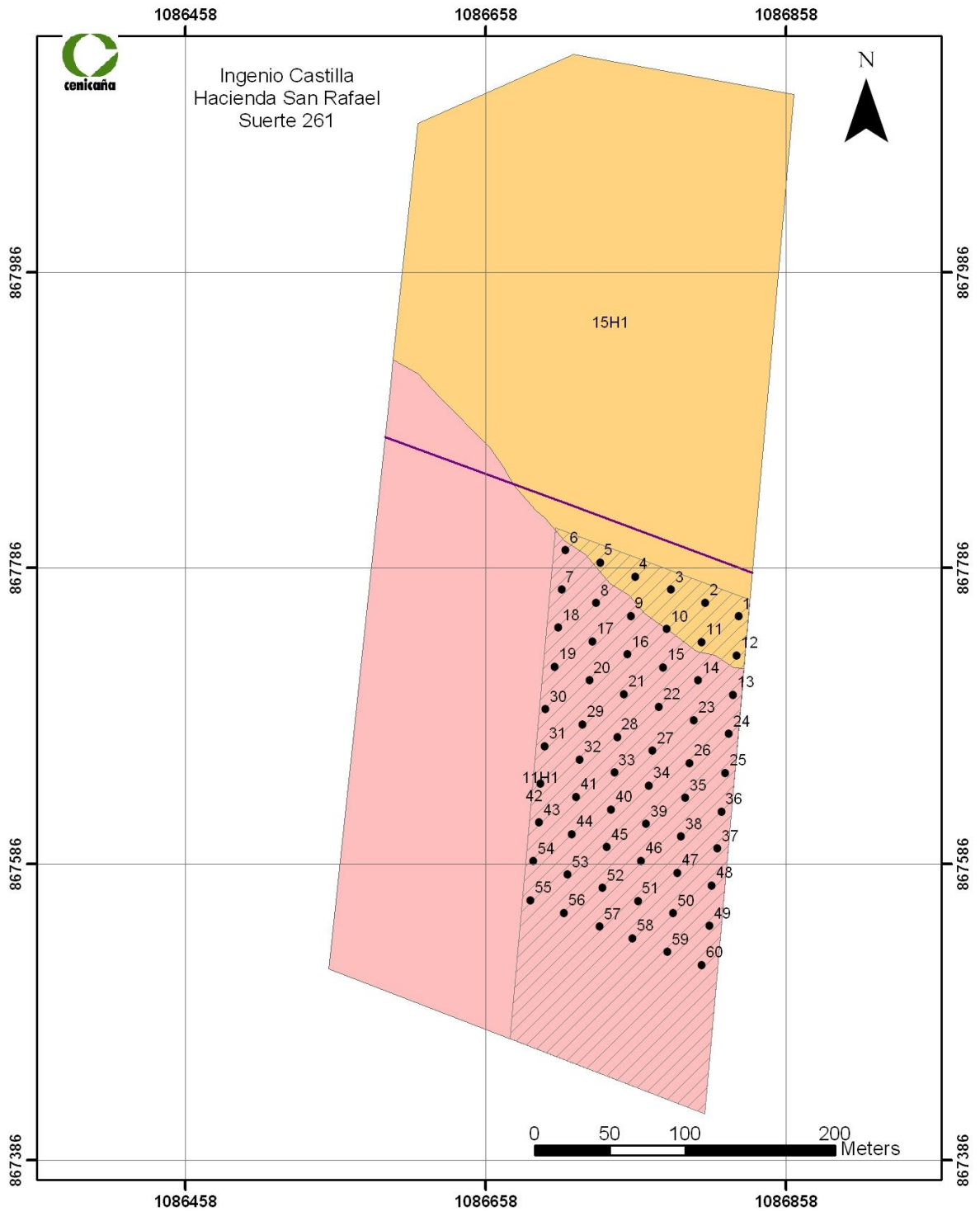




**Figura 21.** Área experimental y puntos de muestreo correspondientes a la hacienda Santa Elena, suerte 80. Fuente: Cenicaña, 2009. Proyecto AEPS Fase IV.



**Figura 22.** Área experimental y puntos de muestreo correspondientes a la hacienda San Rafael, suerte 261. Fuente: Cenicaña, 2009. Proyecto AEPS Fase IV.



### 5.3. ANÁLISIS DE SUELOS

Los resultados de las propiedades físicas y químicas evaluadas en cada suerte se relacionan en el anexo 1, tablas 1 a la 6.

Para la interpretación de los resultados, se tomaron como referencia los parámetros para niveles de fertilidad en suelos (SCCS. 2000) y los niveles críticos de fertilidad para la caña de azúcar, establecidos por CENICAÑA, ambos descritos en el anexo 2, tablas 1 a la 4.

A continuación, se hace el análisis de los parámetros medidos en los suelos de cada suerte (lote) para las muestras tomadas, considerando los dos tratamientos mencionados anteriormente: T1 y T2.

#### 5.3.1. Análisis de los suelos de la hacienda Peralonso, suerte 121.

La tabla 9 muestra los parámetros del desarrollo del cultivo de caña de la variedad CC 85-92, sembrada en la hacienda Peralonso, suerte 121.

**Tabla 9.** Parámetros del desarrollo del cultivo de caña de la variedad CC 85-92, sembrada en la hacienda Peralonso, suerte 121.

Variedad de Caña Sembrada	Calidad	Fertilizantes Aplicados	
		Tratamiento 1 (T1)	Tratamiento 2 (T2)
CC 85-92	Semilla libre de enfermedades RDS y escaldadura (Laboratorio de CENICAÑA)	Al inicio del cultivo: ✓ 100 KgDAP/ha	A los 60 días después de la siembra: ✓ Urea: 150 Kg/ha ✓ KCl: 100 Kg/ha

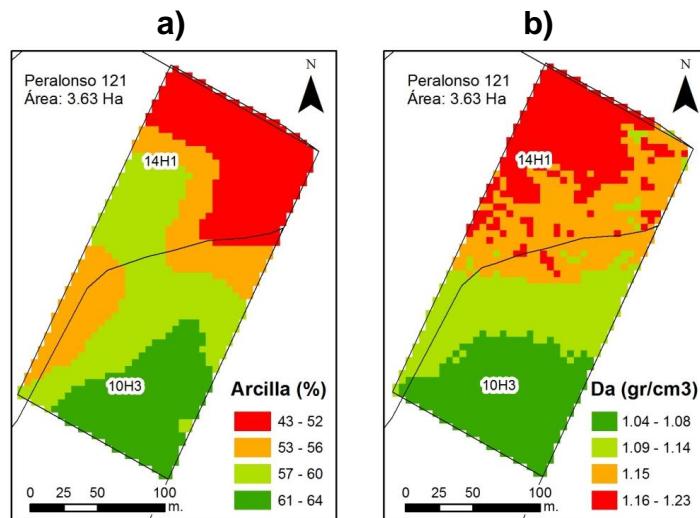
##### 5.3.1.1. Análisis de los suelos de la hacienda Peralonso, suerte 121, al inicio del cultivo (T1).

El 88% de los suelos presentaron una textura arcillosa y el 12% textura arcillo-limosa y franco-arcillo-limosa; los altos porcentajes de arcilla encontrados (39.82-67.82%), indican una alta capacidad de retención de agua, conllevando así a

encharcamientos periódicos en épocas de alta precipitación pluvial, lo cual es característico de las dos ZA de la suerte (tabla 7), de acuerdo a sus grupos homogéneos de suelos y grupos de humedad correspondientes (tablas 2 y 3 respectivamente), además de la poca pendiente (0.4%) de la suerte. Espacialmente se observa en la figura 23a, que los mayores contenidos de arcilla se encuentra en la ZA 10H3, al suroriente del área experimental.

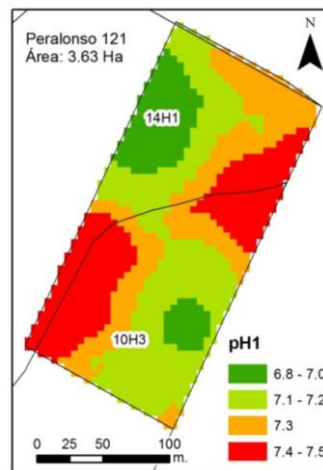
La densidad aparente (figura 23b) se presentó en promedio con valor de 1.13 g/cm<sup>3</sup> valor comprendido dentro del rango establecido como medio para suelos minerales <sup>[21]</sup>, indicando que aún no hay compactación de los mismos, aún cuando los contenidos de arcillas son altos. Dada la relación inversa existente entre arcilla y Da, se observa espacialmente que los menores valores de Da están ubicados en la ZA 10H3, al sur del área experimental, como era de esperarse, puesto que allí se ubican los mayores contenidos de arcilla.

**Figura 23.** Porcentajes de arcilla y Densidad aparente, presentes en la hacienda Peralonso, suerte 121.



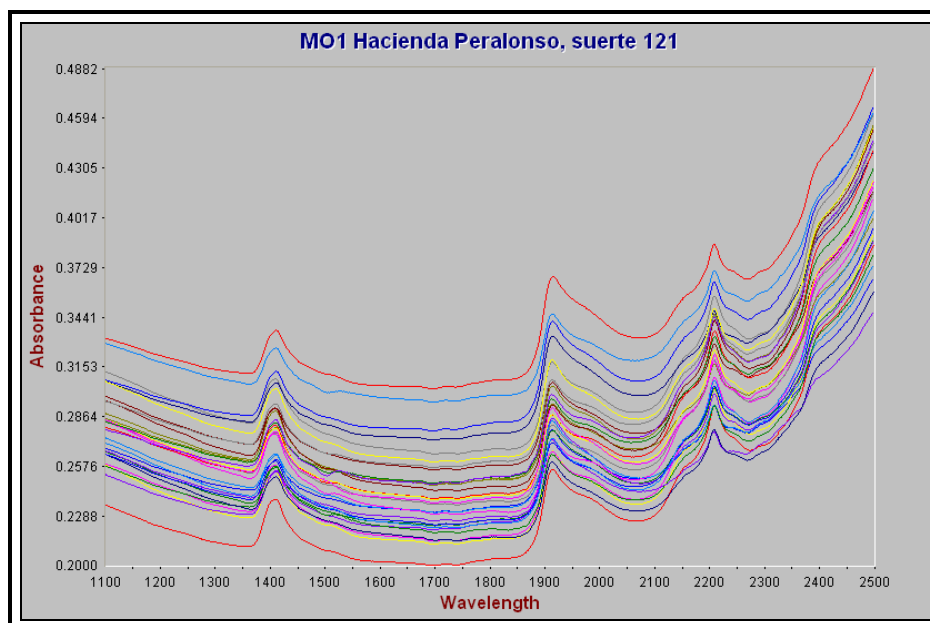
Los valores de pH encontrados (figura 24) varían en un rango comprendido entre 6.5 y 8.0, mostrando una acidez muy suave hasta alcalinidad suave para estos suelos, reflejando un rango adecuado para una óptima nutrición del cultivo <sup>[8]</sup>.

**Figura 24.** pH en la hacienda Peralonso, suerte 121, tratamiento 1 (T1).



En la figura 25 se expone el espectro NIR de la MO1 correspondiente a la suerte en estudio.

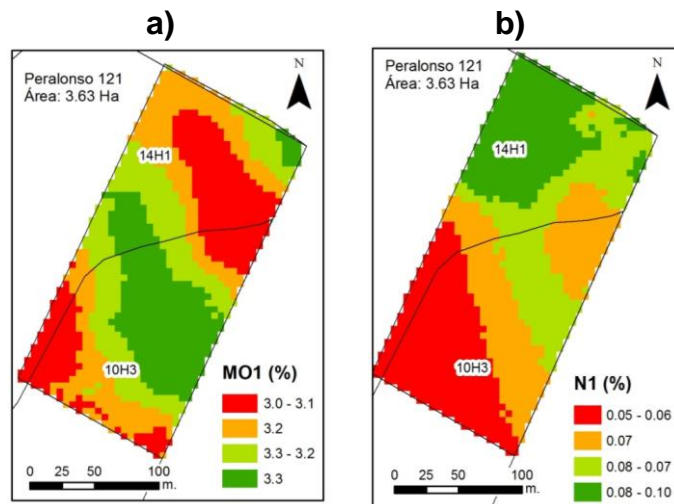
**Figura 25.** Espectro NIR de la MO en la hacienda Peralonso, suerte 121, tratamiento 1 (T1).



En el espectro NIR se observan picos sobresalientes cercanos a 1400 nm, propios del primer sobretono (región 1300-1900 nm) según la figura 7. Dichos picos se atribuyen a los enlaces O-H de compuestos aromáticos y grupos hidroxilos (R-OH) característicos de la compuestos presentes en la MO del suelo. Aproximadamente a 1900 nm se observan otras señales sobresalientes que se encuentran en la sección de combinación de bandas, correspondientes a las combinaciones de la señal C=O del segundo sobretono y posiblemente, a los enlaces O-H característicos del agua. En la misma sección, se observa señal cerca a 2200 nm pertenecientes a los enlaces C-H de los compuestos aromáticos y enlaces N-H de los compuestos nitrogenados presentes en la MO.

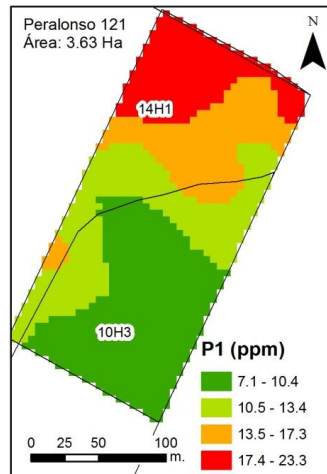
Como lo muestra espacialmente la figura 26a, en ambas ZA se presentó un nivel medio de materia orgánica con valores que oscilan entre 2.77 y 3.82% apropiados para suelos de este tipo de clima. Sin embargo el 10% de los suelos presentaron nivel medio de nitrógeno total y el 90% restante mostró deficiencia (<0.10%) (figura 26b), más no se puede asegurar su alta disponibilidad para las plantas, puesto que la forma orgánica que representa casi la totalidad del nitrógeno en el suelo, no puede ser utilizada por la planta mientras no se transforme previamente en nitrógeno inorgánico mediante procesos de mineralización; la altas relaciones C/N encontradas en esta suerte indican una fuerte deficiencia de nitrógeno sin aporte de este nutriente por parte de la MO.

**Figura 26.** MO y N en la hacienda Peralonso, suerte 121, tratamiento 1 (T1).



El 35% del área experimental registró nivel medio de fósforo (5-10 ppm) ubicado en su mayoría en la ZA 10H3, y el 65% restante, nivel alto de este nutriente, señalado en la figura 27, atribuible a la fertilización fosfatada realizada en dosis elevadas un mes antes del muestreo.

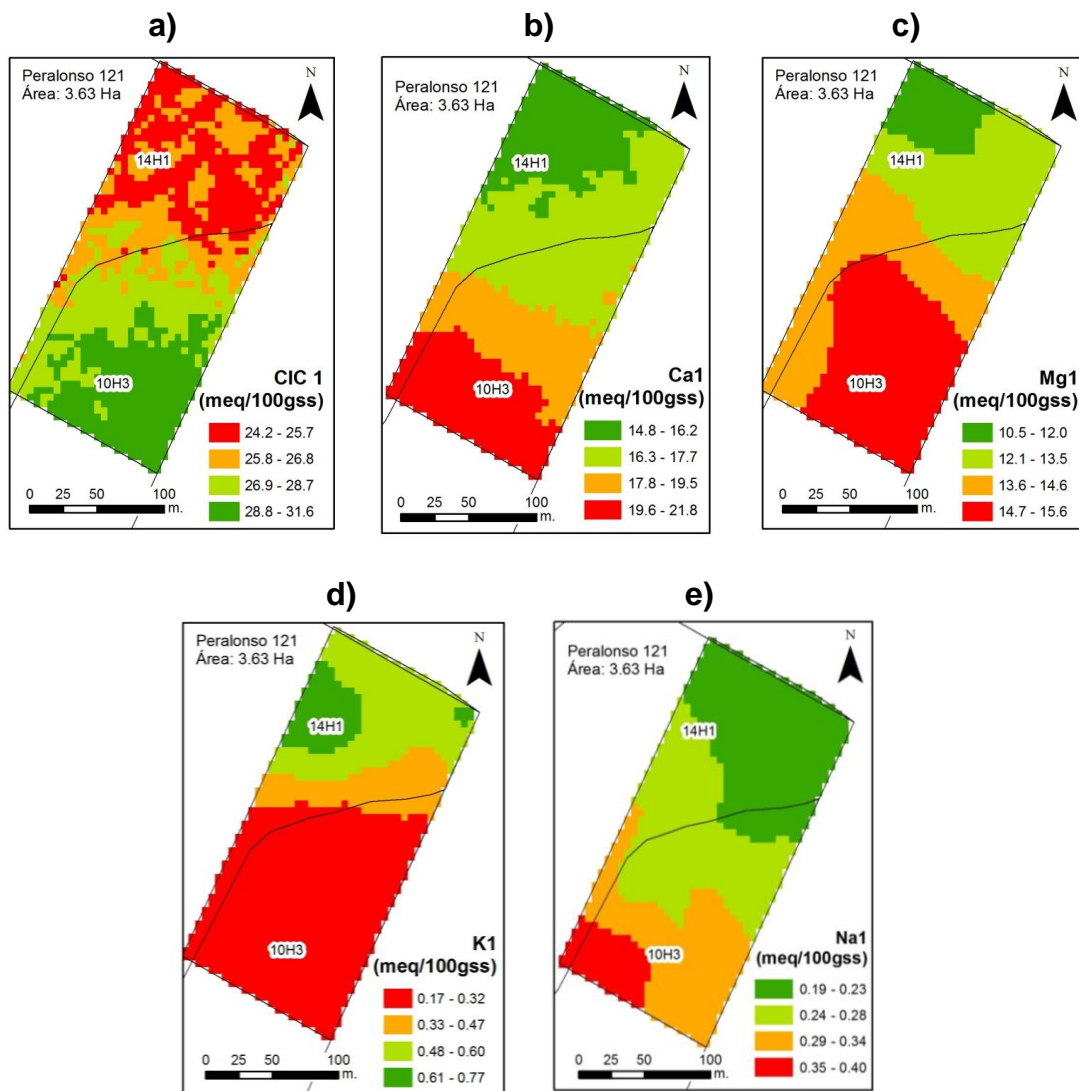
**Figura 27.** Concentración de P en la hacienda Peralonso, suerte 121, tratamiento 1 (T1).



El 18% de los suelos presentaron una CIC normal, el 54% elevada y el 28% muy elevada. Los altos porcentajes de arcilla encontrados al igual que el contenido medio de materia orgánica, influyen sobre la capacidad de intercambio catiónico, siendo favorable para estos suelos, evitando así pérdida de bases (Ca, Mg, K) por lavado. La figura 28a señala que los valores más altos de CIC se localizan en el suroriente del área en estudio, como es de suponerse, pues es ahí donde están los mayores porcentajes de arcilla (figura 23a). Tanto el nivel de calcio (12.41-27.40 meq/100g) como el de magnesio (9.00-17.53 meq/100g) son altos tal como se aprecia en las figuras 28b y 28c respectivamente, sin embargo, la relación Ca/Mg es baja, indicando que el Mg puede desplazar al Ca en los sitios de absorción en la planta. El potasio se mueve desde nivel bajo (0.04 meq/100g) hasta nivel alto (1.60 meq/100g) en el 35% y 40% de los suelos respectivamente (figura 28d), proveniente principalmente de las arcillas presentes en este suelo. La relación (Ca+Mg)/K está en desequilibrio para la mayoría de los casos e indica el predominio de calcio y/o magnesio, impidiendo la normal absorción de potasio. El sodio se presentó en nivel alto (>0.10 meq/100g) en toda el área experimental (figura 28e) indicando que se pueden presentar posibles problemas de salinidad por causa de este elemento. A nivel espacial, se percibe que las concentraciones más altas de Ca y Mg están localizadas en la mayor parte de la ZA 10H3, y que a su vez, en esta zona se localizan los menores valores de concentración

correspondientes al potasio, demostrándose así, el desequilibrio en la relación (Ca+Mg)/K.

**Figura 28.** CIC y concentración de bases intercambiables en la hacienda Peralonso, suerte 121, tratamiento 1 (T1).

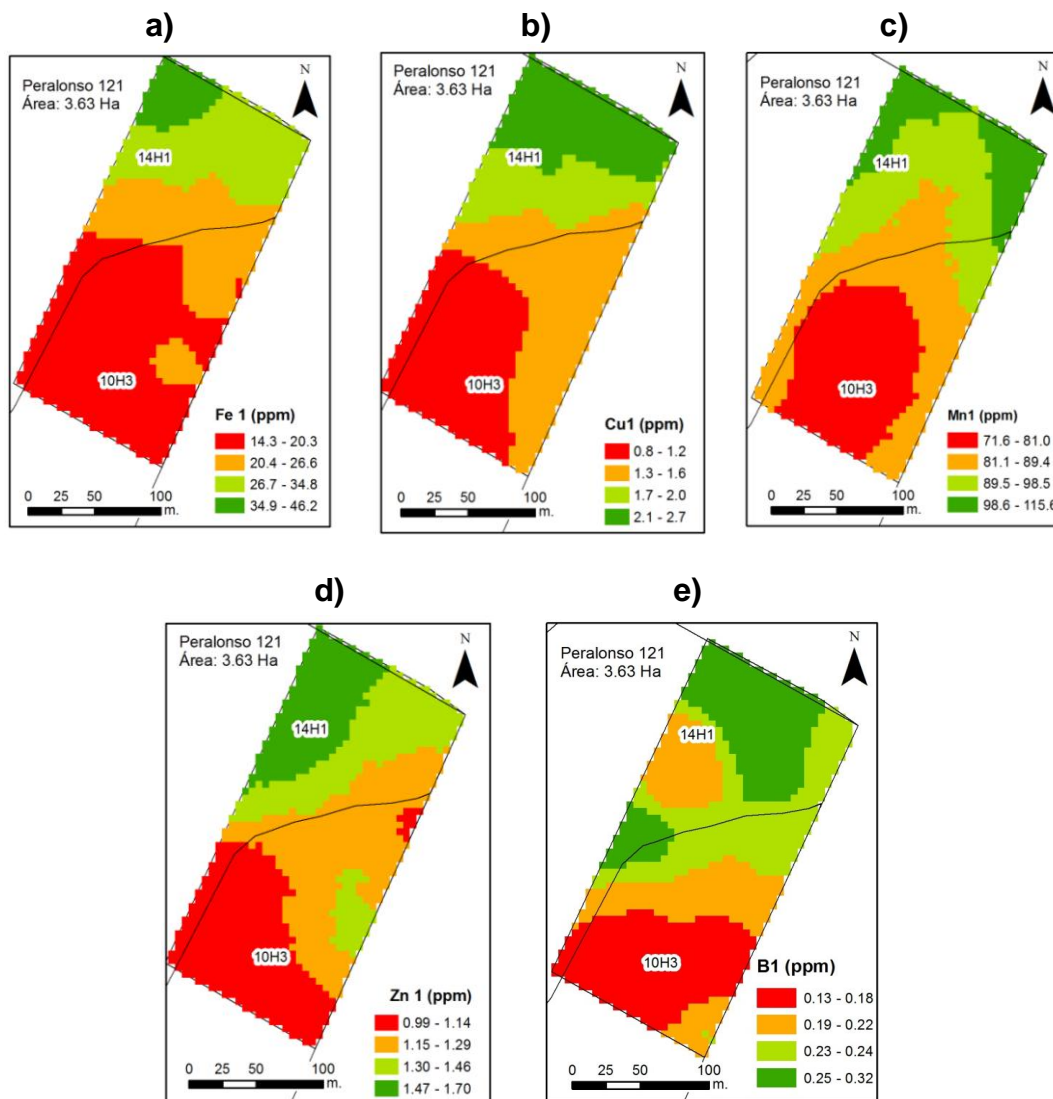


A nivel espacial, es posible apreciar que todos los suelos de esta suerte (lote) presentaron nivel alto (>40 ppm) de manganeso (figura 29c) que induce a severas deficiencias de hierro (<40 ppm) manifestada en el 93% de los suelos e indicada en la figura 29a. Además, se observó deficiencia de boro en toda el área experimental (figura 28e), deficiencia de cinc (figura 29d) y de cobre (figura 29b) en el 32 y 23% de los suelos respectivamente. Estas deficiencias se pueden



atribuir a los altos valores de pH encontrados (figura 24), en los cuales precipitan la mayoría de los micronutrientes.

**Figura 29.** Concentración de elementos menores en la hacienda Peralonso, suerte 121, tratamiento 1 (T1).

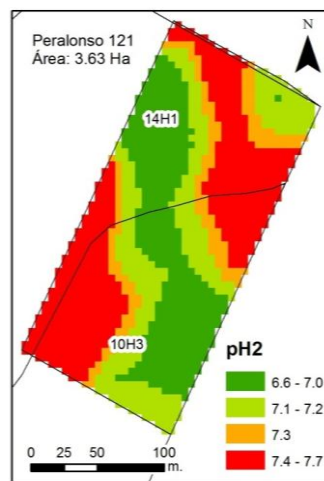


### 5.3.1.2. Análisis de los suelos de la hacienda Peralonso, suerte 121, después de la segunda fertilización (T2).

Con el propósito de comparar los valores de las diferentes variables entre los dos tratamientos, se aplicaron pruebas paramétricas como el análisis de varianza (ANOVA) para verificar si existe o no diferencia significativa.

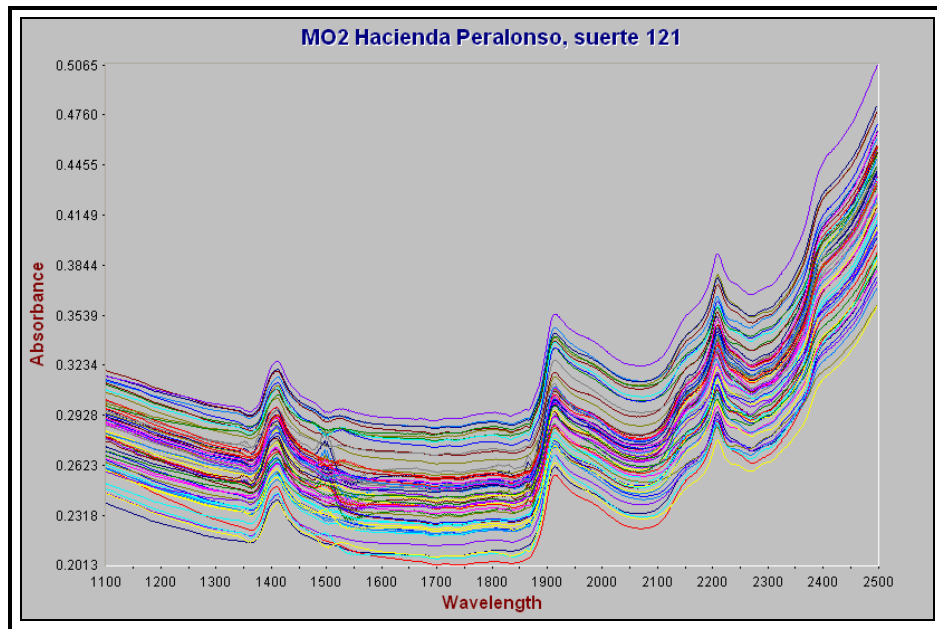
Se encontraron valores de pH (6.4-7.9) similares a los encontrados en el primer muestreo (T1), que reflejan acidez muy suave hasta alcalinidad suave (figura 30), considerando así que no hubo un cambio apreciable en el pH entre los dos tratamientos. El análisis estadístico mediante ANOVA confirma que no existe diferencia significativa ( $p= 0.8409$ ) entre los valores de pH de los tratamientos T1 y T2, mostrando que la fertilización aplicada no generó cambios en la reacción del suelo.

**Figura 30.** pH en la hacienda Peralonso, suerte 121, tratamiento 2 (T2).



La figura 31 muestra el espectro NIR de la MO perteneciente al segundo tratamiento de la hacienda Peralonso, suerte 121, en la cual se observan picos similares a los del anterior (figura 25), donde sobresale la absorción de los enlaces O-H, C-H, y N-H de los compuestos aromáticos y nitrogenados presentes en la MO del suelo. Se observa que la absorbancia de cada uno de los picos en los dos espectros no presenta cambios apreciables, lo cual sugiere la ausencia de cambios significativos en la concentración de esta variable, entre los dos tratamientos T1 y T2.

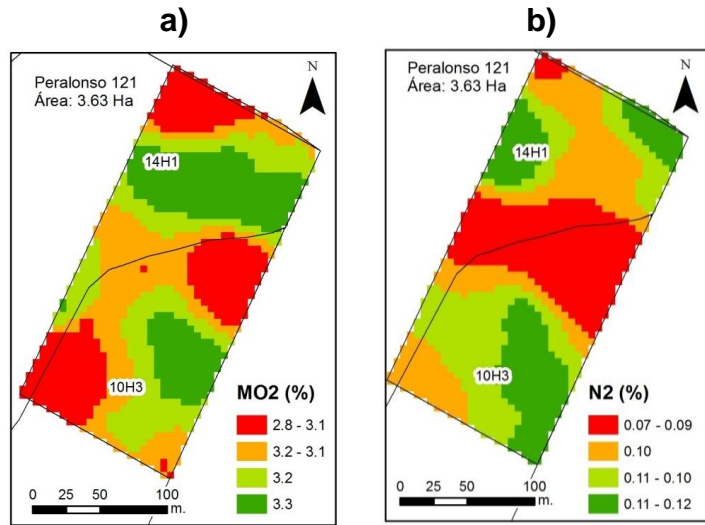
**Figura 31.** Espectro NIR de la MO en la hacienda Peralonso, suerte 121, tratamiento 2 (T2).



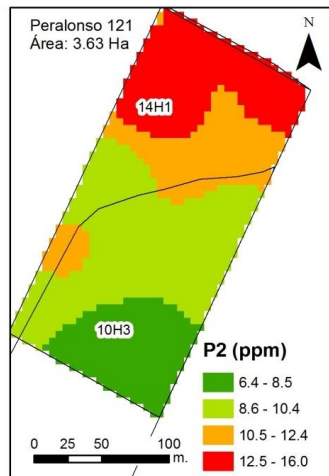
La materia orgánica (figura 32a) permanece en nivel medio con valores entre 2.58 y 3.61%; como se demuestra estadísticamente, no hay cambios significativos ( $p=0.0682$ ) en su contenido después del segundo tratamiento como era de esperarse, puesto que en períodos cortos de tiempo la MO no sufre cambios apreciables en su contenido aún en clima cálido [46, 47]. Además, se observó un incremento altamente significativo ( $p < 0.001$ ) en los porcentajes de nitrógeno para el 40% de las muestras (figura 32b), atribuido a la fertilización nitrogenada practicada en estos suelos y no a la transformación de MO.

Para el caso del fósforo, se observó, en general, una disminución altamente significativa, ( $p < 0.0001$ ), encontrando nivel medio en el 45% del área experimental y alto en el 55% restante, debido a la continua extracción de este nutriente por parte del cultivo. La figura 33 permite ver que, al igual que en el primer tratamiento (figura 26), el nivel medio de fósforo se localiza casi en la totalidad de la ZA 10H3.

**Figura 32.** MO y N en la hacienda Peralonso, suerte 121, tratamiento 2 (T2).



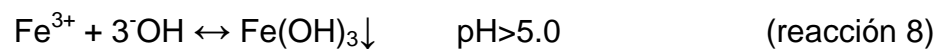
**Figura 33.** Concentración de P en la hacienda Peralonso, suerte 121, tratamiento 2 (T2).



Las concentraciones de calcio y magnesio sufrieron una disminución significativamente alta ( $p < 0.0001$ ), conservándose aún en niveles altos (figuras 34b y 34c respectivamente), sin embargo la relación Ca/Mg continúa siendo baja. El potasio (figura 34d), al igual que en el primer tratamiento, continúa variable con nivel tanto bajo como alto (0.16-0.49 meq/100g); la estadística muestra una disminución significativa de este nutriente ( $p = 0.0118$ ) debida a la absorción por parte del cultivo. Sin embargo, la relación (Ca+Mg)/K continúa en desequilibrio para la mayoría de los casos. El sodio incrementó significativamente ( $p < 0.0001$ )

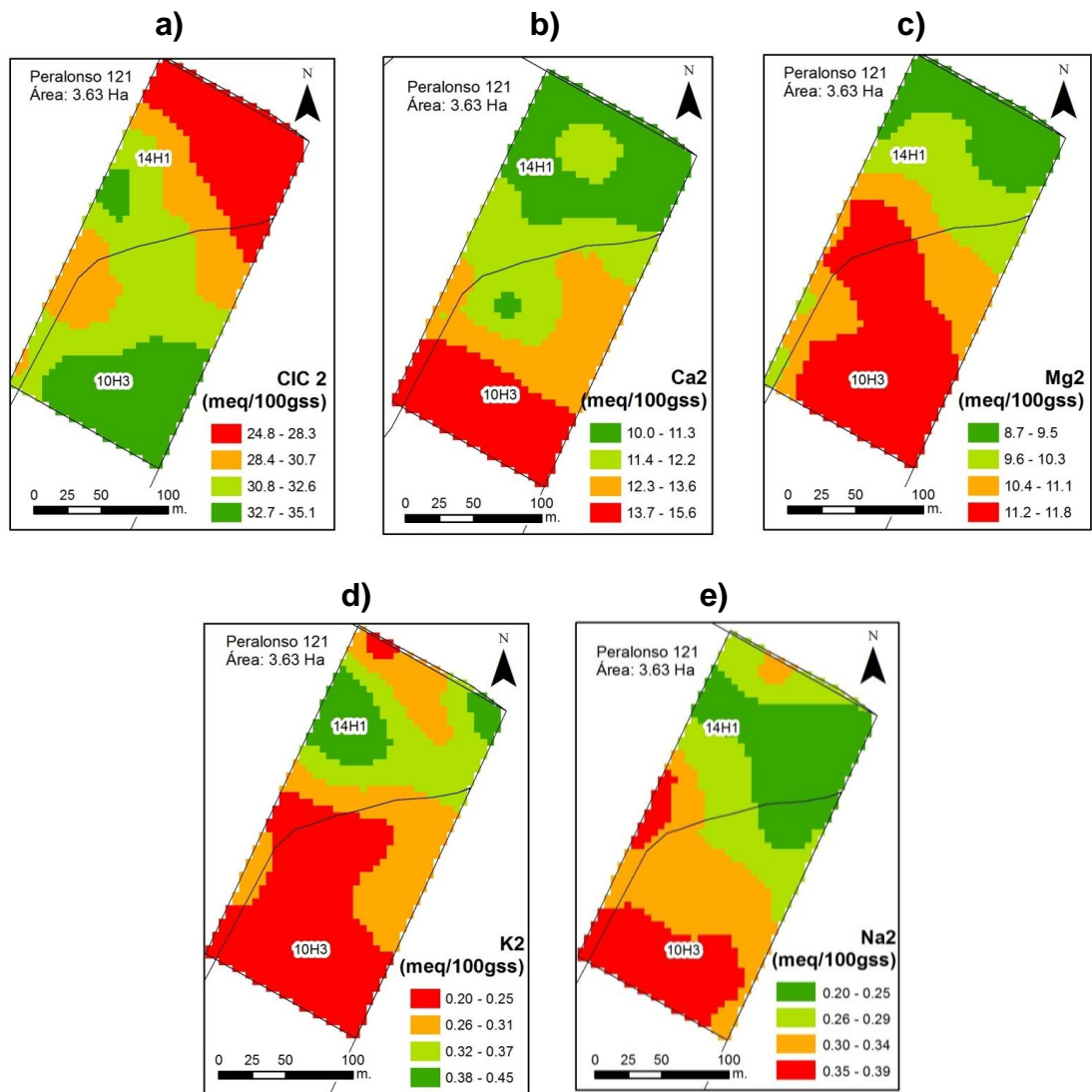
en toda la zona experimental (figura 34e) atribuible probablemente a que, por alteración en el equilibrio de la doble capa difusa, el potasio proveniente de la fertilización, se intercambia catiónicamente con el Na presente en la fase coloidal o solución interna, pasando así este último a la solución externa e incrementando su nivel. Además, es explicable también por la poca extracción de esta base por parte del cultivo. Estos cambios inducen al incremento significativo ( $p < 0.0001$ ) observado en la capacidad de intercambio catiónico, muy elevada para el 62% de los suelos, mostrada en la figura 34a. Al igual que en el T1, las concentraciones más altas de Ca y Mg, y la más baja de K, permanecen en la mayor parte de la ZA 10H3. Los mayores valores de CIC se mantienen en la misma ZA como se esperaría, pues el contenido de arcilla se mantiene constante durante el tiempo de estudio.

La concentración de hierro en todos los suelos disminuyó drásticamente y significativamente ( $p < 0.0001$ ), presentándose en nivel bajo (figura 35a) con un valor máximo de 9.16 ppm; este comportamiento se debe a la mayor respuesta que presenta la caña de azúcar en la extracción de este micronutriente (tabla 1) y al valor del pH, en el cual precipita en forma de hidróxido férrico  $\text{Fe}(\text{OH})_3$ , de acuerdo a la siguiente reacción:

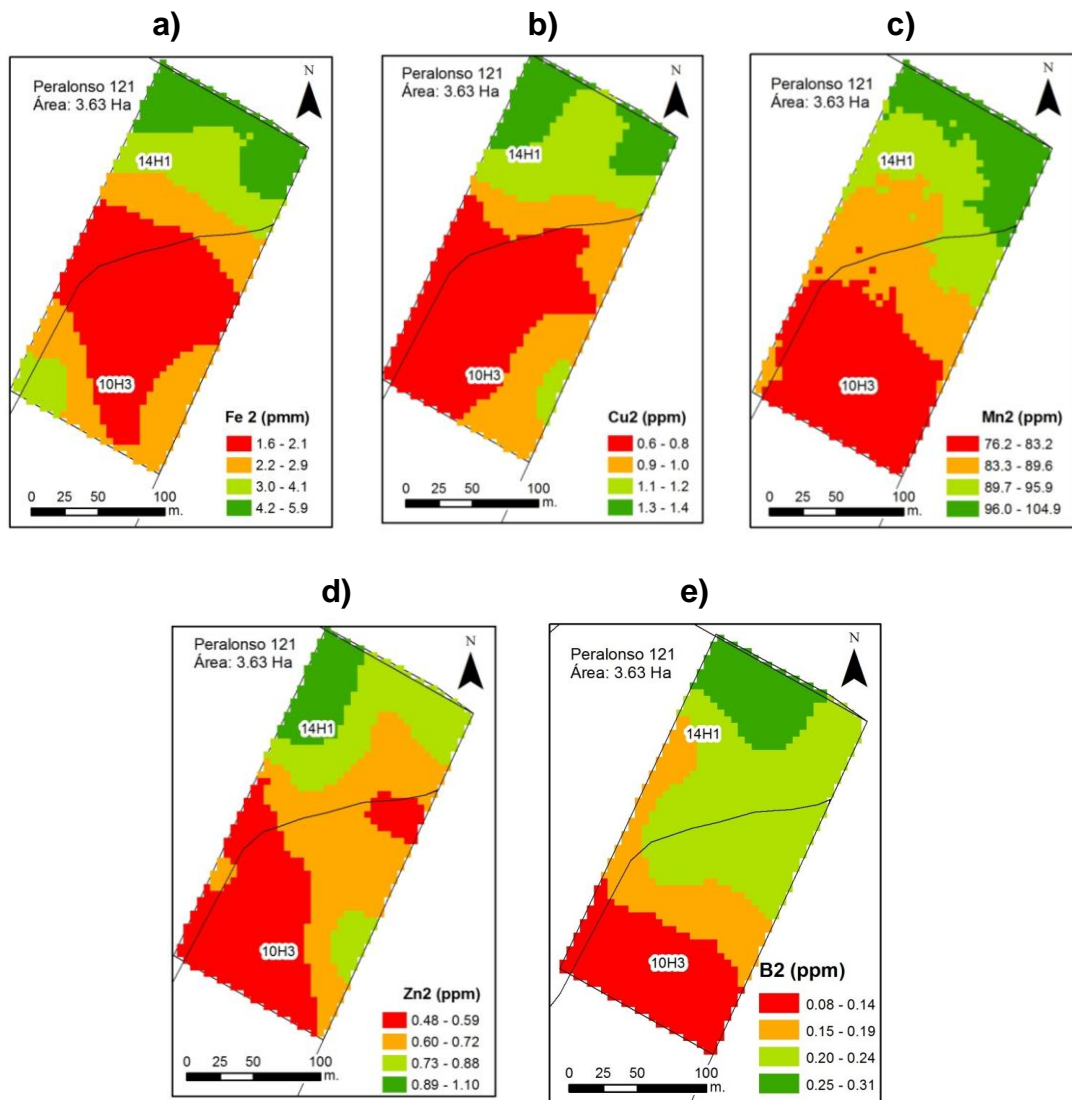


También se podría atribuir a la alta concentración de manganeso encontrada (figura 35c) que presenta un efecto antagónico con este nutriente, dicha concentración no presentó disminución significativa ( $p < 0.9033$ ). Se observó una fuerte disminución ( $p < 0.0001$ ) tanto en el nivel de cobre para el 63% de las muestras como en el nivel de cinc para el 93% de las mismas, (figuras 35b y 35d respectivamente), atribuidos a la extracción continua de dichos microelementos por parte del cultivo. La prueba estadística muestra además, que hubo una disminución significativa en los niveles de boro ( $p = 0.0012$ ), reflejando una vez más, la deficiencia de este microelemento para todos los casos, mostrada en la figura 35e.

**Figura 34.** CIC y concentración de bases intercambiables en la hacienda Peralonso, suerte 121, tratamiento 2 (T2).



**Figura 35.** Concentración de elementos menores en la hacienda Peralonso, suerte 121, tratamiento 2 (T2).



A nivel espacial se aprecia en la figura 35, que las mayores concentraciones de elementos menores se localizan hacia el norte del área en estudio, en la ZA 14H1 y a su vez, los menores valores de concentración se encuentran en la ZA 10H3, hacia el sur de la suerte.

### 5.3.2. Análisis de los suelos de la hacienda Santa Elena, suerte 80.

La tabla 10 muestra los parámetros del desarrollo del cultivo de caña de la variedad CC 85-92, sembrada en la hacienda Santa Elena suerte 80.

**Tabla 10.** Parámetros del desarrollo del cultivo de caña de la variedad CC 85-92, sembrada en la hacienda Santa Elena, suerte 80.

Variedad de Caña Sembrada	Calidad	Fertilizantes Aplicados	
		Tratamiento 1 (T1)	Tratamiento 2 (T2)
CC85-92	Semilla libre de enfermedades RDS y escaldadura (Laboratorio de CENICAÑA)	Al inicio del cultivo: ✓ 100 KgDAP/ha	A los 60 días después de la siembra: ✓ Urea: 300 Kg/ha ✓ KCl: 100 Kg/ha

#### 5.3.2.1. Análisis de los suelos de la hacienda Santa Elena, suerte 80, al inicio del cultivo (T1).

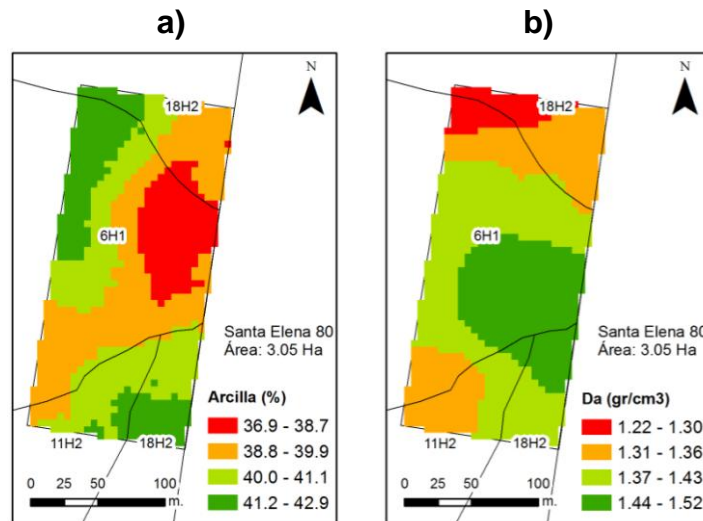
El 60% de la suerte presentó suelos con textura arcillosa y el 40% textura franco-arcillosa, características de los suelos pertenecientes a las ZA de la suerte (tabla 6); con porcentajes de arcilla entre 29 y 48% se pueden presentar, en general, encharcamientos por la baja permeabilidad de los suelos y por la baja pendiente (0.3%) que presenta la suerte (lote). En la figura 36a, se muestra la distribución espacial de los porcentajes de arcilla encontrados, donde los menores porcentajes se localizan, en su mayoría, en la ZA 6H1.

La densidad aparente presentó un promedio de  $1.40\text{g/cm}^3$ , valor que supera ligeramente el rango establecido como medio para este tipo de suelos <sup>[21]</sup>, manifestando la posible compactación de los mismos por causa de su manejo. La figura 36b indica que los mayores valores de Da se encuentran en la mayor parte de la ZA 6H1.

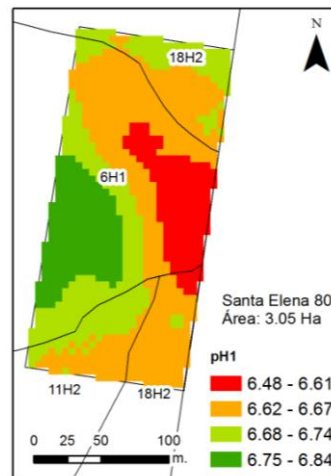
El pH relacionado en la figura 37, con valores comprendidos entre 6.4 y 7.0, refleja una acidez media hasta acidez muy suave, siendo óptimo para la disponibilidad de la mayoría de los nutrientes y procesos biológicos del suelo.



**Figura 36.** Porcentajes de arcilla y Densidad aparente, presentes en la hacienda Santa Elena, suerte 80.

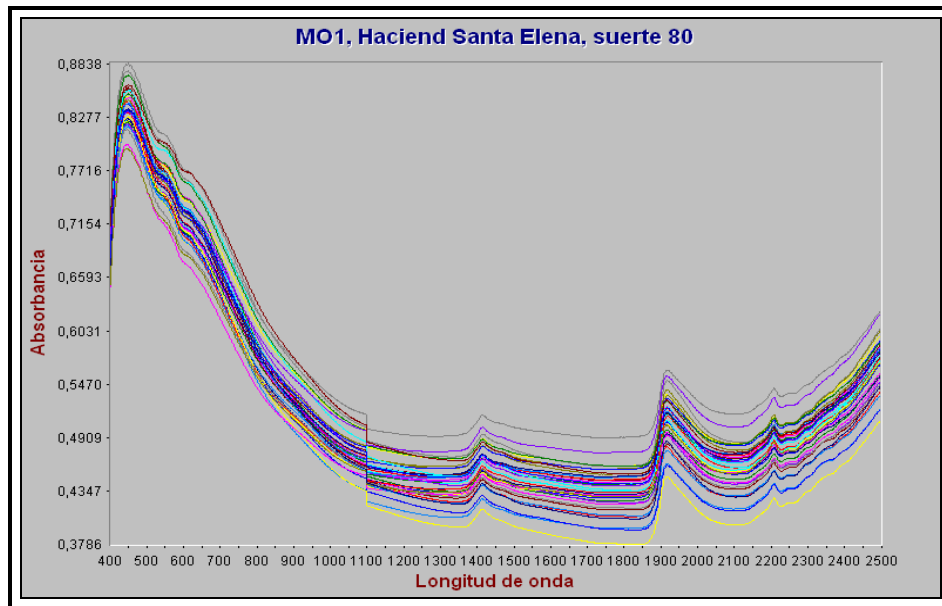


**Figura 37.** pH en la hacienda Santa Elena, suerte 80, tratamiento 1 (T1).



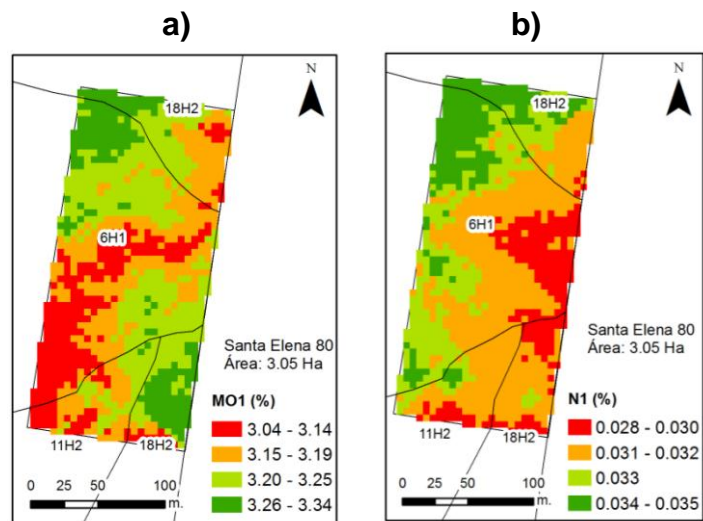
La figura 38 muestra el espectro NIR correspondiente a la MO1 de los suelos de esta suerte, donde se aprecia gran similitud con los espectros pertenecientes a la hacienda Peralonso, suerte 121 (figuras 25 y 31); la señal más sobresaliente es el pico ubicado cerca a 1900 nm, y las señales menos pronunciadas son los picos en 1400 nm y 2200 nm aproximadamente, generado por los enlaces de los compuestos aromáticos y nitrogenados de la MO del suelo.

**Figura 38.** Espectro NIR de la MO en la hacienda Santa Elena, suerte 80, tratamiento 1 (T1).



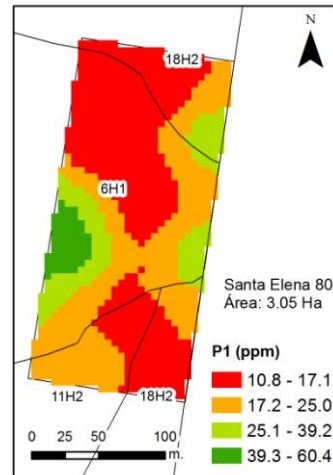
El porcentaje de materia orgánica (figura 39a) se encontró en un nivel medio para todos los suelos, con valores entre 2.50 y 3.90%, encontrándose una distribución homogénea en toda la suerte. El porcentaje de nitrógeno (figura 39b) se manifestó deficiente en toda el área experimental con valor máximo de 0.044%, el cual refleja la poca mineralización de la MO demostrada por las altas relaciones C/N.

**Figura 39.** MO y N en la hacienda Santa Elena, suerte 80, tratamiento 1 (T1).



El 18% del área estudiada presentó nivel medio de fósforo mientras que el 82% restante superó dicho nivel (>10 ppm) tal como se aprecia en la figura 40, debido a la elevada fertilización fosfatada realizada un mes y medio antes del muestreo.

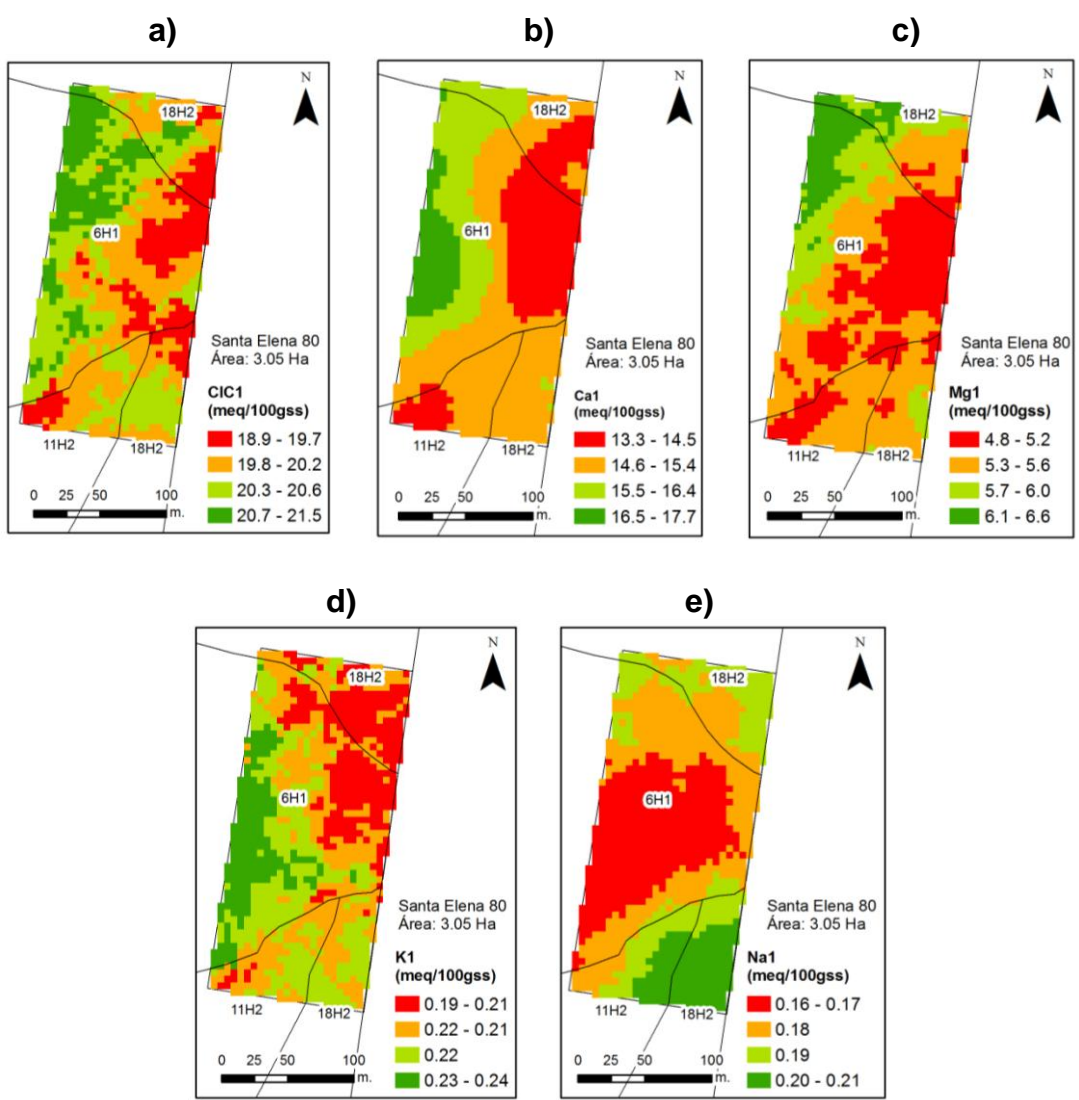
**Figura 40.** Concentración de P en la hacienda Santa Elena, suerte 80, tratamiento 1 (T1).



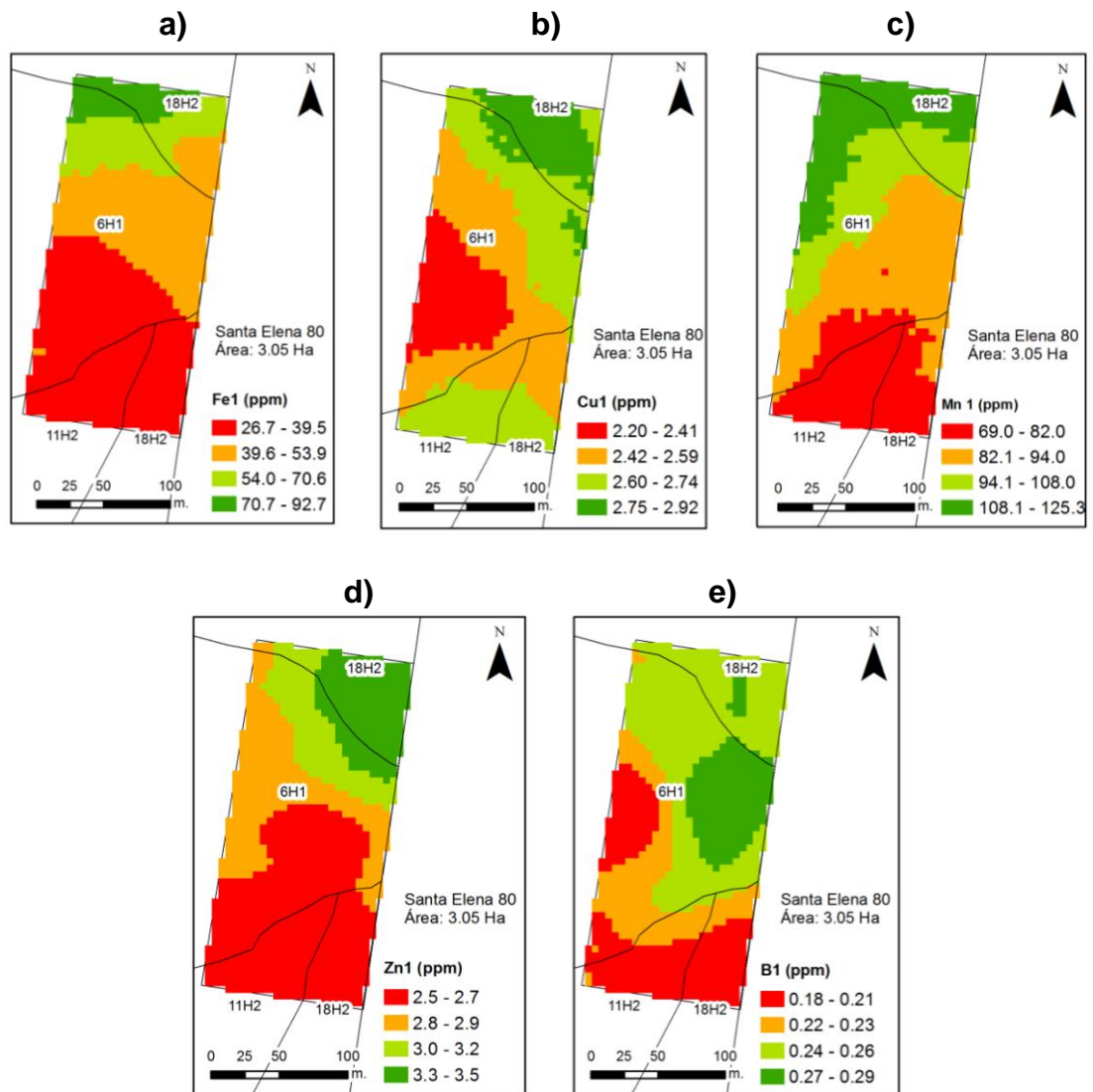
El 42% de los suelos presentaron una CIC normal y el 58% CIC elevada, reflejada en la figura 41a. Como se observa en las figuras 41b y 41c, tanto el nivel de calcio (10.73-21.69 meq/100g) como el de magnesio (3.31-9.96 meq/100g) son altos, obteniendo una relación Ca/Mg apropiada. El potasio (figura 41d) se encuentra desde nivel bajo (0.15 meq/100g) hasta nivel medio (0.38 meq/100g) atribuido a las arcillas presentes en este suelo. La relación (Ca+Mg)/K está en desequilibrio para la mayoría de los casos e indica el predominio de calcio y/o magnesio, impidiendo de esta manera, la normal absorción de potasio. El sodio, a pesar de encontrarse en nivel alto (>0.10 meq/100g) para todos los suelos (figura 41e), no supone problemas de salinidad pues la reacción del suelo es adecuada.

Para estos suelos, tanto el cinc (2-4 ppm) como el manganeso (50-196 ppm) se encontraron en niveles altos (figuras 42c y 42d), posiblemente por el origen de estos suelos (tabla 2) o por fertilizaciones anteriores al tiempo de este estudio. Estas altas concentraciones afectan el nivel de hierro donde el 56% de los suelos mostró déficit (<40 ppm) de este micronutriente, indicado en la figura 42a. El cobre (figura 42b) se encontró en nivel medio (1-3 ppm). En la figura 42e se observa que el boro, al igual que en la suerte 121 de Peralonso, se encuentra en deficiencia para todos los casos con un valor máximo de 0.34 ppm, atribuible a los valores de pH encontrados.

**Figura 41.** CIC y concentración de bases intercambiables en la hacienda Santa Elena, suerte 80, tratamiento 1 (T1).



**Figura 42.** Concentración de elementos menores en la hacienda Santa Elena, suerte 80, tratamiento 1 (T1).



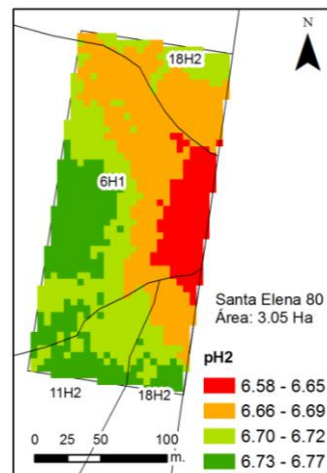
Se observa que las concentraciones más bajas de los micronutrientes, con excepción del Cu, se encuentran en el sur del área estudiada, abarcando las tres ZA pertenecientes a esta suerte (lote).

### 5.3.2.2. Análisis de los suelos de la hacienda Santa Elena, suerte 80, después de la segunda fertilización (T2).

Con el propósito de comparar los valores de las diferentes variables entre los dos tratamientos, se aplicaron pruebas paramétricas como el análisis de varianza (ANOVA) para verificar si existe o no diferencia significativa.

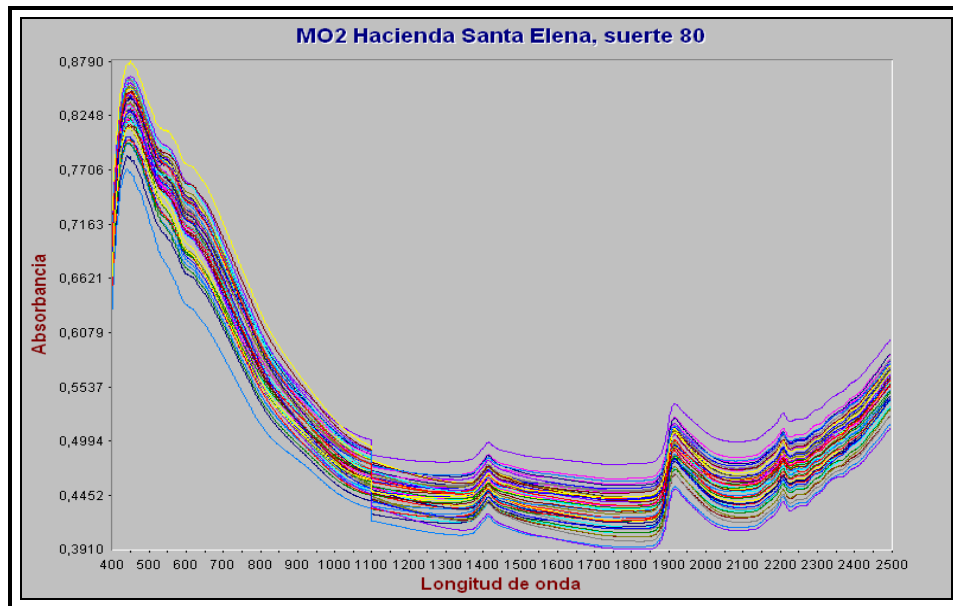
Los valores de pH encontrados (6.3-7.0) mostrados en la figura 43, se asemejan a los encontrados en el primer tratamiento T1 y no muestran un cambio significativo ( $p = 0.5812$ ) entre T1 y T2. Dichos valores muestran una acidez suave a muy suave, óptima para el desarrollo del cultivo de la caña de azúcar, apreciando una vez más que la fertilización aplicada no generó cambios en la reacción del suelo.

**Figura 43.** pH en la hacienda Santa Elena, suerte 80, tratamiento 2 (T2).



En la figura 44 se presenta el espectro NIR de la MO correspondiente a los suelos de la suerte 80 de Santa Elena, en el T2. En él se observan señales sobresalientes en las mismas regiones que para el espectro NIR de la MO1 (figura 38). La leve diferencia está en los valores de absorbancia, que son un tanto menores a los de MO1, demostrando cambios en el contenido de esta variable en el T2.

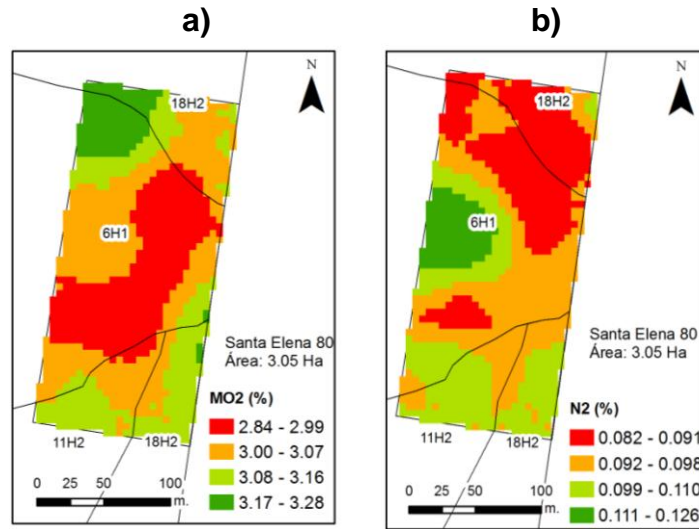
**Figura 44.** Espectro NIR de la MO en la hacienda Santa Elena, suerte 80, tratamiento 2 (T2).



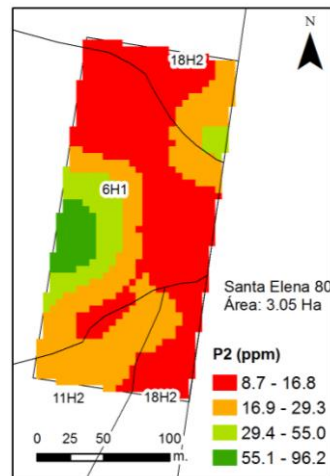
Si bien se presentó una disminución significativa de la materia orgánica entre T1 y T2 ( $p=0.0048$ ), ésta permanece en un nivel medio (figura 45a) con valores entre 2.45 y 3.49%; a su vez, el nitrógeno total del 52% de los suelos (figura 45b), alcanzó un nivel medio por la fertilización nitrogenada realizada a los 60 días antes del respectivo muestreo, incremento significativo ( $p<0.0001$ ). Sin embargo, el 48% de los suelos mostraron déficit de este macronutriente, atribuido a la continua extracción de este elemento por parte de la caña o posiblemente por la falta de homogenización en la dosis de fertilizante aplicado

No se observa diferencia significativa ( $p=0.4070$ ) en el nivel de fósforo mostrado en la figura 46, revelando que el cultivo en esta etapa ya no lo requiere en grandes cantidades. El leve incremento observado se podría atribuir a la mineralización de compuestos fosfatados presentes en la materia orgánica, demostrada por su significativa disminución.

**Figura 45.** MO y N en la hacienda Santa Elena, suerte 80, tratamiento 2 (T2).



**Figura 46.** Concentración de P en la hacienda Santa Elena, suerte 80, tratamiento 2 (T2).

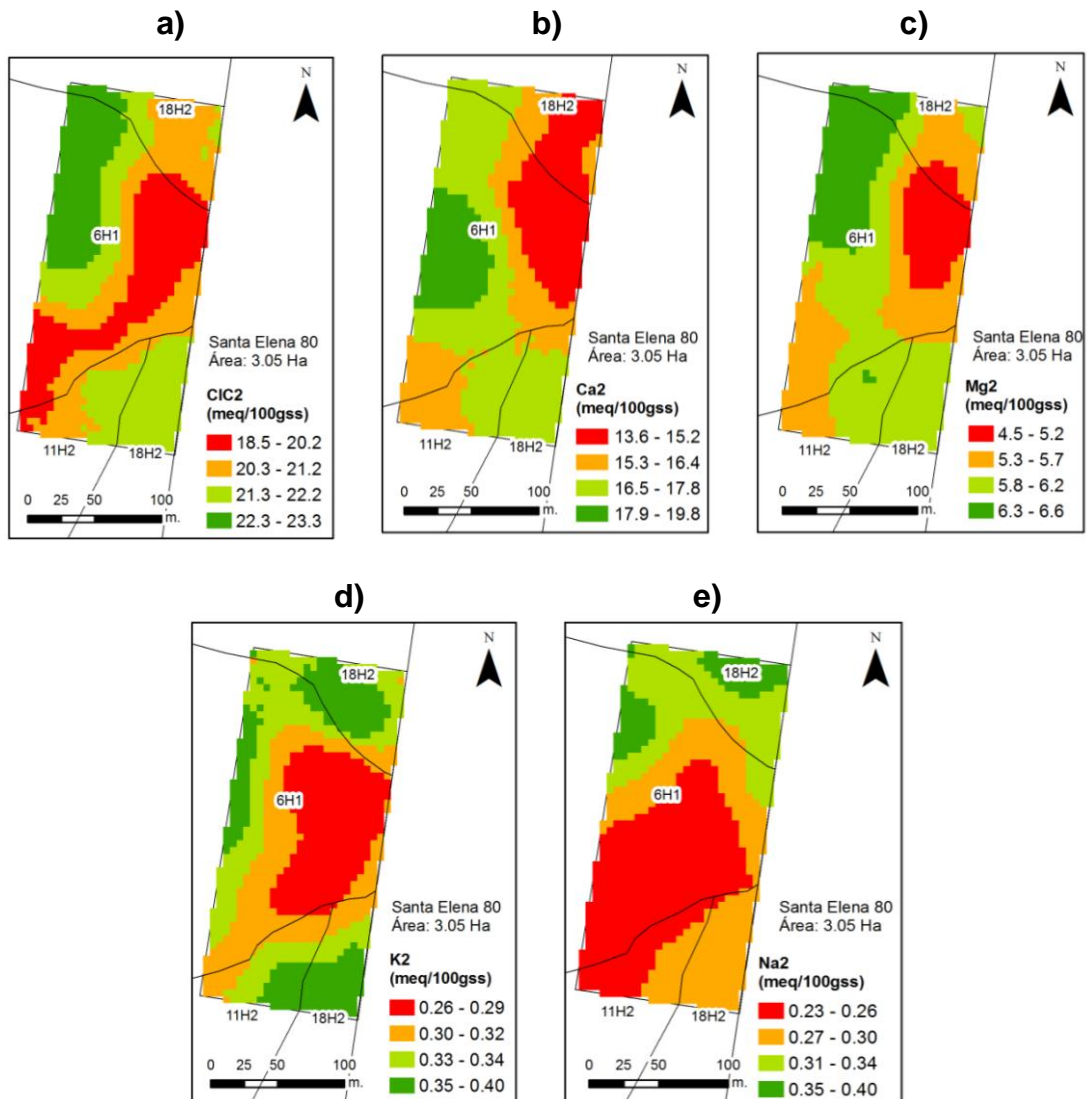


Se encontró una CIC muy elevada para el 72% de los suelos, señalada en la figura 47a, evidenciando un aumento significativo ( $p < 0.0406$ ) de esta variable comparada con T1. El nivel de calcio y de sodio aumentó significativamente ( $p < 0.0001$ ), mientras que el incremento de magnesio no fue significativo, manteniéndose estos tres en niveles altos (figuras 47b, 47e y 47c respectivamente). También se observó incremento significativo ( $p < 0.0001$ ) en el nivel de K, en rangos medio y alto (figura 47d), debido a la fertilización con KCl. La relación Ca/Mg continuó siendo adecuada, se logró disminuir la relación



(Ca+Mg)/K pero aún permanece alta. El significativo incremento en el nivel de sodio ( $p < 0.0001$ ) podría explicar el aumento de la CIC de los suelos.

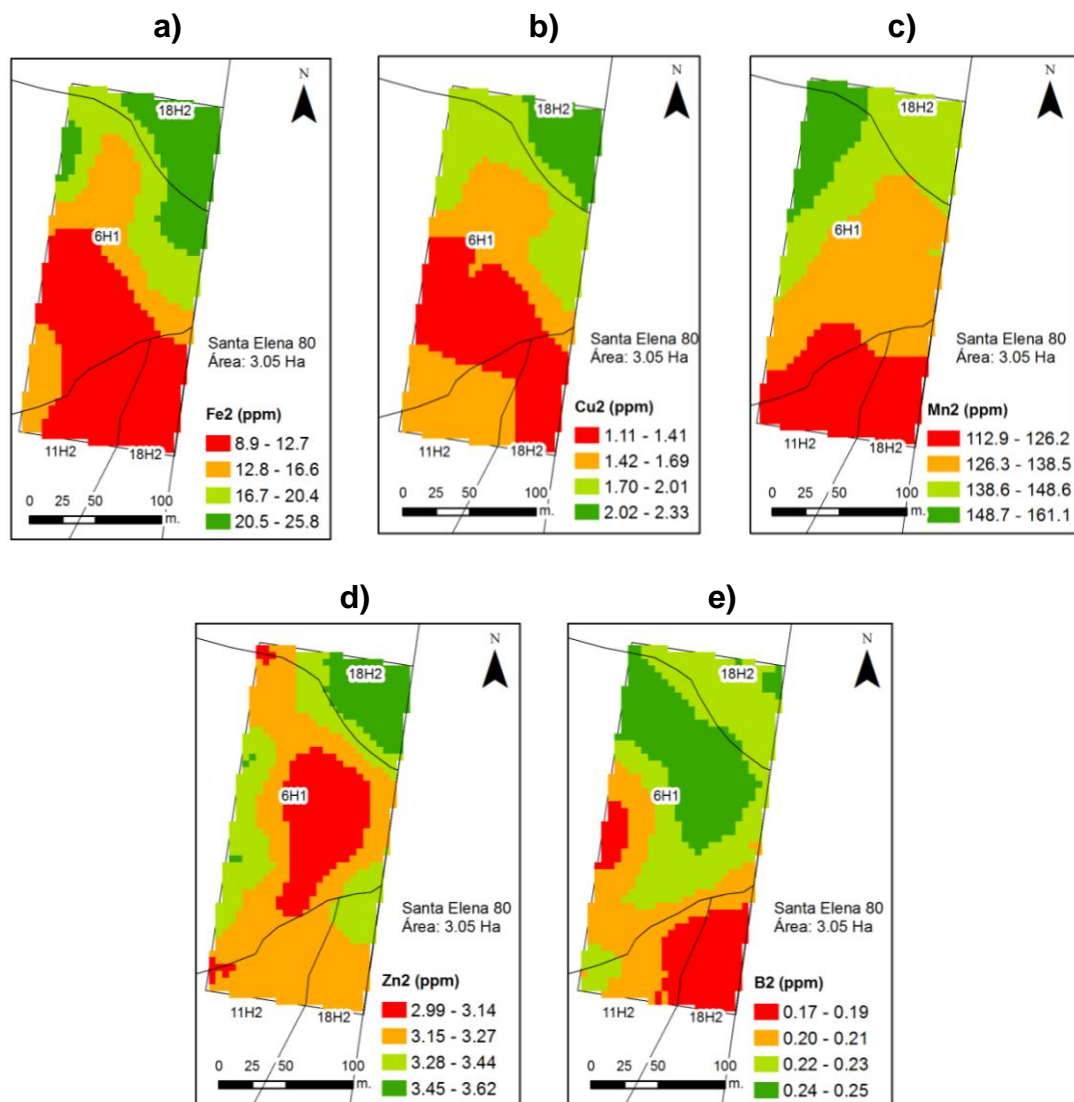
**Figura 47.** CIC y concentración de bases intercambiables en la hacienda Santa Elena, suerte 80, tratamiento 2 (T2).



De manera general se aprecia que, los menores valores de CIC y de bases intercambiables se localizan mayoritariamente en la ZA 6H1.

Similar a lo ocurrido en la suerte (lote) 121 de Peralonso, el nivel de hierro disminuyó drásticamente y significativamente ( $p < 0.0001$ ) hasta nivel bajo (figura 48a). Disminuciones significativas se observaron también para el Cu ( $p < 0.0001$ ) y el B ( $p = 0.0061$ ), no obstante, el primero permanece en nivel medio (figura 48b) y el segundo continúa siendo deficiente (figura 48e) en un rango comprendido entre 0.12 ppm y 0.32 ppm. Se aprecian incrementos significativos ( $p < 0.0001$ ) en los niveles de Mn y Zn (figuras 48c y 48d respectivamente) atribuibles probablemente al antagonismo existente con el hierro.

**Figura 48.** Concentración de elementos menores en la hacienda Santa Elena, suerte 80, tratamiento 2 (T2).



En forma general, las menores concentraciones de microelementos tienden al sur del área experimental, encontrándose gran parte de ellas en la ZA 6H1.

### 5.3.3. Análisis de los suelos de la hacienda San Rafael, suerte 261.

Esta suerte (lote) está sembrada con la variedad de caña CC 93-2804, a la cual se aplicó un programa de fertilización diferente, ya que no se utilizó fertilización fosfatada al inicio del cultivo, además el tratamiento 2 fue diferente a las anteriores suertes. La tabla 11 muestra los parámetros del desarrollo del cultivo de caña de la variedad CC 93-2804 en la hacienda San Rafael, suerte 261.

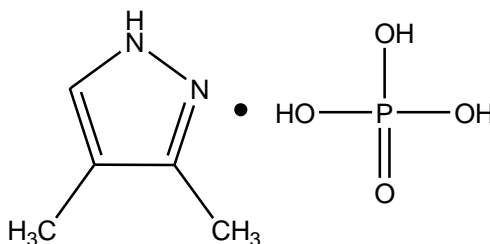
**Tabla 11.** Parámetros del desarrollo del cultivo de caña de la variedad CC 93-2804, sembrada en la hacienda San Rafael, suerte 261.

Variedad de Caña Sembrada	Calidad	Fertilizantes Aplicados	
		Tratamiento 1 (T1)	Tratamiento 2 (T2)
CC 93-2804	Semilla libre de enfermedades RDS y escaldadura (Laboratorio de CENICAÑA)	Al inicio del cultivo:  ✓ No hubo aplicación de fertilizantes	A los 60 días después de la siembra:  ✓ Urea: 300 Kg/ha + 40% Urea ENTEC® ✓ KCl: 100 Kg/ha + mejimenes* (50 Kg/Ha)

\* Mejimenes: mezcla de elementos menores Fe, Cu, Mn, Zn, B y Mo.

La Urea ENTEC® es un fertilizante nitrogenado tratado con aditivo DMMP (3,4-dimetilpirazol fosfato) para inhibir el proceso de nitrificación. La figura 49 muestra la estructura química del DMMP.

**Figura 49.** Estructura química del 3,4-dimetilpirazol fosfato.

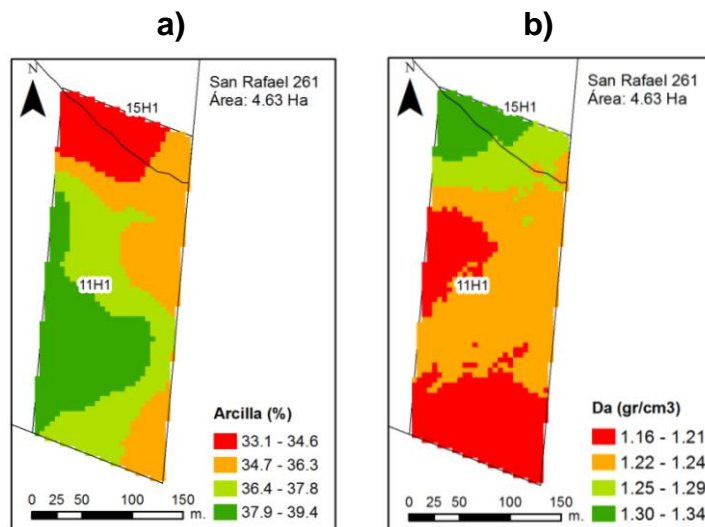


### 5.3.3.1. Análisis de los suelos de la hacienda San Rafael, suerte 261, al inicio del cultivo (T1).

Aproximadamente el 70% del área en estudio de esta suerte presentó una textura franco arcillo-limosa y el 30% restante textura franco-arcillosa, las cuales se corresponden con los grupos homogéneos de suelos característicos de esta suerte (tabla 2); para este caso el predominio de limos, cuyo tamaño está entre 0.05–0.002mm, confieren a este suelo cierta plasticidad. Además presenta propiedades adsorbentes debido a las arcillas (31.82–41.02%) y materia orgánica (2.57–3.84%). La figura 50a muestra la distribución espacial del contenido de arcillas.

La densidad aparente relacionada en la figura 50b, tiene un valor promedio de  $1.23\text{g/cm}^3$  comprendido en el rango establecido como medio para este tipo de suelos <sup>[21]</sup>; se puede decir entonces que no se presenta compactación de los suelos a pesar de los altos porcentajes de arcilla encontrados.

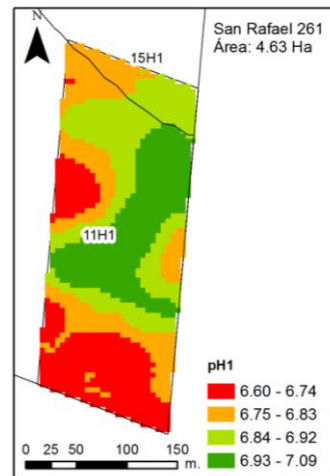
**Figura 50.** Porcentajes de arcilla y Densidad aparente, presentes en la hacienda San Rafael, suerte 261.



Se aprecia espacialmente que, los valores más bajos de Da se localizan en la ZA 11H1, y es en esta misma ZA donde se encuentran los mayores porcentajes de arcilla, como se esperaba dada la relación inversa entre estas dos propiedades físicas del suelo.

El pH mostrado en la figura 51, varía entre 6.4 y 7.5 indicando que hay una acidez suave hasta alcalinidad suave con valores óptimos para el desarrollo del cultivo.

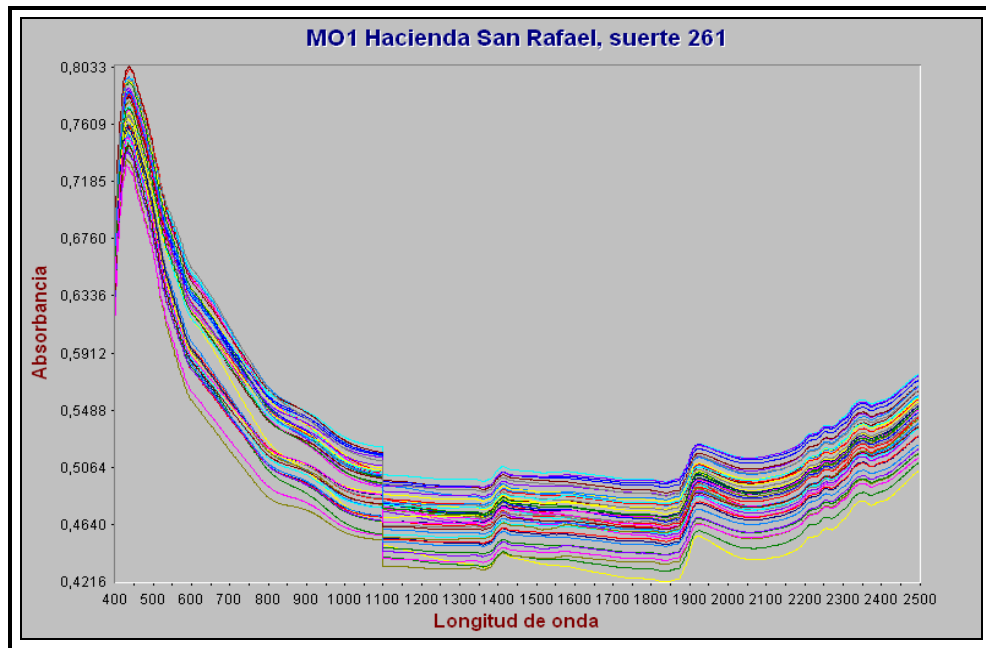
**Figura 51.** pH en la hacienda San Rafael, suerte 261, tratamiento 1 (T1).



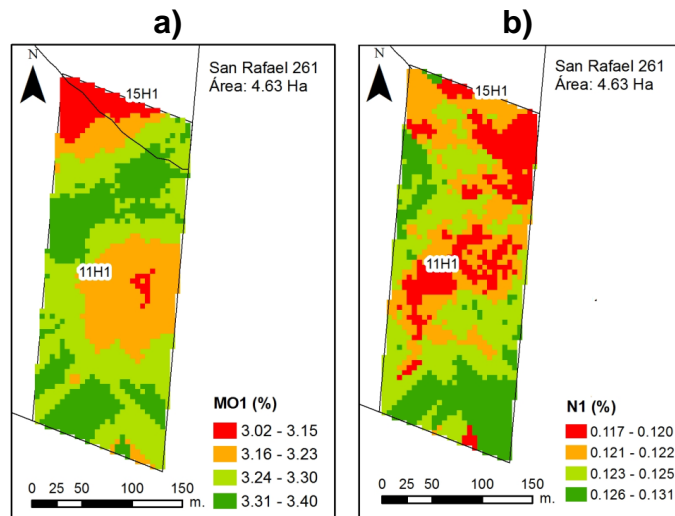
La figura 52 muestra el espectro NIR de la MO1 de la suerte 261 de San Rafael. El espectro es similar a los presentados anteriormente, exhibiendo picos sobresalientes a las mismas longitudes de onda correspondientes al primer sobretono y a la combinación de bandas. Se alcanzan a observar picos débiles cercanos a 2350 nm, correspondientes a los enlaces C-H de las cadenas alifáticas de los compuestos presentes en la MO.

Aún cuando la MO está en nivel medio para todos los casos tal como se muestra en la figura 53a, las relaciones C/N muestran un predominio de inmovilización sobre mineralización. El 95% del área en estudio presentó un nivel medio en el contenido de nitrógeno (figura 53b), mas no se puede asegurar si está totalmente disponible para las plantas ya que puede estar en forma orgánica y se requiere de un adecuado proceso de mineralización para aumentar la disponibilidad.

**Figura 52.** Espectro NIR de la MO en la hacienda San Rafael, suerte 261, tratamiento 1 (T1).

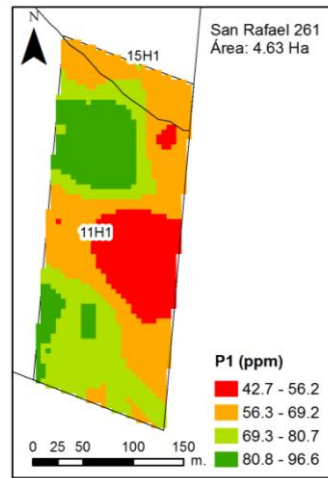


**Figura 53.** MO y N en la hacienda San Rafael, suerte 261, tratamiento 1 (T1).



Sin haber sido fertilizados con fósforo, los suelos de esta suerte (lote) presentan nivel alto de este nutriente, encontrando una alta variabilidad con valores que oscilan desde 25.37 ppm hasta 123.07 ppm, probablemente por la solubilización de los fosfatos de calcio presentes con la solución extractante (figura 54).

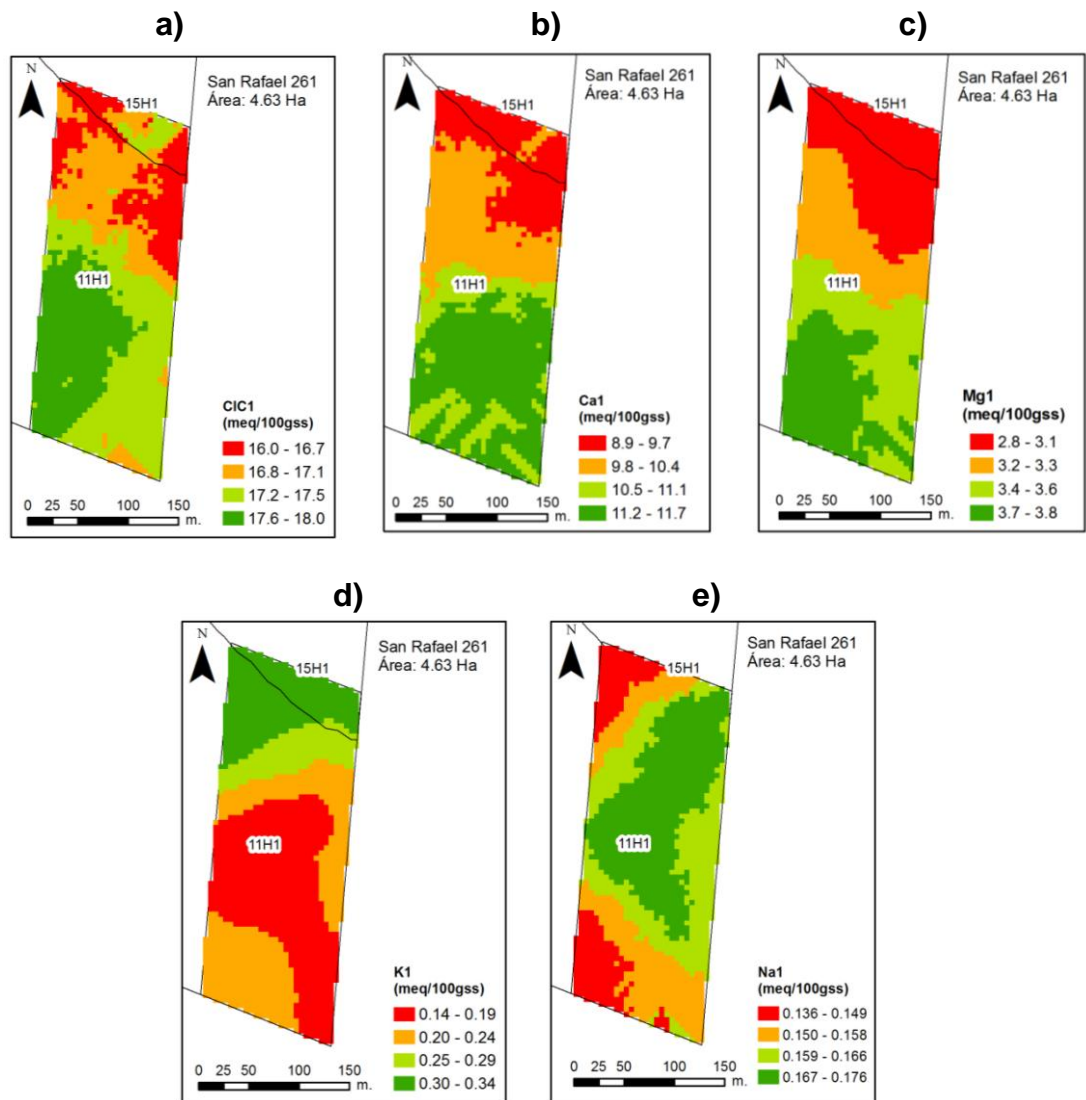
**Figura 54.** Concentración de P en la hacienda San Rafael, suerte 261, tratamiento 1 (T1).



En la figura 55a se observa que todos los suelos presentaron una CIC normal (10-20 meq/100gsuelo) predominando en la ZA 11H1. En general, la concentración de calcio (figura 55b) se presentó en nivel alto (6-16 meq/100g) mientras que la de magnesio (figura 55c) varió de nivel medio a alto (1.96-4.92 meq/100g) localizándose, en la ZA 11H1, los valores más altos de estas bases y encontrándose una relación Ca/Mg adecuada. El 55% de los suelos tienen nivel medio de potasio y el 45% nivel bajo (figura 55d), el cual se ubica en gran parte de la ZA 11H1; en este caso, la relación (Ca+Mg)/K sugiere el predominio de calcio y/o magnesio imposibilitando la normal absorción de potasio. El sodio se presentó en nivel alto como lo muestra la figura 55e, suponiendo posibles problemas de salinidad por exceso de esta base.

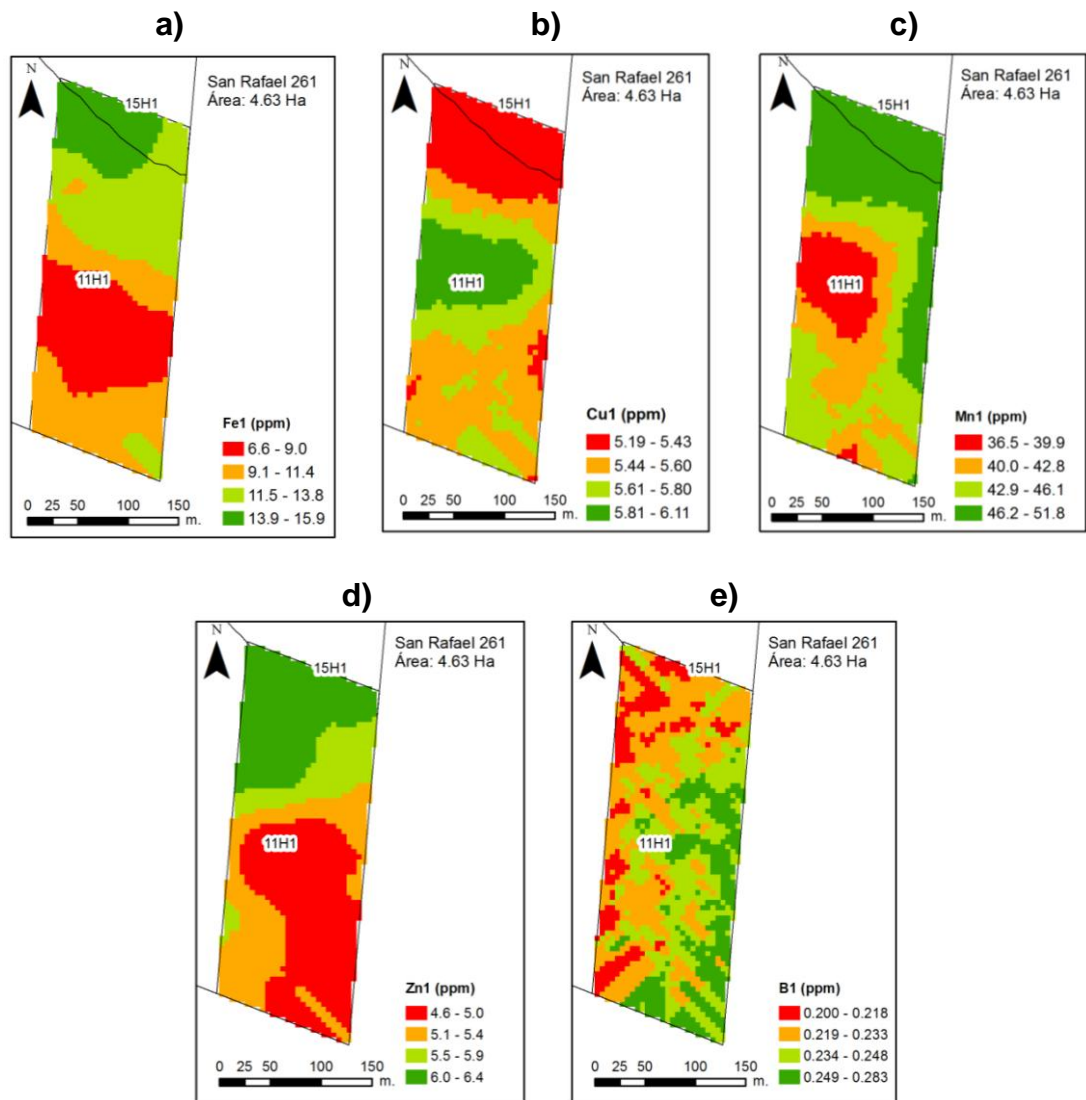
La concentración de hierro, relacionada en la figura 56a, se encontró por debajo del nivel crítico para el 100% de los suelos analizados, reflejando una fuerte deficiencia de este nutriente. A diferencia del hierro, el manganeso se encontró en nivel alto en el 62% de los suelos (figura 56c), en tanto que el cobre y el zinc se encontraron en exceso para toda el área estudiada como se muestra en las figuras 56b y 56d respectivamente, siendo posible un residuo de fertilizaciones anteriores con este tipo de micronutrientes. Se detectó deficiencia de boro y tan solo un pequeño porcentaje equivalente al 7% del área experimental, presentó nivel medio de este elemento (figura 56e).

**Figura 55.** CIC y concentración de bases intercambiables en la hacienda San Rafael, suerte 261, tratamiento 1 (T1).





**Figura 56.** Concentración de elementos menores en la hacienda San Rafael, suerte 261, tratamiento 1 (T1).

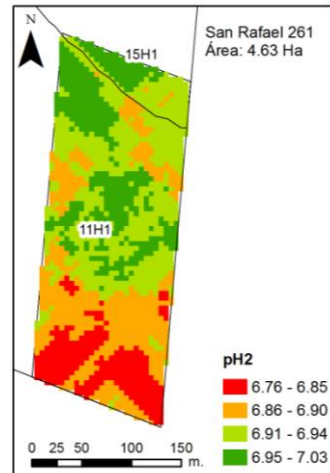


### 5.3.3.2. Análisis de los suelos de la hacienda San Rafael, suerte 261, después de la fertilización (T2).

Con el propósito de comparar los valores de las diferentes variables entre los dos tratamientos, se aplicaron pruebas paramétricas como el análisis de varianza (ANOVA) para verificar si existe o no diferencia significativa.

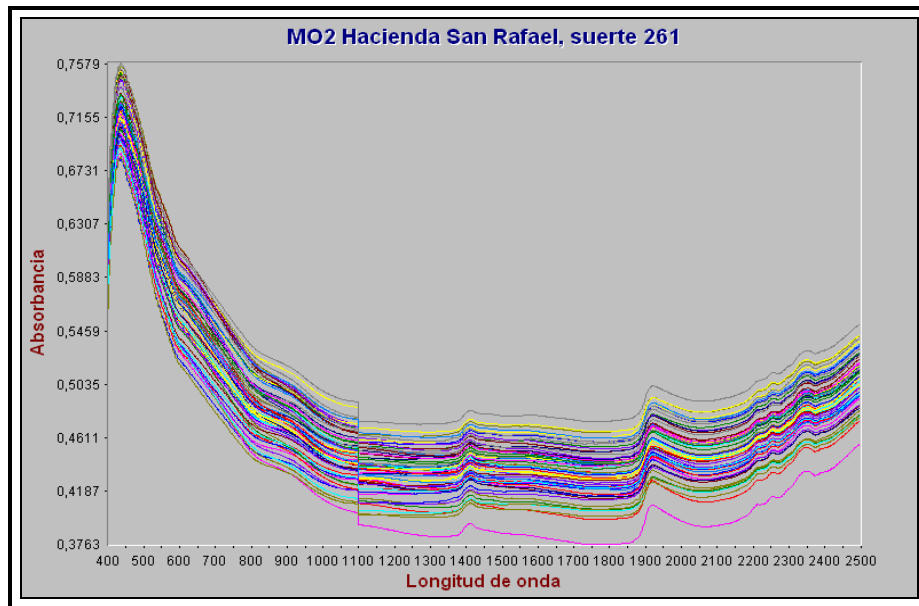
Los valores de pH encontrados (6.4-7.6) mostrados en la figura 57, son similares a los hallados en el primer tratamiento T1, considerando así que no hubo un cambio significativo en el pH ( $p=0.1094$ ) después de la fertilización practicada y que la reacción del suelo sigue siendo óptima para el cultivo.

**Figura 57.** pH en la hacienda San Rafael, suerte 261, tratamiento 2 (T2).

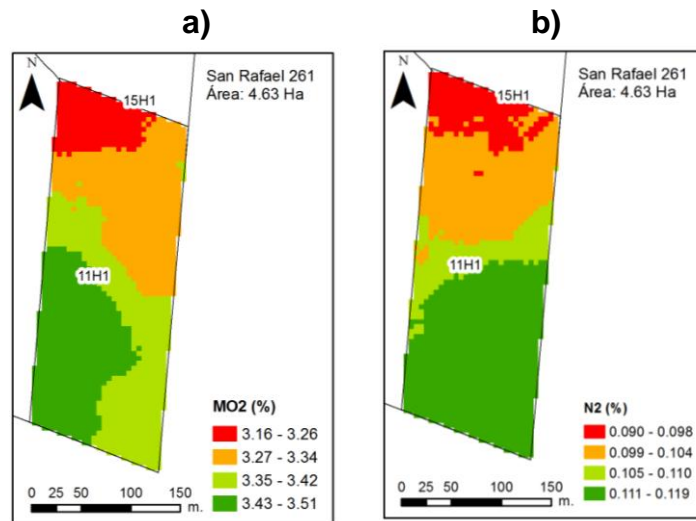


En el espectro NIR de la figura 58, se aprecian, al igual que en los casos anteriores, los picos ubicados en las mismas longitudes de onda como era de esperarse. No se observan cambios apreciables en la intensidad de la mayoría de los picos, indicando que no existen cambios en el contenido de MO, sin embargo, la prueba de ANOVA demuestra un aumento significativo en el nivel de materia orgánica ( $p=0.0012$ ), pasando para el conjunto de los datos de un valor medio de 3.25 a 3.36, pero ésta continúa en nivel medio tal como se muestra en la figura 59a. Se muestra una disminución altamente significativa ( $p<0.0001$ ) en el nivel de nitrógeno, dada la constante extracción de este nutriente por parte del cultivo, seguida de la baja mineralización de la MO reflejada en las altas relaciones C/N; sin embargo, el 68% de la suerte (lote) conservó nivel medio de nitrógeno (figura 59b), proporcionado por la fertilización nitrogenada realizada.

**Figura 58.** Espectro NIR de la MO en la hacienda San Rafael, suerte 261, tratamiento 2 (T2).

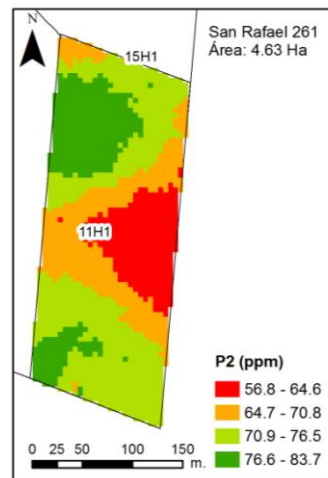


**Figura 59.** MO y N en la hacienda San Rafael, suerte 261, tratamiento 2 (T2).



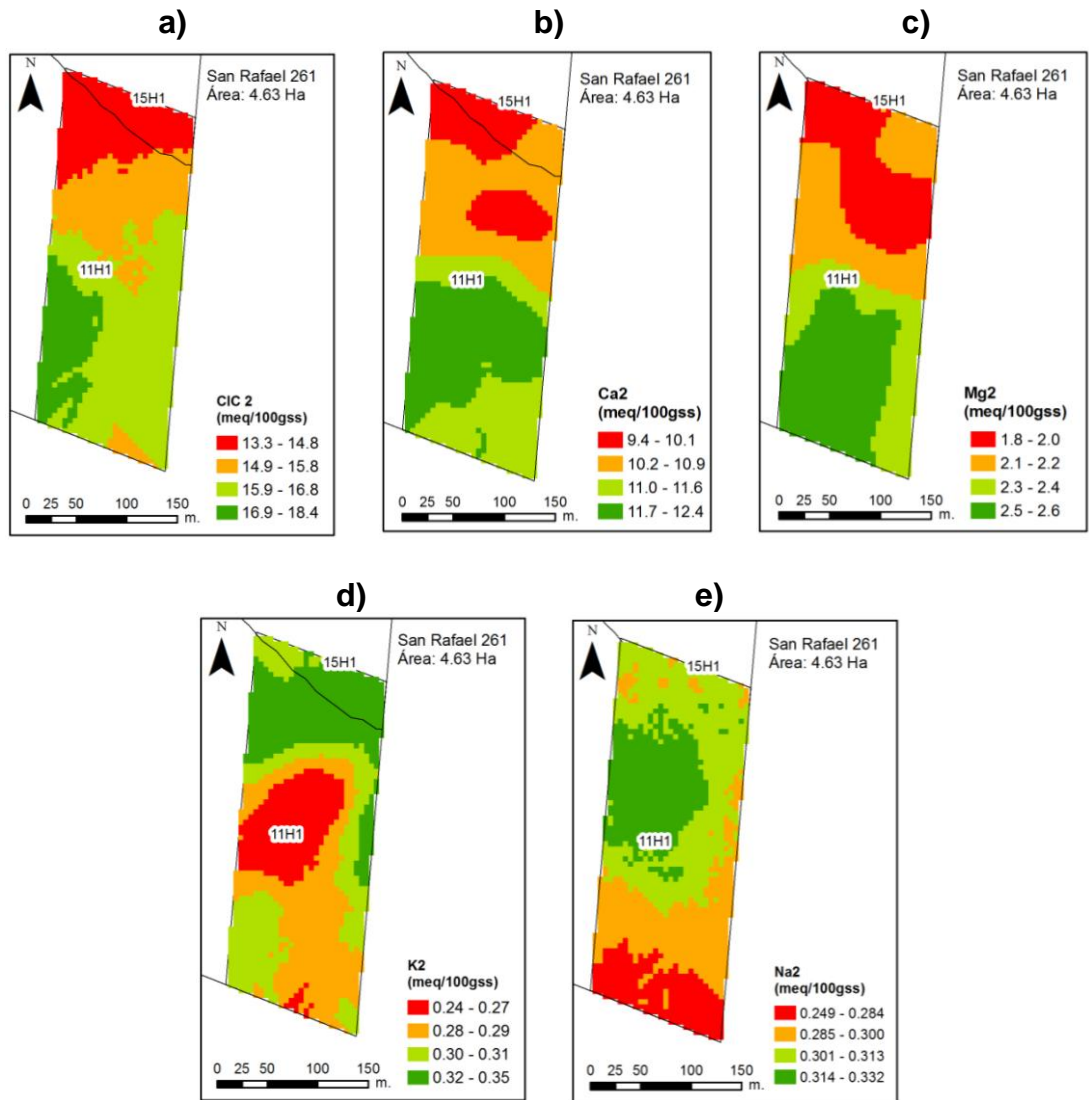
El fósforo, a pesar de ser extraído por el cultivo para cumplir con sus requerimientos, no presentó cambio significativo en su concentración ( $p=0.1848$ ) y se mantuvo en nivel alto con valores superiores a 46 ppm de acuerdo a la figura 60, posiblemente porque en esta etapa del cultivo, su requerimiento es menor.

**Figura 60.** Concentración de P en la hacienda San Rafael, suerte 261, tratamiento 2 (T2).



Se evidenció un aumento altamente significativo ( $p=0.0007$ ) de la CIC (figura 61a) en el 5% de los suelos, clasificándose como CIC normal. Para este caso, se observó un incremento significativo ( $p=0.0122$ ) en la concentración de calcio siendo elevada en todos los suelos como lo indica la figura 61b, probablemente por la fuente de mejiminores, que puede tener aporte adicional de este nutriente. A diferencia del calcio, el magnesio (figura 61c) mostró una disminución altamente significativa ( $p<0.0001$ ) en su concentración, pero a pesar de ello, se mantuvo en nivel medio en el 90% del área estudiada y solamente el 10% de la misma presentó exceso ( $>2.5$  meq/100g); este comportamiento se ve reflejado en la alta relación Ca/Mg ( $>5$ ) encontrada para la mayoría de los casos (60%) donde se manifiesta el predominio del calcio sobre el magnesio. Se observó un incremento significativo ( $p<0.0001$ ) en el nivel de K, alcanzando un nivel medio después de la fertilización (figura 61d), mejorando de esta manera la relación (Ca+Mg)/K, demostrando que el cultivo toma gran parte del potasio aplicado para su nutrición y el resto permanece en el suelo para continuar el desarrollo de la planta. Se encontró un fuerte aumento ( $p<0.0001$ ), en el nivel de sodio para todos los suelos (figura 61e), duplicando el valor encontrado antes de la fertilización, alcanzando valores de 0.42 meq/100g que suponen, una vez más, problemas de toxicidad por la acumulación de esta base en el suelo e influyendo así, en el incremento de la CIC.

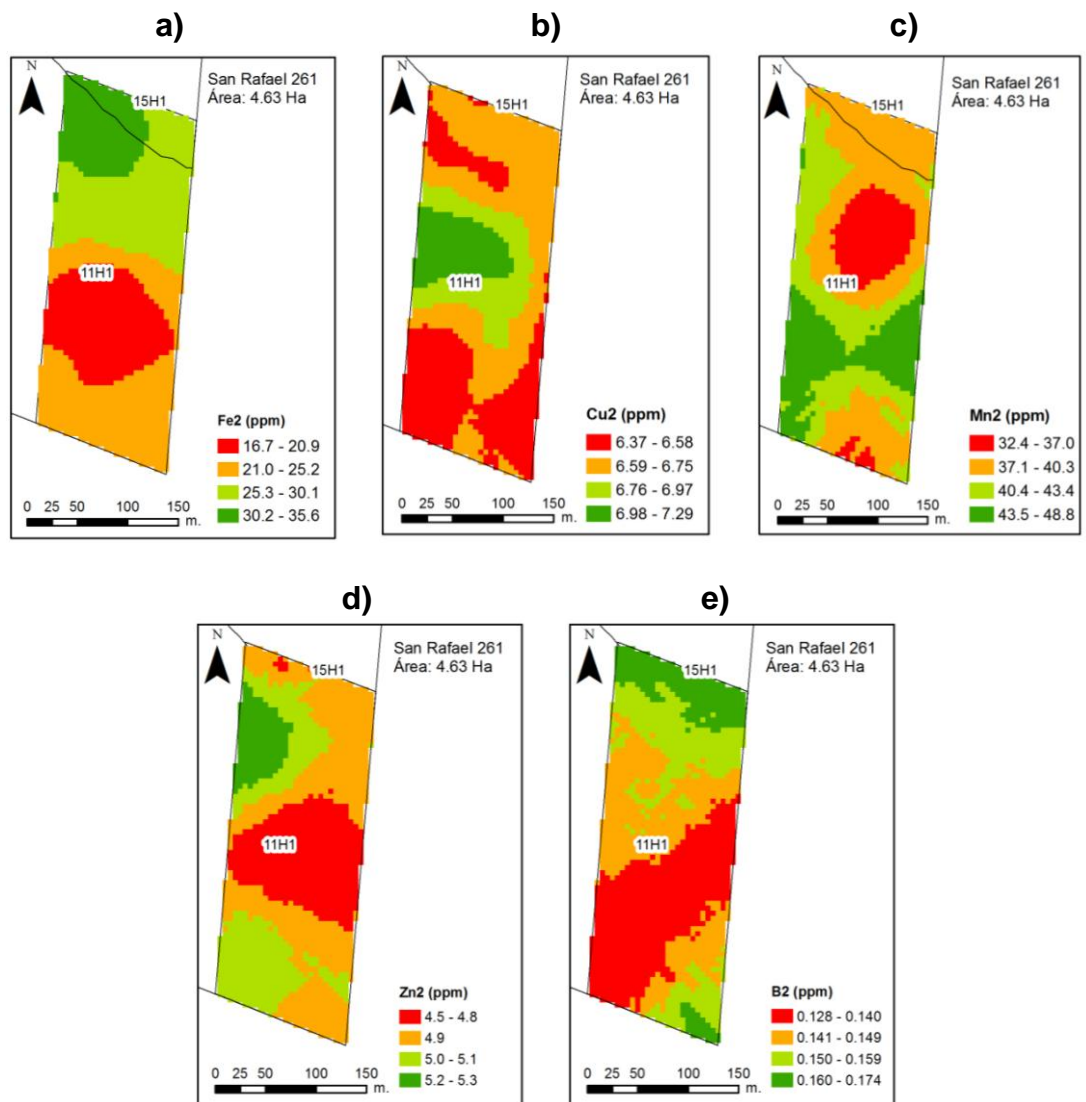
**Figura 61.** CIC y concentración de bases intercambiables en la hacienda San Rafael, suerte 261, tratamiento 2 (T2).



A diferencia de las dos suertes anteriores, la concentración de hierro aumentó fuerte y significativamente ( $p < 0.0001$ ), dada la fertilización realizada con la aplicación de 50 Kg de mejimenes por hectárea, un mes antes de la toma de las muestras. No obstante, el nivel de hierro es bajo en el 98% de los suelos estudiados (figura 62a), dada la alta tasa de extracción que realiza el cultivo para este micronutriente (tabla 1) y el valor del pH, en el cual precipita en forma de  $\text{Fe}(\text{OH})_3$ , de acuerdo a la reacción 8. El manganeso, con aumento significativo en su concentración ( $p = 0.0290$ ), se encontró en nivel alto en el 50% de los suelos (figura 62c), en tanto que el cobre (con incremento significativo en su concentración,  $p < 0.0001$ ) y el cinc (con disminución significativa,  $p < 0.0001$ ) se

presentaron en exceso para todos los casos, similar a lo ocurrido en el primer tratamiento, tal como se aprecia en las figuras 62b y 62d respectivamente. La estadística muestra que el boro sufrió una fuerte disminución significativa en sus niveles ( $p < 0.0001$ ), permaneciendo en deficiencia para toda el área experimental (figura 62e).

**Figura 62.** Concentración de elementos menores en la hacienda San Rafael, suerte 261, tratamiento 2 (T2).



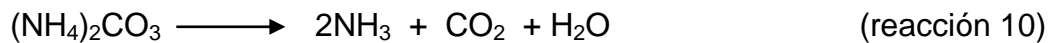
## 6. DISCUSIÓN GLOBAL

La caña de azúcar crece satisfactoriamente en diferentes tipos de suelos, pero prefiere los francos o franco-arcillosos, bien drenados, profundos, ricos en materia orgánica, topografía plana y con pH entre 5.5 y 7.5 <sup>[7]</sup>. Tolera un amplio rango de acidez y alcalinidad del suelo y pueden obtenerse altas producciones en suelos con pH entre 5 y 8 <sup>[8]</sup>. Para las suertes analizadas en este estudio, se encontraron suelos de textura franca fina, adecuadas para el cultivo de la caña. La reacción del suelo se considera adecuada para estos suelos y se presentó desde acidez media hasta alcalinidad suave, observando en general, que la fertilización aplicada no produjo variación significativa del pH para las diferentes suertes, comportamiento atribuido al efecto tampón que ejercen la materia orgánica al igual que las cantidades apreciables de arcillas encontradas en estos suelos.

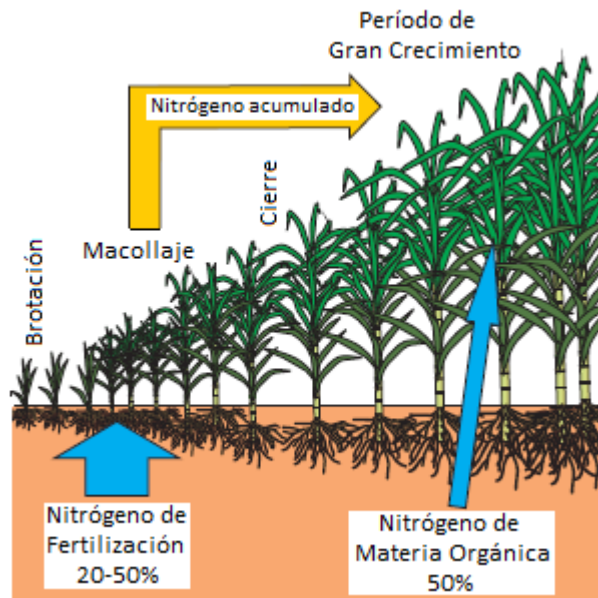
Desde un punto de vista netamente práctico, se ha establecido el valor de  $1.3\text{g/cm}^3$  como densidad aparente promedio para los suelos minerales. Según la textura, se consideran como valores altos aquellos que sean superiores a  $1.3\text{g/cm}^3$  en suelos con texturas finas; los mayores a  $1.4\text{g/cm}^3$  en suelos con texturas medias y los mayores a  $1.6\text{g/cm}^3$ , en suelos con texturas gruesas <sup>[21]</sup>. Se considera entonces que los valores de densidad aparente encontrados en las suertes analizadas, son apropiados si se tiene en cuenta la textura de los suelos y los contenidos de materia orgánica hallados.

El nitrógeno es el nutrimento que más limita la producción de caña en el valle del río Cauca, debido al predominio de suelos con bajos y medianos contenidos de MO y a las exigencias nutricionales del cultivo <sup>[48]</sup>. Además, el N disponible para satisfacer las necesidades del cultivo está representado por el nitrógeno del fertilizante aplicado, el acumulado en el cañaveral y que puede removilizarse y el proveniente de la mineralización de la MO <sup>[8]</sup>. En las tres suertes estudiadas se evidenciaron niveles medios de MO para los dos tratamientos realizados, donde las altas relaciones C/N encontradas, sugieren el predominio de procesos de inmovilización de nutrientes y a su vez, la deficiencia de N sin aporte de este nutriente por parte de la MO, ya que las condiciones climáticas de este valle interandino impiden la acumulación de materia orgánica en el suelo y por consiguiente, el aporte natural de N se ve restringido. Para compensar la deficiencia de nitrógeno en las suertes bajo estudio, se realizaron fertilizaciones a base de este macronutriente aproximadamente dos meses después del inicio del cultivo, tiempo propicio para la fertilización nitrogenada dado que corresponde a la etapa de macollaje, período durante el cual el cultivo absorbe más nitrógeno del que utiliza para su desarrollo y crecimiento <sup>[8]</sup>, tal como se muestra en la figura 56. Así, se observaron incrementos significativos en el nivel de N en el 40 y 52% de los suelos de las dos primeras suertes (Peralonso 121 y Santa Elena 80)

alcanzando un nivel medio después de la fertilización nitrogenada, mientras que el 68% de la tercera suerte (San Rafael 261) mantuvo el nivel medio; no obstante, no se puede asegurar su alta disponibilidad para la absorción por parte de las plantas, debido a que ese valor incluye tanto el nitrógeno en forma orgánica como inorgánica, en donde su forma orgánica representa casi la totalidad del nitrógeno en el suelo y no puede ser utilizada por la planta mientras no se transforme previamente en nitrógeno inorgánico, mediante procesos de mineralización de la materia orgánica. Ahora bien, algunos de los suelos presentaron disminución y/o nivel bajo de N, debido al alto porcentaje de extracción que presenta la caña respecto a este macronutriente (tabla 1), o a las posibles pérdidas por evaporación del amoniaco ( $\text{NH}_3$ ) generado como consecuencia de la aplicación de la urea ( $\text{H}_2\text{NCONH}_2$ ) al suelo, cuyo proceso de transformación se acelera a valores de pH neutros y alcalinos como los encontrados en estos suelos. Las reacciones 9 y 10 ilustran este fenómeno.



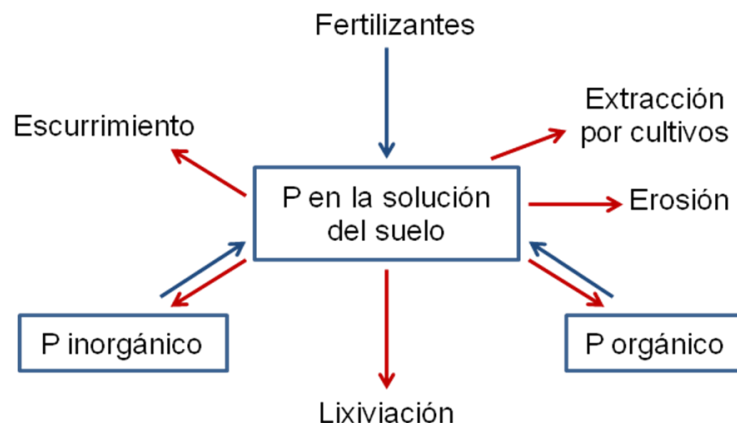
**Figura 63.** Importancia de la época de fertilización nitrogenada <sup>[9]</sup>.





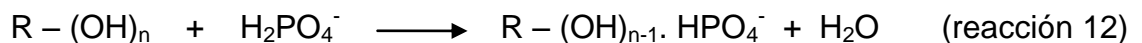
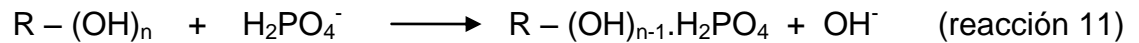
Como se desprende de la observación del ciclo global del fósforo en la figura 64, la mayor entrada al sistema proviene del agregado de fertilizantes fosfatados, mientras que las salidas pueden ser por extracción del cultivo, erosión, escurrimiento y lixiviación. Dado que el P es un elemento poco móvil en el suelo y que en los suelos de la parte plana de valle geográfico del río Cauca, la respuesta de la caña de azúcar a la aplicación de fósforo ha sido baja, la fertilización fosfatada previa a la plantación resulta suficiente para suplir la necesidad del cultivo durante todo su ciclo comercial <sup>[8, 48]</sup>. El óptimo rango de pH del suelo dentro del cual se observa la máxima disponibilidad de este macronutriente se encuentra entre 6.5 y 7.5 asociado fundamentalmente a que en este rango ocurre la máxima solubilidad de las formas de fósforo inorgánico del suelo. Así, en rangos de pH ácido hasta 6.5, se reduce la solubilidad de fosfatos de hierro y aluminio y aumenta la solubilidad de las formas ligadas al calcio. Pasado cierto nivel de pH alcalino (sobre 7.5) comienza a precipitar ciertas formas de fosfatos de calcio y nuevamente se reduce la disponibilidad del fósforo <sup>[49]</sup>. Aunque solamente dos de las tres suertes en estudio fueron fertilizadas a base de este elemento antes de la plantación, en ninguna de ellas se presentó deficiencia de este macronutriente, dado el óptimo rango de pH encontrado en los suelos, manteniéndose en nivel medio y alto en los dos tratamientos practicados, a pesar de la extracción por parte del cultivo y las posibles pérdidas.

**Figura 64.** Esquema del ciclo global del fósforo en el sistema suelo-planta.



Es sabido que el valor de la CIC total varía según la textura y el contenido de materia orgánica del suelo, siendo mayor en suelos arcillosos y con mucha materia orgánica; así, se encontraron valores de CIC altos en las suertes analizadas dados los altos porcentajes de arcilla presentes en los suelos además del contenido medio de MO. No obstante, la fertilización fosfatada también genera un aporte al aumento de la CIC mediante sustitución isomórfica. En este caso, los

iones fosfato (número de coordinación 4), encajan bien en los sitios ocupados por los tetraedros de silicio de los silicatos. Por tanto, cuando se aplican fosfatos al suelo ocurre algún grado de sustitución de sílice por fósforo en los enrejados arcillosos. Otra forma de sustitución isomórfica se presenta al intercambiarse el ión fosfato, por iones hidroxilo en el enrejado de los minerales. En este caso hay desprendimiento de OH<sup>-</sup> y el pH tiende a subir. Las siguientes reacciones ilustran este fenómeno <sup>[50, 51]</sup>:



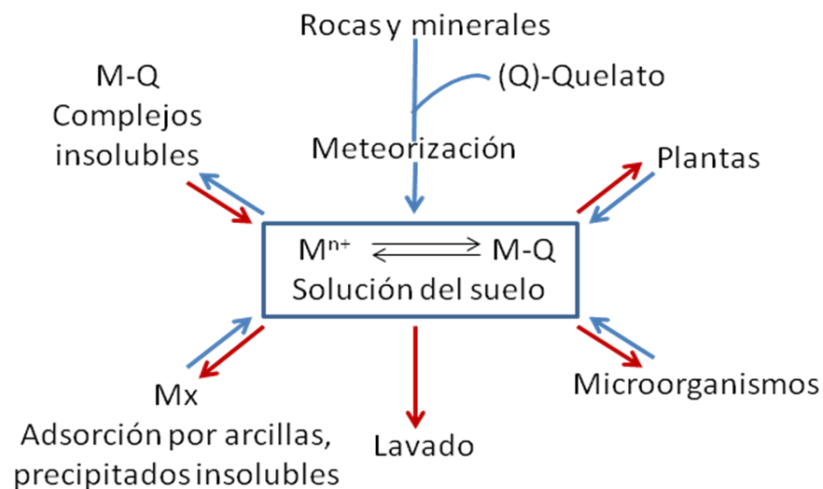
En el primer caso se origina OH<sup>-</sup>, en el segundo H<sub>2</sub>O y carga negativa libre. Este fenómeno explica el aumento de carga negativa cuando se fosfatan los suelos.

Se observó, en forma general, que los niveles de bases de cambio son altos principalmente los de calcio y magnesio, hecho atribuible posiblemente al origen de estos suelos (Molisoles e Inceptisoles), que son considerados básicamente como suelos calcáreos. En forma general se observa una tendencia a la deficiencia de potasio en las tres suertes, comportamiento que se debe en parte a los altos niveles del calcio y magnesio encontrados y a la mayor respuesta que presenta la caña de azúcar en la extracción de este macronutriente (tabla 1), dado que esta es la base más requerida por el cultivo ya que interviene en el metabolismo de los azúcares. Con valores de pH mayores que 8, se presentan niveles altos de Na intercambiable que pueden causar toxicidad a la planta e inducir cambios en las condiciones físicas del suelo, reduciendo la porosidad, lo que resulta en drenajes muy pobres <sup>[9]</sup>. Este fenómeno no es de esperarse en ninguna de las suertes bajo estudio, dado que los valores de pH encontrados no fueron superiores a 8.0.

Las deficiencias de algunos micronutrientes suelen presentarse como consecuencia de la pobreza natural del suelo o inducidas por condiciones adversas relacionadas con la acidez o alcalinidad, alto contenido de MO, la sequía, el exceso de humedad y los desbalances nutricionales debido a los manejos inadecuados de los fertilizantes y enmiendas <sup>[52]</sup>. Como se mencionó anteriormente, los suelos analizados en esta investigación se consideran calcáreos y en este tipo de suelos la deficiencia de Fe es muy frecuente; estas insuficiencias fueron confirmadas en las tres suertes estudiadas, donde en ningún caso se alcanzó el nivel alto de hierro (>80ppm), ni siquiera en la suerte 261 de San Rafael, la cual fue fertilizada con elementos menores (mejimenores) a los 60

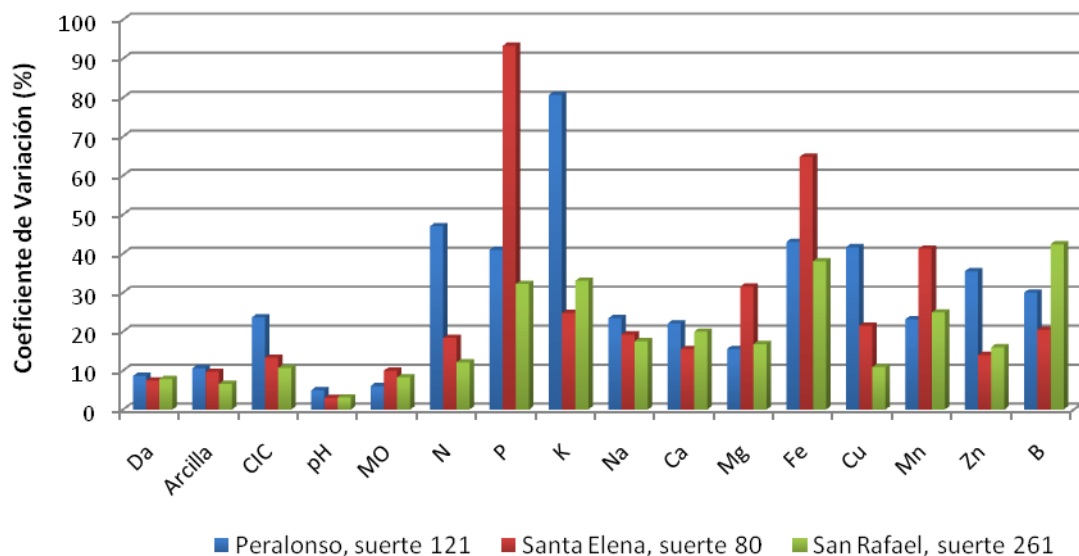
días después de la siembra de la caña. Estos bajos niveles de Fe encontrados, junto con la fuerte disminución observada en su concentración para dos de las suertes (Peralonso 121 y Santa Elena 80) en el tratamiento 2, se atribuyen al pH de estos suelos y a la mayor respuesta que presenta el cultivo para este nutriente, tal como se muestra en la tabla 1. La caña ha sido reportada como tolerante al exceso de manganeso disponible en el suelo <sup>[53]</sup>. Para todos los suelos analizados, se encontraron altas concentraciones de dicho micronutriente como era de esperarse, pues las deficiencias de Fe inducen a incrementos en el nivel de Mn dada la relación antagónica existente entre estos dos micronutrientes; no obstante, se puede decir que dichas concentraciones no representarían una eventual toxicidad para el cultivo dado que al haber aumentado los niveles de fósforo con la aplicación de DAP, los problemas de toxicidad del Mn se ven reducidos. Sumado a esto, el calcio compite con el manganeso por la absorción, por lo que altas concentraciones de Ca (como las encontradas en estos suelos) reducen la absorción de Mn, tal como lo demuestra un estudio realizado en un suelo de Hawái <sup>[54]</sup>. En general, se encontraron bajas concentraciones de Cu y Zn en algunos suelos de las dos primeras suertes (Peralonso 121 y Santa Elena 80) mientras que el B presentó fuerte deficiencia en las tres suertes, atribuible también al valor del pH de estas suertes, en el que precipita como boratos de calcio principalmente. De acuerdo a la figura 65, dichas deficiencias se pueden haber ocasionado por procesos de adsorción en las arcillas, inmovilización por formas sólidas de la MO y/o la precipitación de tales micronutrientes en formas de óxidos o hidróxidos una vez liberados de los minerales primarios, quedando de esta manera, indisponibles para el cultivo.

**Figura 65.** Esquema de las reacciones que puede tener la materia orgánica con los micronutrientes en el suelo <sup>[54]</sup>.



Con el propósito de conocer la variabilidad de las propiedades evaluadas, se estimaron las estadísticas descriptivas como promedios, desviaciones estándar y coeficientes de variación de cada una de ellas. Adicionalmente se utilizó la metodología de los cuadrados medios esperados para estimar los componentes de varianza entre suertes (entre lotes) e intrasuerte (dentro de lotes). En las figuras 66 y 67 se muestran los coeficientes de variación para el tratamiento T1 y T2 respectivamente. En el anexo 3, tablas 1 y 2, se relacionan los promedios, desviaciones estándar y coeficientes de variación de cada una de las variables medidas en las suertes, en los tratamientos T1 y T2.

**Figura 66.** Coeficientes de variación de cada una de las variables medidas en las tres suertes, en el tratamiento 1 (T1).

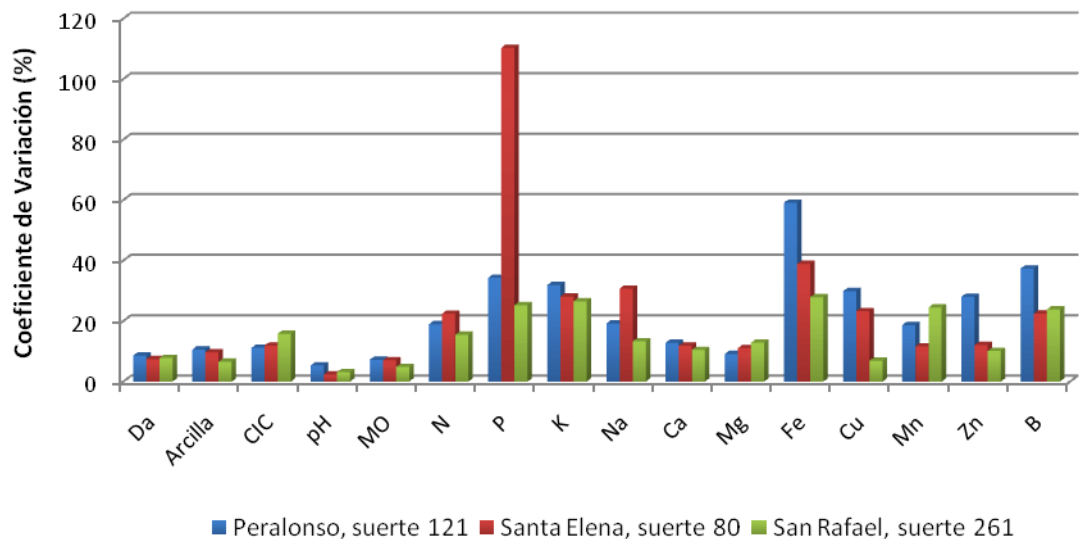


En general, dentro de cada una de las tres suertes, la Da de los diferentes puntos muestreados presenta valores bajos y cercanos entre sí, deducible de los bajos CV (<10%). Similar comportamiento se aprecia en el porcentaje de arcillas, aún cuando su variabilidad es superior al de Da, este comportamiento podría evidenciar homogeneidad de las suertes en cuanto a condiciones físicas.

El pH y la MO dentro de cada suerte presentan poca variabilidad manifestada en sus bajos CV, indicando que las condiciones de reacción química entre suerte son semejantes en los puntos muestreados, con poca variabilidad intrasuerte.

Con respecto a los datos de N, P y K, en cada una de las suertes, se observa una alta variabilidad representada en sus altos CV (>10%). Esta variabilidad no se corresponde con la semejanza en la reacción química y en el nivel de MO de cada una de estas suertes, lo que indicaría un fuerte efecto por parte del manejo de estos suelos en épocas anteriores a este estudio. Similar comportamiento se aprecia en las bases de cambio (Ca, Mg y Na), atribuible posiblemente a reacciones de solubilización de las dos primeras bases y de intercambio de Na desde la fase coloidal hacia la solución del suelo, o por aporte proveniente de las aguas de riego. El mismo comportamiento se presenta para los todos los micronutrientes. La alta variabilidad de la CIC se podría explicar por el aporte de Na que induce a intercambio de Ca y/o Mg hacia la fase coloidal o doble capa difusa y también por efecto de la fertilización fosfatada realizada antes de la toma de muestras, como se manifestó anteriormente.

**Figura 67.** Coeficientes de variación de cada una de las variables medidas en las tres suertes, en el tratamiento 2 (T2).



Al igual que en el primer tratamiento (T1), las tres suertes estudiadas presentan poca variabilidad respecto al pH y la MO deducible de los bajos valores de CV (<10%); este comportamiento corrobora el hecho de que la fertilización realizada no generó cambios en las condiciones de reacción química del suelo, y que no hay cambios significativos en el nivel de MO durante el tiempo de este estudio.

Una vez más, se refleja variabilidad en los macronutrientes N, P y K en cada una de las suertes, representada en sus altos CV, variabilidad que no se corresponde con la semejanza en la reacción química y en el nivel de MO de cada una de estas suertes, lo que demuestra nuevamente, el fuerte efecto por parte de la fertilización realizada aproximadamente 2 meses después del inicio del cultivo en cada una de las suertes.

Comportamiento similar al T1 se aprecia en las bases de cambio, a excepción del Mg, atribuible a la continua extracción de éstas por parte del cultivo. Igual comportamiento se presenta para todos los micronutrientes, a excepción del Cu que presentó una baja variabilidad. La alta variabilidad de la CIC se podría explicar, una vez más, por el aporte de Na que induce a intercambio de Ca y/o Mg hacia la fase coloidal y también por los fosfatos presentes en el suelo.

En las tablas 12 y 13 se muestran los valores de la estimación de componentes de varianza tanto intrasuerte como entresuerte para los dos tratamientos (T1 y T2 respectivamente), mediante el método de los cuadrados medios esperados.

**Tabla 12.** Estimación de componentes de varianza entre e intrasuerte para cada una de las variables medidas en el T1.

<b>Variables</b>	<b>S<sup>2</sup> Intrasuerte</b>	<b>S<sup>2</sup> Entre suerte</b>
pH	0.07210**	0.06265
MO	0.06787**	0.0008502
N	0.0004771	0.0020405**
P	282.33195	883.49592**
K	0.03451**	0.0081146
Na	0.0019738	0.0028754**
Ca	8.50764	14.24068**
Mg	2.56969	31.88731**
CIC	17.61702	26.46851**
Fe	293.69199**	285.75075
Cu	0.35771	4.79724**
Mn	645.92008	775.28412**
Zn	0.37672	4.50991**
B	0.0056024**	0.00003924

S<sup>2</sup>=varianza

\*\* Mayor variabilidad en la columna correspondiente.

En términos generales de esta prueba, se deduce que la mayoría de las propiedades químicas evaluadas, reflejan mayor variabilidad entre suerte que intrasuerte para el tratamiento correspondiente al inicio del cultivo, como era de esperarse debido a su diferencia en ubicación geográfica.

**Tabla 13.** Estimación de componentes de varianza entre e intrasuerte para cada una de las variables medidas en el T2.

<b>Variabes</b>	<b>S<sup>2</sup> Intrasuerte</b>	<b>S<sup>2</sup> Entresuerte</b>
pH	0.07540**	0.05414
MO	0.04070**	0.02828
N	0.0003535**	0.00003707
P	289.05388	1037.6**
K	0.0074310**	0.0001584
Na	0.0039172**	0.00004671
Ca	2.45164	7.41668**
Mg	0.47239	18.65176**
CIC	8.20905	58.19370**
Fe	28.02674	127.08412**
Cu	0.14569	14.40019**
Mn	205.23979	2185.8**
Zn	0.14445	4.73684**
B	0.0028048**	0.0010612

S<sup>2</sup>=varianza

\*\* Mayor variabilidad en la columna correspondiente.

Igualmente y como era de esperarse, después de la aplicación de los fertilizantes, en el tratamiento 2, se observa de manera global que sigue habiendo mayor variabilidad entre suerte que intrasuerte para la mayoría de las propiedades químicas evaluadas. Cabe destacar que para este tratamiento, se denota el fuerte efecto de la fertilización nitrogenada y potásica sobre la variabilidad intrasuerte, así como el marcado efecto de la fertilización con menores sobre la variabilidad entresuerte.

En las tablas 14 y 16 se relaciona la prueba estadística de correlación lineal de Pearson para las diferentes variables en los tratamientos pertinentes T1 y T2 respectivamente. (Resultados mostrados en el anexo 3, tablas 3 y 4).

**Tabla 14.** Correlaciones lineales de Pearson para las diferentes variables medidas en las tres suertes, en el T1.

	pH	MO	N	P	K	Na	Ca	Mg	CIC	Fe	Cu	Mn	Zn	B	Da	Ar
pH		-		-		+	+	+	+	-	-		-		-	+
MO			+							-		-	+	+		
N				+		-	-	-	-	-	+	-	+		-	-
P						-	-	-	-	-	+	-	+			-
K						+	+	+			-	+	-	-	-	+
Na							+	+	+		-	-	-	-	-	+
Ca								+	+	+	-	+	-	-	-	+
Mg									+		-	+	-	-	-	+
CIC											-	+	-		-	+
Fe											-	+	-	-	-	+
Cu												-	+			-
Mn													-			+
Zn															+	-
B															+	-
Da																-
Ar																

+ = correlación lineal positiva y (altamente) significativa  
 - = correlación lineal negativa y (altamente) significativa

La tabla 14 presenta las estimaciones de los coeficientes de correlación lineal de Pearson cuando se prueba la hipótesis nula  $H_0: \rho=0$  contra la alternativa  $H_1: \rho \neq 0$ , para las diferentes variables de las suertes en el tratamiento T1. De esta tabla se resalta que, existe una correlación lineal negativa y significativa del **pH** con MO, P, Cu, Fe y Zn, demostrando que el incremento de estas variables causan acidez al suelo, ya que a pH ácidos se solubilizan tanto los micronutrientes como los fosfatos de calcio presentes en estos suelos, incrementando así su concentración. La correlación con la Da se explica por el hecho de que su incremento implica disminución de arcillas y como se observa, existe correlación significativa y positiva de estas partículas con el pH. Además, se observó una correlación positiva y altamente significativa del pH con la mayoría de las bases de cambio (Ca, Mg y Na) así como con la CIC, mostrando que el incremento de las cargas negativas del suelo (CIC) se debe a un incremento en el valor del pH, siendo de esta manera una carga variable.

Como era de esperarse, se encontró una correlación positiva y significativa entre la **MO** y el N total, puesto que gran parte del nitrógeno del suelo proviene de ella. Sin embargo, los datos reflejan que no existe una relación numérica constante entre estas dos variables como se predice teóricamente ( $\%N = \%MO/20$ ) puesto



que la tabla de frecuencias (tabla 15 y anexo 4) para esta relación muestra que el 46.76% de los datos de relación MO/N, se encuentran entre 25 y 35, demostrando la necesidad de determinar experimentalmente el porcentaje de N. Esta dispersión en dichos valores podría atribuirse a la alta y variable relación C/N.

**Tabla 15.** Tabla de frecuencias para la relación MO/N en las diferentes suertes, tratamientos T1 y T2.

Relación $\frac{\%MO}{\%N}$	Conteo total de número de muestras	Porcentaje equivalente
<25	34	10.00
25-35	159	46.76
36-45	65	19.12
46-55	8	2.35
≥56	74	21.76
<b>Total</b>	<b>340</b>	<b>100.00</b>

Se presentó correlación negativa y significativa entre el **N** y la Da dado que ésta disminuye al aumentar los niveles de MO en el suelo. Similar ocurrió entre el N con Ca, Mg, Na y Fe dado que el nitrógeno al ser tomado por la planta en forma de amonio  $NH_4^+$ , libera iones  $H^+$  a la solución del suelo generando así un pH ácido y por tanto disminuyendo la absorción de dichos nutrientes por la planta, además de que un incremento de estas variables puede implicar una disminución de materia orgánica por procesos de mineralización y por tanto una disminución en el contenido de N orgánico. Se aprecia un grado de asociación positivo entre N y P debido a que ambos provienen de la MO y de la fertilización aplicada.

Existe correlación positiva entre el **K** y las arcillas, dada la alta capacidad que tienen dichas partículas para retener este nutriente y a su vez, para intercambiarlo con la solución del suelo. Igual correlación del K y las demás bases (Ca, Mg y Na).

**En cuanto a la CIC** se confirma la correlación lineal positiva y altamente significativa con el valor de pH. También existe correlación significativa y positiva con el contenido de arcillas, pero no existe correlación con la MO, significando que en estos suelos, el mayor aporte a la CIC proviene de las arcillas. Además existe correlación positiva y significativa con las bases de cambio Ca, Mg y Na como era de esperarse, porque a mayor CIC mayor retención de estas bases en la doble capa difusa y mayor intercambio con la solución del suelo. La correlación positiva con el Mn se podría explicar porque este nutriente en forma reducida  $Mn^{2+}$  se intercambia fácilmente sobre la fase coloidal del suelo y además, por el alto contenido de arcillas (correlación positiva). La correlación negativa con la Da se

explica por el hecho de que su incremento implica disminución del contenido de arcillas. La correlación significativa con el P se explicaría por la insolubilización del P en forma de fosfato de calcio a medida que aumente el valor de pH a valores superiores de 6.5. Con el N, la correlación negativa se puede explicar porque un incremento en la CIC se atribuye principalmente a carga variable por incremento en el valor de pH, de esta manera el nitrógeno amoniacal se evaporaría y la concentración de nitratos disminuiría. El grado de asociación negativo con el Cu y el Zn se puede atribuir a que el incremento de estos micronutrientes implica solubilización en medio ácido, por lo tanto disminución de pH.

**Tabla 16.** Correlaciones lineales de Pearson para las diferentes variables medidas en las tres suertes, en el T2.

	pH	MO	N	P	K	Na	Ca	Mg	CIC	Fe	Cu	Mn	Zn	B	Da	Ar
pH		-	-		-		-	+	+	-	-	-	-		-	+
MO			+	+	+		-	-	-	+	+	-	+	-	-	
N				+	+			-			+	-	+	-		
P							-	-	-	+	+	-	+	-		-
K						-				+		+	+		+	
Na														-	-	
Ca								+	+	-	-	+			+	
Mg									+	-	-	+	-	+	-	+
CIC										-	-	+	-		-	+
Fe											+	-	+	-	+	-
Cu												-	+	-		-
Mn													-	+	+	+
Zn														-	+	-
B															+	
Da																-
Ar																

+ = correlación lineal positiva y (altamente) significativa

- = correlación lineal negativa y (altamente) significativa

De la tabla 16 se resalta que, de igual forma que en el T1, en el T2 existe una correlación lineal negativa y significativa del pH con MO, Fe, Cu, Mn y Zn, demostrando una vez más que el incremento de las variables antes mencionadas causan acidez al suelo. Además, se observa una correlación negativa con N, K y Ca, denotando el marcado efecto de la fertilización, contrario a lo encontrado en las pruebas anteriores, en donde se demostraba que los cambios en el valor del pH por efecto de esta fertilización no son significativos. El incremento en el pH ocasiona mayor fijación del K dentro de las láminas de arcilla. El incremento en N puede significar incremento de MO y ésta genera acidez. La relación con el calcio se explica porque un aumento en el valor del pH a valores superiores de 6.5

implica la precipitación de esta base en forma de fosfatos o carbonatos. Conjuntamente se observa una correlación positiva y altamente significativa con la CIC, mostrando que ésta continúa siendo una carga variable.

Dado que las propiedades físicas del suelo no cambian en el tiempo de estudio con las fertilizaciones realizadas, se mantiene el grado de asociación altamente significativo positivo y negativo de la **CIC** con arcillas y Da respectivamente. También existe correlación positiva y significativa con las bases de cambio Ca y Mg dado que a mayor CIC hay mayor retención de estas bases en la fase coloidal. Se mantiene la correlación negativa significativa con el P y con el N. La correlación negativa con el Cu y el Zn se puede atribuir a que al incrementar los contenidos de estos micronutrientes, implica solubilización en medio ácido, por lo tanto disminución de pH.

Como conclusión global de este tipo de correlación se infiere que la fertilización ejerce efecto en las propiedades químicas del suelo, así los cambios en los valores de sus variables no sean significativos.

## 7. CONCLUSIONES

1. La contribución de esta investigación radicó en la aproximación a una optimización de las suertes (lotes) mediante la agricultura de precisión, desde el punto de vista agronómico, económico y medioambiental, intentando aumentar la competitividad y sostenibilidad del sector azucarero mediante una mayor eficiencia en las prácticas agrícolas.
2. El trabajo realizado durante este estudio, utilizando una aproximación de la agricultura de precisión, sirve como herramienta facilitadora para estudios y análisis de suelos posteriores, en especial los suelos cultivados con caña de azúcar, ya que es el campo de aplicación inmediata de esta investigación.
3. Aunque la agricultura de precisión no representa un fácil acceso desde el punto de vista económico por parte del agricultor, este estudio ratifica la necesidad de monitoreo permanente de las condiciones locales y la variabilidad espacial de los cultivos de caña, siendo los experimentos de campo y a largo plazo, la única vía de conocer las causas de las variabilidades tanto entre suerte como intrasuerte.
4. Los sistemas de información geográfica (SIG) y sistemas de posicionamiento global (GPS) fueron de gran importancia para la georreferenciación, ubicación y representación de los puntos de muestreo en cada una de las suertes estudiadas, puesto que permitieron una localización precisa, minimizando errores en el muestreo y permitiendo conocer la variabilidad espacial en tiempo real.
5. Los mapas de contorno generados mediante los programas de geoestadística de CENICAÑA, permitieron apreciar a nivel espacial, la distribución y variabilidad de las diferentes propiedades físicas y químicas de los suelos evaluados en cada una de las suertes, lo cual brinda elementos de decisión apropiados para el manejo del cultivo de la caña de azúcar y así conllevar a una racionalización en el uso de los recursos y por consiguiente, a una reducción de los costos de producción.

6. La espectroscopía de reflectancia en el infrarrojo cercano (NIRS) implementada en CENICAÑA para la medición de MO y B, fue una herramienta útil y ágil para dichas medidas, por su facilidad, ahorro de tiempo y por ser un método no destructivo, sin uso de reactivos ni generación de residuos, evitando contaminación e impacto ambiental.
7. Fue posible cuantificar la MO por espectroscopía de infrarrojo cercano (NIRS), mediante la absorción de grupos característicos en señales ubicadas aproximadamente a 1400, 1900 y 2200 nm, mediante interpolación en curva de calibración realizada con patrones de suelo que varían con porcentajes desde rango bajo hasta rango alto, comprendido entre 1.25 y 6.14% de este parámetro.
8. Los análisis de los suelos estudiados en las tres suertes, evidenciaron variabilidad de sus propiedades físicas y químicas tanto intrasuerte como entre suerte, siendo más acentuada en ésta última, deduciéndose que para recomendar paquetes de fertilización adecuados, es de suma importancia la agricultura de precisión como una técnica precisa, competitiva y sostenible desde el punto de vista ambiental.
9. Los análisis físicos y químicos de los suelos estudiados en las tres suertes, evidencian, en general, textura franca fina, densidad aparente, pH y nivel de MO adecuados para el cultivo de la caña, altas concentraciones de P, Ca, Mg, Mn y Na, sin esperar toxicidad por parte de este último debido al óptimo valor de pH; bajo a medio contenido de N, normal a alta CIC, bajos a altos niveles de K, deficiencias fuertes de Fe y B, y niveles variables de Cu y Zn.
10. El análisis estadístico permitió inferir que la fertilización realizada a las tres suertes (lotes) estudiadas, sí ejerce un efecto en las propiedades químicas del suelo, aún cuando no se producen cambios significativos en los valores de pH, resaltando un incremento de CIC y cambios significativos en el contenido de nutrientes.
11. No existe una relación numérica constante entre el porcentaje de MO y el porcentaje de N, como se predice teóricamente ( $\%N = \%MO/20$ ), puesto que se encontró que para dicha relación, el 46.76% de los datos, se encuentran entre 25 y 35, demostrándose de esta manera la necesidad de determinar experimentalmente el porcentaje de N.

12. En general los procesos de inmovilización del N de los suelos predominaron sobre los procesos de mineralización de la MO, impidiendo así el aporte de N al suelo.
13. De manera global, en la suerte 121 de Peralonso al inicio del cultivo, los suelos son arcillosos, con valores de Da adecuados, pH óptimo, nivel medio de MO, deficiencia de N, B y Fe; CIC, relaciones C/N y (Ca+Mg)/K altas; niveles altos de, P, Na, Ca, Mg y Mn; baja relación Ca/Mg; contenidos variables de K, Cu y Zn. Después de la segunda fertilización, se produjo aumento significativo en: CIC, niveles de N y Na; disminución significativa en niveles de P, Ca, Mg, K, Fe, Cu, Zn y B. La fertilización no produjo cambios significativos en el pH.
14. En la suerte 80 de Santa Elena al inicio del cultivo, la mayoría de los suelos son arcillosos, con valores de Da ligeramente altos, pH óptimo, niveles medios de MO y Cu; CIC, relaciones C/N y (Ca+Mg)/K altas; niveles altos de P, Ca, Mg, K, Na, Mn y Zn; relación Ca/Mg apropiada; deficiencias de N, Fe y B. Después de la segunda fertilización se produjo aumento significativo en: CIC, niveles de N, P, Ca, K, Na, Mn y Zn; disminución significativa en: niveles de MO, Fe, Cu y B. La fertilización no produjo cambios significativos en el pH.
15. En la suerte 261 de San Rafael al inicio del cultivo, la mayoría de los suelos son limosos, con altos porcentajes de arcillas y valores de Da adecuados, pH óptimo, niveles medios de CIC, MO y N, altas relaciones C/N y (Ca+Mg)/K, altos niveles de Ca, Mg, Na, Mn, Cu y Zn, relación Ca/Mg adecuada, deficiencias de K, Fe y B. Después de la fertilización se observó incremento significativo en: CIC, niveles de MO, Ca, K, Na, Fe, Mn y Cu; disminución significativa en: N, Mg, Zn y B. La fertilización no produjo cambios significativos en el pH.
16. Con este estudio no es posible concluir sobre la cantidad de extracción de macro y micronutrientes por parte de la caña de azúcar, porque en la mayoría de los casos sus niveles después de la fertilización superan considerablemente a los niveles iniciales, ya que en el momento del muestreo, el desarrollo del cultivo está aún en la etapa de macollaje.

## BIBLIOGRAFÍA

1. CARVAJAL E, Y.; JIMÉNEZ E, H. y MATERÓN M, H. 1998. Incidencia del Fenómeno Enso en la Hidroclimatología del Valle del Río Cauca-Colombia. Boletín de Estudios Andinos, 27 (3). p.p 744.
2. VARGAS ROJAS, R. 2009. Mapeo Digital del Suelo y su Evaluación con Fines de Producción de Caña de Azúcar en los Municipios de Ixiamas y San Buenaventura. Documento Conservación Internacional Bolivia. La Paz, Bolivia. p.p 18-21
3. VICINI, L. y RODRIGUEZ, R. 2008. Agricultura de Precisión en Caña de Azúcar. Revista Producción Agroindustrial del NOA. p.p 43.
4. ISAACS, C.; CARBONELL, J.; ZAMORANO, D. y GONZÁLEZ, L. 2009. Agricultura Específica por Sitio Fase IV. Primer Informe Técnico. Periodo Febrero – Julio. Proyecto 2214-452-21079. Convenio 471-2008. p.p 7
5. CARBONELL, J.; OSORIO, C. y CORTÉS, A. 2003. Levantamiento Detallado de Suelos en Cifras. Informe Técnico. p.p 1-3
6. CARBONELL, J. 2007. Agricultura Específica por Sitio y su Importancia en la Sostenibilidad del Cultivo de la Caña de Azúcar. Sociedad Colombiana de la Ciencia del Suelo. p.p 1-4
7. QUINTERO DURÁN., R. 1995. El Cultivo de la Caña en la Zona Azucarera de Colombia. Fertilización y Nutrición: Ecología del Cultivo. Centro de Investigación de la Caña de Azúcar de Colombia CENICAÑA. Cali, Colombia. p.p 153, 168
8. ROMERO, E.R.; DIGONZELLI, P.A. y SCANDALIARIS, J. 2009. Manual del Cañero. Estación Experimental Agroindustrial Obispo Colombres. Tucumán, Argentina. p.p 16, 29, 91- 93, 98

9. VICTORIA K, J.I.; AMAYA E, A.; RANGEL J, H.; VIVEROS V, C.A.; CASSALETT D, C.; CARBONELL G, J.; QUINTERO D, R.; CRUZ V, R.; ISAACS E, C.H.; LARRAHONDO A, J.E.; MORENO G, C.A.; PALMA Z, A.; POSADA C, C.; VILLEGAS T, F. y GOMEZ L, L.A. 2002. Características Agronómicas y de Productividad de la Variedad Cenicaña Colombia (CC) 85-92. Serie Técnica No. 30. Centro de Investigación de la Caña de Azúcar de Colombia CENICAÑA. Cali, Colombia. p.p 8-11
10. QUINTERO DURÁN, R. 1999. Extracción de Nutrientes por la Caña de Azúcar. Carta Trimestral No. 2, Vol. 21. Centro de Investigación de la Caña de Azúcar de Colombia CENICAÑA. Cali, Colombia. p.p 4-6
11. GARDIAZABAL, F.; MENA, F. y MAGDAHL, C. 2007. Efecto de la Fertilización con Inhibidores de la Nitrificación (ENTEC<sup>®</sup> Solub 21) en Paltos (*Persea americana* Mill) cv. Hass. Sociedad Gardiazabal y Magdahl Ltda. Viña del Mar, Chile. p. p 1-14
12. VICINI, L; MONASTERIO, M; PÉREZ F; MORANDINI, M. 2005. Agricultura de Precisión en Caña de Azúcar. Fuente: Revista Agrovisión. Provincia de Tucumán, Argentina. p.p. 11
13. LAGO G, C.; SEPÚLVEDA P, J.; FERNÁNDEZ P, F.; BARROSO A, R. 2009. Aplicación en la Agricultura de Precisión. Generación Automática de Mapas de Rendimiento. Revista Internacional de Ciencias de la Tierra. Cuba. En: [www.mappinginteractivo.com/plantilla-ante.asp?id\\_articulo=1605](http://www.mappinginteractivo.com/plantilla-ante.asp?id_articulo=1605)
14. IBAÑEZ, J.J. 2009. Agricultura de Precisión y Suelos. En: <http://weblogs.madrimasd.org/universo/archive.aspx>.
15. Erickson, B. 2006. Precision Agriculture in Colombian Sugarcane. Site Specific Management Center Newsletter, Purdue University.
16. Agricultura Específica por Sitio (AEPS). 2009. Centro de Investigación de la Caña de Azúcar de Colombia CENICAÑA. Cali, Colombia. En: <http://www.cenicana.org/aeps/index.php>.



17. CARBONELL GONZÁLEZ, J.; AMAYA ESTÉVEZ, A.; ORTIZ URIBE, B.; TORRES AGUAS, J.; QUINTERO DURÁN, R. y ISAACS ECHEVERRY, C. 2001. Zonificación Agroecológica para el Cultivo de Caña de Azúcar en el Valle del río Cauca. Tercera Aproximación. Serie Técnica N° 29. Centro de Investigación de la Caña de Azúcar CENICAÑA. Cali, Colombia. p.p 5, 8, 25, 37
18. QUINTERO DURÁN., R.; GARCÍA SÁNCHEZ., A.; CORTÉS LOMBANA., A.; MUÑOZ ARBOLEDA., F.; TORRES AGUAS., J.; CARBONELL GONZÁLEZ., J. y OSORIO MURILLO., C. 2008. Grupos Homogéneos de Suelos del Área dedicada al Cultivo de Caña de Azúcar en el Valle del Rio Cauca (segunda aproximación). Serie Técnica N° 37. Centro de Investigación de la Caña de Azúcar CENICAÑA. Cali, Colombia. p.p 1, 18-19
19. ISAACS, C.; VICTORIA, J.I.; ARCE, C.A. y LÓPEZ, L.O. 2008. Agricultura Específica por Sitio Fase III. Informe Técnico Final. Centro de Investigación de la Caña de Azúcar CENICAÑA. Cali, Colombia. p.p 83, 87
20. CENICAÑA. 2007. Zonificación Agroecológica, cuarta aproximación. Carta Trimestral, V.29, N°4. Centro de Investigación de la Caña de Azúcar CENICAÑA. Cali, Colombia. p.p 3
21. JARAMILLO J, D. 2001. Introducción a la Ciencia del Suelo. Universidad Nacional de Colombia. Escuela de Geociencias. Medellín. p.p 189-190, 553-556
22. LEIVA, F.R. 2003. Aproximación al Manejo Sitio-Específico del Suelo para una Agricultura Sostenible y Competitiva en Colombia. Facultad de Agronomía, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá. p.p 2-3
23. BLACKMORE, S. 2007. Agricultura de Precisión –AP-. Revista Nacional de Agricultura. No. 949. p.p 20-27
24. QUEZADA L, C. 2008. Aplicación de la Espectroscopia de Reflectancia Infrarrojo Cercano (NIRS) en el Análisis de Suelos. Universidad de Concepción. Facultad de Agronomía, Departamento de Suelos y Recursos Naturales. Revista Ciencia, No. 21. p.p 77-82

25. LARRAHONDO, J.E.; PALAU, F.J. y RAMIREZ, C. 2001. Espectroscopía de Infrarrojo Cercano – NIR. Principios Generales. Serie Procesos Industriales No. 1. Centro de Investigación de la Caña de Azúcar CENICAÑA. Cali, Colombia. p.p 7-16
26. JIMÉNEZ TORRES, P.A. 2007. Identificación de Harinas de Yuca (*Manihot esculenta* CRANTZ) con Alto Contenido Proteico mediante Espectroscopia de Infrarrojo Cercano (NIRS). Universidad Nacional de Colombia, Sede Palmira. p.p 10
27. SKOOG, D.; HOLLER, F. y NIEMAN, T. 2001. Principios de Análisis Instrumental. Quinta Edición. McGraw-Hill. Interamericana de España S.A. p.p 411-416, 456-457
28. POU SABOYA, N. 2002. Análisis de Control de Preparados Farmacéuticos mediante Espectroscopía en el Infrarrojo Próximo. Memoria para optar al Título de Doctora en Ciencias Químicas. Universidad Autónoma de Barcelona. Bellaterra, España. p.p 7-23
29. ALCALÀ BERNARDEZ, M. 2006. Utilización de la Espectroscopía NIR en el Control Analítico de la Industria Farmacéutica. Desarrollos Iniciales en PAT. Tesis Doctoral. Universidad Autónoma de Barcelona. Bellaterra, España. p.p 8-18
30. PASQUINI, C. 2003. Near Infrared Spectroscopy: Fundamentals, Practical Aspects and Analytical Applications. Review. Universidade Estadual de Campinas, Brazil. p.p 200-203. En: J. Braz. Chem. Soc., Vol 14, No.2, 198-219, 2003.
31. ALOMAR, D. y FUCHSLOCHER, R. 1998. Fundamentos de la Espectroscopia de Reflectancia en el Infrarrojo Cercano (NIRS) como Método de Análisis de Forrajes. *Agro sur*, vol. 26, No.1, p.p 88-104.
32. HERNÁNDEZ HIERRO, J.M. 2008. Utilización de la Tecnología NIRS con Sonda de Fibra óptica para el Control de Calidad de Alfalfa. Memoria para Alcanzar el grado de Doctor en Ciencias Químicas. Universidad de Salamanca. p.p 12-25

33. COZZOLINO, D. 2002. Uso de la Espectroscopia de Reflectancia en el Infrarrojo Cercano (NIRS) en el Análisis para Alimentos. Revista Agrociencia. Vol. 6 (2). p.p 25-32.
34. COZZOLINO, D.; FASSIO, A. y FERNÁNDEZ, E. 2003. Uso de la Espectroscopia de Reflectancia en el Infrarrojo Cercano para el Análisis de Calidad de Ensilaje de Maíz. Agric. Téc., Vol. 63, No. 4. p.p 387-393
35. VÁSQUEZ, D. R.; ABADÍA, B. y ARREAZA, L. C. 2004. Aplicación de la Espectroscopía de Reflectancia en el Infrarrojo Cercano (NIRS) para la Caracterización Nutricional del Pasto Guinea y del Grano de Maíz. Revista Corpoica, Vol. 5, No 1. p.p 49-55.
36. NÚÑEZ, S. 2007. La Tecnología NIRS y Posibilidades de Uso en la Industria Agroalimentaria. NIRSoluciones. Encuentro Euromediterráneo Foodmed. AMED, Parque Tecnológico de Andalucía. En: [http://www.nirsoluciones.com/prensa/2007\\_eurofoodmed.pdf](http://www.nirsoluciones.com/prensa/2007_eurofoodmed.pdf).
37. JANIK, L.J.; MERRY, R.H. y SKJEMSTAD, J.O. 1998. Can Mid Infrared Diffuse Reflectance Analysis Replace Soil Extractions? Australian Journal of Experimental Agriculture, 38: 681-696.
38. MALLEY, D.F.; WILLIAMS, P.; McLAUGHLIN, J. y ATKINSON, T. 2007. Rapid Analysis of Moisture, Organic Matter and Carbonate in Peat Cores from Northern Ontario by Near-Infrared Spectroscopy. Research Institute, Ontario Ministry of Natural Resources, Manitoba. p.p 1-10
39. TORRES N., A. y VILLATE B., E. 2001. Topografía. 4ª Edición. Escuela Colombiana de Ingeniería. Pearson Educación de Colombia Ltda. Bogotá, D.C., Colombia. p.p 415-419
40. POZO R., A.; RIBEIRO, A.; GARCÍA A., M.; GARCÍA L.; GUINEA A. y SANDOVAL F. Sistema de Posicionamiento Global (GPS): Descripción, Análisis de Errores, Aplicaciones y Futuro. Instituto de Automática Industrial, Dpto. de Tecnología Electrónica. Universidad de Málaga, Madrid. p.p 2-5

41. Introducción al Sistema GPS (Sistema de Posicionamiento Global). 1999. Versión 1. Suiza. p.p 6. En: [www.leica-geosystems.com](http://www.leica-geosystems.com).
42. ROMERO P., I.; NÚÑEZ S., D. y LEÓN A., R. 2004. El Sistema de Posicionamiento Global: Enfoques. Facultad de Agronomía, Departamento de Agricultura, Universidad Camilo Cienfuegos, Matanzas. p.p 4-16
43. \_\_\_\_\_. Sistema de Gestión de Calidad según Norma ISO 9001/2008. Procedimiento e Instructivos del Laboratorio de Química. Centro de Investigación de la Caña de Azúcar CENICAÑA. Cali, Colombia. 2009.
44. BRAVO R, I. GIRALDO, E. 2003. Manual de Prácticas de Química Agrícola: Análisis de Suelos. Universidad del Cauca. p.p 66-70.
45. CALERO SALAZAR, L. 1987. Comparación de Seis Métodos de Extracción de Fósforo disponible para el Cultivo de la Caña de Azúcar en tres Suelos. Facultad de Ciencias Agropecuarias, Universidad Nacional de Colombia, Palmira. p.p 14-67.
46. CONTRERAS, F.; PAOLINI, J. y RIVERO, C. 2005. Efecto de la Adición de Enmiendas Orgánicas sobre la Actividad de las Enzimas de la Fosfomono- esterasa ácida y Arilsulfatasa en Suelos del Municipio Rivas Dávila (Estado Mérida). Rev. Fac. Agron. (Maracay) 31: 53-66.
47. GARBISU, C.; BECERRIL, J.M.; EPELDE, L. y ALKORTA, L. 2007. Bioindicadores de la Calidad del Suelo: Herramienta Metodológica para la Evaluación de la Eficacia de un proceso Fitorremediador. Ecosistemas. Revista Científica y Técnica de Ecología y Medio Ambiente. p.p. 44-49.
48. QUINTERO DURÁN., R. 2004. Fertilización de la Caña de Azúcar. Centro de Investigación de la Caña de Azúcar de Colombia. Documento de Trabajo, No. 531. Cali, Colombia. p.p 6

- 49.UNDURRUAGA D, P. 2000. Conceptos de Fertilidad, Recomendaciones de Fertilización en Suelos de la Xª Región. Instituto de Investigaciones Agropecuarias INIA, Centro Regional de Investigación Remehue. Serie Actas No. 4. p.p 22. En: Seminario Taller para Productores: “Técnicas de Diagnóstico de Fertilidad del Suelo, Fertilización de Praderas, Cultivos y Mejoramiento de Praderas”
- 50.FOX, R. y KAMPRATH L. 1970. Phosphate Sorption Isotherms for Evaluating the Phosphate Requeriments of Soils. Soil Science Society American 34: 902-907
- 51.GARAVITO, F. 1974. Propiedades Químicas de los Suelos. Instituto Geográfico Agustín Codazzi. Vol 10. No 11. Bogotá.
- 52.QUINTERO DURÁN., R. 2004. Efectos de la Aplicación de Elementos Menores en Caña de Azúcar en Suelos del Valle del río Cauca. Centro de Investigación de la Caña de Azúcar de Colombia. Documento de Trabajo, No. 530. Cali, Colombia. p.p 3-4
- 53.MUÑOZ A, F. y QUINTERO D., R. 2009. Importancia de la Fuente de Nitrógeno sobre la Producción y Nutrición de la Caña de Azúcar en Suelos con Exceso de Humedad. Centro de Investigación de la Caña de Azúcar de Colombia. Carta Trimestral, Nos. 1 y 2. Cali, Colombia. p.p 23-26
- 54.HUE, N. V.; VEGA, S. y SILVA, J.A. 2001. Manganese Toxicity in a Hawaiian Oxisol Affected by Soil pH and Organic Amendments. Dep. of Tropical Plant and Soil Science, University of Hawaii. Soil Science Society American 65: 153-160
- 55.ZAPATA H, R.D. 2009. Conferencia: La Materia Orgánica del Suelo. Origen y Propiedades. TECNICAÑA. Memorias: Seminario Internacional de Fertilización y Nutrición de la Caña de Azúcar. Cali, Colombia. p.p 43-44.

## ANEXOS

### ANEXO 1. Resultados de las propiedades físicas y químicas evaluadas en cada suerte (lote).

**Tabla 1. Resultados de las propiedades físicas y químicas evaluadas en la hacienda Peralonso, suerte 121, al inicio del cultivo (T1).**

Muestra	pH	MO	N	C/N	P	K	Na	Ca	Mg	CIC	Ca/Mg	Ca+Mg	Fe	Cu	Mn	Zn	B	Arena	Arcilla	Limo	Textura	Da
		%			ppm	meq/100g suelo						K	ppm					%				g/cm <sup>3</sup>
1	7,2	3,55	0,080	25,74	24,61	1,14	0,19	20,01	14,37	24,4	1,39	30,16	30,88	1,79	159,11	1,92	0,21	15,78	47,82	36,4	Ar	1,08
2	7,1	3,31	0,080	24,00	13,70	0,41	0,18	12,83	12,57	29,4	1,02	61,95	27,92	3,08	91,47	1,03	0,23	9,78	51,82	38,4	Ar	1,31
3	7,3	3,12	0,044	41,13	18,91	0,68	0,20	18,82	13,97	29,2	1,35	48,22	19,64	1,50	96,13	1,62	0,25	11,78	47,82	40,4	Ar-L	1,10
4	7,7	3,11	0,084	21,48	16,92	0,34	0,19	12,97	9,40	25,2	1,38	65,79	38,16	2,44	94,83	0,99	0,31	13,78	45,82	40,4	Ar-L	1,20
5	7,0	3,17	0,044	41,79	21,90	0,52	0,17	14,52	9,73	25,8	1,49	46,63	37,28	2,25	103,01	2,11	0,33	19,78	39,82	40,4	F-Ar-L	1,34
6	7,3	3,19	0,140	13,22	13,39	0,29	0,20	12,48	9,00	28,8	1,39	74,07	57,80	3,04	106,85	1,22	0,38	15,78	43,82	40,4	Ar-L	1,18
7	6,5	3,05	0,112	15,80	24,99	0,94	0,24	17,43	12,96	15,4	1,34	32,33	40,04	2,33	127,40	2,41	0,22	10,18	51,42	38,4	Ar	1,23
8	6,8	3,20	0,120	15,47	24,62	0,35	0,20	12,41	9,94	26,2	1,25	63,86	43,20	2,64	60,68	1,33	0,23	13,78	49,82	36,4	Ar	1,34
9	6,7	3,00	0,060	29,00	18,75	0,70	0,22	18,01	12,25	15,8	1,47	43,23	29,64	1,62	113,32	1,69	0,31	8,18	51,42	40,4	Ar-L	1,08
10	7,3	2,93	0,096	17,70	18,39	0,34	0,18	13,54	10,23	28,6	1,32	69,91	34,76	2,36	84,63	0,98	0,27	9,78	51,82	38,4	Ar	1,18
11	6,8	3,12	0,076	23,81	14,11	0,45	0,23	17,33	13,94	17,0	1,24	69,49	36,88	2,12	78,42	1,73	0,23	14,18	49,42	36,4	Ar	1,16
12	7,5	3,12	0,088	20,57	12,36	0,20	0,19	13,87	10,79	29,6	1,29	123,30	43,60	2,36	128,13	1,05	0,23	15,78	51,82	32,4	Ar	1,14
13	7,7	3,00	0,092	18,91	11,92	0,67	0,19	24,00	13,32	25,0	1,80	55,70	7,64	0,44	113,1	0,91	0,19	13,78	47,82	38,4	Ar	1,12
14	7,3	3,11	0,056	32,21	11,73	0,18	0,19	13,61	12,39	31,0	1,10	144,44	28,08	1,81	73,65	1,01	0,30	9,78	53,82	36,4	Ar	0,98
15	7,6	3,05	0,072	24,57	13,81	0,73	0,22	19,70	14,46	28,6	1,36	46,79	13,36	1,11	94,21	1,34	0,26	9,78	47,82	42,4	Ar-L	1,23
16	6,9	3,20	0,072	25,78	19,29	0,66	0,22	12,91	11,57	32,6	1,12	37,09	34,48	2,72	64,44	1,55	0,23	7,78	59,82	32,4	Ar	0,95
17	7,0	3,82	0,076	29,15	32,08	1,60	0,25	19,71	13,69	24,6	1,44	20,88	18,16	1,50	105,11	2,01	0,15	7,78	53,82	38,4	Ar	1,13
18	6,8	3,17	0,224	8,21	26,25	0,64	0,24	13,39	11,58	30,4	1,16	39,02	34,20	2,12	122,89	1,42	0,21	11,78	55,82	32,4	Ar	1,13
19	6,6	3,15	0,076	24,04	13,87	0,81	0,30	19,10	15,79	18,2	1,21	43,07	26,80	1,51	105,33	1,93	0,22	6,18	59,42	34,4	Ar	0,96
20	6,8	3,19	0,128	14,46	12,05	0,36	0,22	13,94	12,80	35,4	1,09	74,28	25,64	2,04	66,88	1,11	0,22	7,78	61,82	30,4	Ar	1,17
21	6,5	3,21	0,108	17,24	13,41	0,77	0,26	18,11	14,94	19,4	1,21	42,92	28,88	1,33	103,21	1,85	0,14	6,18	59,42	34,4	Ar	1,22
22	7,5	3,27	0,080	23,71	18,22	0,11	0,23	13,94	10,08	25,6	1,38	218,36	29,92	2,04	75,63	1,02	0,26	13,78	49,82	36,4	Ar	1,22
23	7,0	2,96	0,028	61,32	20,41	0,58	0,24	17,74	14,17	14,6	1,25	55,02	30,92	1,42	110,41	1,44	0,19	16,58	49,42	34	Ar	1,23
24	7,6	2,77	0,028	57,38	11,22	0,15	0,24	13,64	11,57	26,8	1,18	168,07	29,00	1,76	84,92	0,79	0,23	11,78	53,82	34,4	Ar	1,20
25	7,4	3,32	0,076	25,34	10,97	0,33	0,25	18,90	14,23	16,6	1,33	100,39	15,64	1,30	120,23	1,43	0,23	11,78	53,82	34,4	Ar	1,14
26	7,3	3,05	0,048	36,86	9,92	0,07	0,21	13,95	12,51	28,8	1,12	378,00	26,52	1,64	66,66	0,84	0,28	13,78	57,82	28,4	Ar	1,14
27	7,7	3,19	0,084	22,03	12,95	0,28	0,21	20,93	13,60	26,0	1,54	123,32	11,64	0,92	84,20	1,12	0,21	15,78	47,82	36,4	Ar	1,13
28	7,4	3,15	0,056	32,63	9,97	0,11	0,23	13,83	13,53	30,0	1,02	248,73	22,60	1,44	81,59	0,84	0,27	9,78	57,82	32,4	Ar	1,23
29	6,9	3,51	0,048	42,42	12,48	0,49	0,28	19,40	15,86	27,0	1,22	71,96	13,72	1,29	92,11	1,82	0,16	7,78	55,82	36,4	Ar	1,19

**Tabla 1. (Continuación).**

Muestra	pH	MO	N	C/N	P	K	Na	Ca	Mg	CIC	Ca/Mg	Ca+Mg	Fe	Cu	Mn	Zn	B	Arena	Arcilla	Limo	Textura	Da
		%			ppm	meq/100g suelo						K	ppm					%				g/cm <sup>3</sup>
30	7,2	3,12	0,080	22,62	13,48	0,34	0,24	13,90	11,91	31,4	1,17	75,91	31,52	2,42	103,3	1,25	0,22	11,78	57,82	30,4	Ar	1,18
31	6,8	3,18	0,028	65,88	11,53	0,52	0,32	19,71	15,18	17,2	1,30	67,10	20,08	1,22	99,45	2,33	0,25	6,58	57,42	36	Ar	1,14
32	7,4	3,26	0,040	47,27	9,78	0,07	0,25	13,34	13,52	29,2	0,99	383,71	21,56	1,32	71,43	0,75	0,31	7,78	55,82	36,4	Ar	1,17
33	6,7	3,25	0,084	22,44	9,87	0,41	0,29	18,85	17,00	17,4	1,11	87,44	20,00	1,34	102,00	1,61	0,21	4,58	59,42	36	Ar	1,14
34	7,2	3,19	0,096	19,27	8,19	0,11	0,26	14,32	13,87	33,0	1,03	256,27	19,04	1,36	75,23	0,93	0,23	7,78	59,82	32,4	Ar	1,12
35	6,8	3,35	0,088	22,08	11,02	0,49	0,31	20,01	15,41	16,0	1,30	72,29	25,80	1,31	93,13	2,25	0,16	6,58	61,42	32	Ar	1,10
36	7,3	3,00	0,072	24,17	10,87	0,11	0,24	14,65	13,11	33,4	1,12	252,36	21,72	1,44	76,95	0,85	0,24	7,78	57,82	34,4	Ar	1,17
37	7,2	3,31	0,076	25,26	9,39	0,36	0,27	21,4	15,37	30,6	1,39	102,14	12,52	1,21	104,14	1,54	0,18	9,78	55,82	34,4	Ar	1,23
38	6,8	3,44	0,096	20,78	8,46	0,17	0,28	15,27	15,24	37,0	1,00	179,47	20,32	1,52	67,72	1,15	0,17	7,78	63,82	28,4	Ar	0,98
39	7,3	3,20	0,052	35,70	9,58	0,25	0,30	19,90	17,01	33,4	1,17	147,64	10,96	0,93	68,78	1,31	0,20	7,78	53,82	38,4	Ar	1,03
40	7,5	3,20	0,072	25,78	8,53	0,06	0,23	14,41	14,38	35,0	1,00	479,83	17,00	0,88	66,74	0,71	0,27	7,78	57,82	34,4	Ar	1,22
41	7,6	3,19	0,068	27,21	11,60	0,30	0,23	21,42	15,70	28,6	1,36	123,73	10,44	0,85	80,52	1,11	0,21	7,78	47,82	44,4	Ar-L	1,12
42	8,0	2,90	0,040	42,05	9,56	0,08	0,32	16,01	12,93	28,8	1,24	361,75	15,92	0,48	86,33	0,55	0,28	9,78	51,82	38,4	Ar	1,18
43	7,1	3,10	0,032	56,19	19,85	0,05	0,33	19,70	16,49	16,6	1,19	723,80	10,44	1,22	87,31	1,22	0,25	8,58	55,42	36	Ar	1,13
44	7,6	3,13	0,052	34,91	10,97	0,05	0,22	16,33	12,61	26,2	1,30	578,80	16,84	0,68	63,75	0,65	0,20	11,78	55,82	32,4	Ar	1,10
45	7,0	3,53	0,032	63,99	11,31	0,52	0,31	23,81	17,05	20,0	1,40	78,58	15,60	0,64	46,33	1,22	0,13	10,58	57,42	32	Ar	1,11
46	7,3	2,91	0,048	35,17	9,41	0,14	0,24	15,33	13,45	33,2	1,14	205,57	17,96	1,28	75,59	0,91	0,22	9,78	59,82	30,4	Ar	1,13
47	6,5	3,68	0,044	48,51	10,66	0,62	0,35	22,33	17,53	23,0	1,27	64,29	34,56	1,11	102,1	1,81	0,09	4,58	65,42	30	Ar	0,95
48	6,8	3,30	0,084	22,79	9,26	0,16	0,28	15,49	12,48	35,0	1,24	174,81	23,56	2,00	70,16	1,34	0,14	7,78	63,82	28,4	Ar	1,07
49	7,2	3,27	0,100	18,97	7,29	0,27	0,31	25,21	17,32	27,4	1,46	157,52	13,76	1,22	96,44	1,32	0,15	7,78	55,82	36,4	Ar	1,05
50	7,0	3,15	0,032	57,10	6,26	0,05	0,32	16,40	14,80	36,8	1,11	624,00	15,28	1,36	61,90	0,82	0,16	5,78	67,82	26,4	Ar	0,89
51	7,3	3,09	0,088	20,37	9,50	0,23	0,31	25,00	17,36	28,6	1,44	184,17	11,24	0,91	72,30	1,24	0,15	7,78	57,82	34,4	Ar	1,13
52	7,5	3,01	0,036	48,50	10,10	0,11	0,35	17,01	13,74	35,0	1,24	279,55	14,76	0,84	62,25	0,77	0,10	9,78	59,82	30,4	Ar	0,97
53	7,4	3,12	0,084	21,54	11,85	0,34	0,31	23,72	14,51	24,2	1,63	112,44	12,44	0,85	89,63	1,45	0,11	11,78	51,82	36,4	Ar	0,98
54	7,7	2,96	0,044	39,02	10,10	0,05	0,32	17,08	12,13	32,0	1,41	584,20	17,92	0,96	94,75	0,74	0,22	11,78	55,82	32,4	Ar	1,16
55	7,3	3,17	0,044	41,79	12,22	0,46	0,41	26,64	14,43	22,6	1,85	89,28	22,08	0,9	91,01	1,33	0,12	14,58	53,42	32	Ar	1,22
56	7,6	2,92	0,040	42,34	9,09	0,06	0,38	17,53	12,55	37,6	1,40	501,33	21,24	1,24	84,86	0,78	0,16	13,78	57,82	28,4	Ar	0,93
57	6,9	3,37	0,048	40,72	9,31	0,49	0,48	27,40	16,70	23,0	1,64	90,00	18,00	0,82	80,12	1,20	0,10	4,58	65,42	30	Ar	1,07
58	7,3	3,13	0,056	32,42	7,58	0,07	0,28	16,55	13,95	39,8	1,19	435,71	16,76	1,04	67,63	0,76	0,17	5,78	65,82	28,4	Ar	1,11
59	6,7	3,19	0,052	35,58	9,71	0,48	0,34	23,11	17,00	21,6	1,36	83,56	18,08	1,01	73,13	1,14	0,11	6,58	65,42	28	Ar	1,04
60	7,5	2,83	0,044	37,31	6,17	0,04	0,27	15,78	13,51	27,4	1,17	732,25	20,04	1,36	104,60	0,76	0,34	7,78	59,82	32,4	Ar	1,14

**Tabla 2. Resultados de las propiedades físicas y químicas evaluadas en la hacienda Peralonso, suerte 121, después de la segunda fertilización (T2).**

Muestra	pH	N		C/N	P ppm	K	Na	Ca	Mg	CIC	Ca/Mg	Ca+Mg K	Fe	Cu	Mn	Zn	B	Arena	Arcilla	Limo	Textura	Da g/cm <sup>3</sup>
		%																				
1	7,0	2,91	0,112	15,07	14,42	0,49	0,24	10,63	9,00	28,4	1,18	40,06	5,83	1,52	115,82	0,88	0,19	15,78	47,82	36,4	Ar	1,08
2	6,8	3,10	0,128	14,05	12,88	0,42	0,25	10,50	9,06	29,6	1,16	46,57	3,71	1,22	108,80	0,84	0,21	9,78	51,82	38,4	Ar	1,31
3	7,2	3,04	0,104	16,96	14,71	0,23	0,26	10,89	9,73	27,8	1,12	89,65	3,91	1,22	100,71	0,84	0,29	11,78	47,82	40,4	Ar-L	1,10
4	7,8	2,92	0,088	19,25	11,90	0,27	0,35	11,00	8,94	24,2	1,23	73,85	3,50	0,93	112,20	0,72	0,28	13,78	45,82	40,4	Ar-L	1,20
5	7,0	2,58	0,088	17,01	14,42	0,16	0,25	9,95	8,49	24,6	1,17	115,25	9,16	1,79	91,30	1,08	0,34	19,78	39,82	40,4	F-Ar-L	1,34
6	7,8	2,63	0,072	21,19	10,63	0,22	0,28	11,02	8,96	25,4	1,23	90,82	5,27	1,32	116,73	0,76	0,34	15,78	43,82	40,4	Ar-L	1,18
7	6,5	3,04	0,116	15,20	25,66	0,49	0,23	10,59	9,34	28,0	1,13	40,67	4,35	1,41	102,44	1,24	0,25	10,18	51,42	38,4	Ar	1,23
8	6,6	2,88	0,096	17,40	21,07	0,40	0,24	10,76	9,71	29,2	1,11	51,18	4,59	1,38	82,15	1,12	0,23	13,78	49,82	36,4	Ar	1,34
9	7,3	3,07	0,104	17,12	13,29	0,33	0,22	12,86	10,12	28,8	1,27	69,64	2,83	1,07	91,70	0,75	0,26	8,18	51,42	40,4	Ar-L	1,08
10	7,6	3,42	0,080	24,80	9,95	0,25	0,22	13,23	9,37	25,2	1,41	90,40	1,76	0,82	64,56	0,54	0,30	9,78	51,82	38,4	Ar	1,18
11	7,2	2,95	0,064	26,74	13,31	0,17	0,18	8,81	8,23	22,4	1,07	100,24	7,76	1,60	85,2	0,71	0,23	14,18	49,42	36,4	Ar	1,16
12	7,4	3,61	0,104	20,13	12,19	0,32	0,21	11,02	9,64	28,8	1,14	64,56	3,55	1,12	103,01	0,75	0,19	15,78	51,82	32,4	Ar	1,14
13	7,5	3,34	0,104	18,63	11,78	0,33	0,22	11,41	9,75	20,4	1,17	64,12	3,13	0,95	121,31	0,62	0,20	13,78	47,82	38,4	Ar	1,12
14	7,2	3,59	0,112	18,59	10,09	0,47	0,20	11,19	10,08	27,8	1,11	45,26	2,95	1,01	128,30	0,69	0,22	9,78	53,82	36,4	Ar	0,98
15	7,4	3,4	0,112	17,61	11,60	0,36	0,24	10,44	10,10	28,8	1,03	57,06	3,67	1,20	106,70	0,73	0,23	9,78	47,82	42,4	Ar-L	1,23
16	6,9	3,49	0,088	23,00	16,68	0,48	0,25	10,56	9,75	28,8	1,08	42,31	3,51	1,31	79,45	0,87	0,24	7,78	59,82	32,4	Ar	0,95
17	6,8	3,23	0,120	15,61	19,25	0,48	0,26	10,74	9,73	34,2	1,10	42,65	2,65	1,12	72,76	0,96	0,19	7,78	53,82	38,4	Ar	1,13
18	6,7	3,36	0,112	17,40	22,36	0,45	0,23	10,79	9,32	31,4	1,16	44,69	4,04	1,34	120,91	1,08	0,14	11,78	55,82	32,4	Ar	1,13
19	6,8	3,13	0,128	14,18	12,16	0,39	0,28	11,44	10,04	32,8	1,14	55,08	2,96	1,32	90,18	0,86	0,14	6,18	59,42	34,4	Ar	0,96
20	6,7	3,35	0,132	14,72	11,70	0,42	0,24	11,44	10,56	33,0	1,08	52,38	2,30	1,07	82,75	0,87	0,16	7,78	61,82	30,4	Ar	1,17
21	6,5	3,23	0,088	21,29	10,66	0,39	0,27	10,82	10,71	28,8	1,01	55,21	2,46	1,19	89,73	0,81	0,21	6,18	59,42	34,4	Ar	1,22
22	7,4	3,11	0,072	25,05	11,9	0,27	0,24	11,93	9,79	31,0	1,22	80,44	2,05	0,78	67,97	0,56	0,18	13,78	49,82	36,4	Ar	1,22
23	7,7	2,78	0,072	22,40	10,68	0,26	0,23	12,35	9,65	31,0	1,28	84,62	2,02	0,77	59,04	0,50	0,22	16,58	49,42	34	Ar	1,23
24	7,6	2,78	0,072	22,40	9,53	0,27	0,26	11,62	9,91	27,4	1,17	79,74	2,36	0,85	86,77	0,51	0,22	11,78	53,82	34,4	Ar	1,20
25	7,3	3,14	0,088	20,70	10,05	0,34	0,25	12,55	10,41	30,6	1,21	67,53	2,36	0,94	103,39	0,66	0,23	11,78	53,82	34,4	Ar	1,14
26	7,2	2,98	0,072	24,01	9,63	0,24	0,23	12,12	10,89	30,6	1,11	95,88	2,32	0,94	116,50	0,67	0,17	13,78	57,82	28,4	Ar	1,14
27	7,2	3,03	0,088	19,97	11,49	0,25	0,26	12,68	10,95	31,8	1,16	94,52	1,28	0,63	86,55	0,60	0,17	15,78	47,82	36,4	Ar	1,13
28	7,0	3,13	0,088	20,63	10,26	0,28	0,28	11,29	11,18	31,4	1,01	80,25	1,96	0,89	106,67	0,69	0,18	9,78	57,82	32,4	Ar	1,23
29	6,9	3,02	0,072	24,33	8,12	0,32	0,30	11,53	11,38	35,6	1,01	71,59	2,04	0,97	75,08	0,76	0,26	7,78	55,82	36,4	Ar	1,19
30	7,7	3,04	0,072	24,49	8,17	0,21	0,38	12,53	11,27	33,8	1,11	113,33	1,04	0,50	93,55	0,42	0,14	11,78	57,82	30,4	Ar	1,18
31	7,4	3,11	0,080	22,55	10,82	0,25	0,34	11,62	10,61	29,2	1,10	88,92	2,48	0,99	86,34	0,66	0,15	6,58	57,42	36	Ar	1,14
32	7,3	3,09	0,072	24,89	8,51	0,20	0,35	12,01	11,89	28,8	1,01	119,50	1,28	0,71	81,09	0,52	0,22	7,78	55,82	36,4	Ar	1,17
33	6,7	2,94	0,080	21,32	11,19	0,20	0,28	11,53	11,37	33,0	1,01	114,50	1,65	0,81	87,43	0,74	0,24	4,58	59,42	36	Ar	1,14
34	6,8	3,18	0,072	25,62	9,16	0,23	0,29	12,13	11,39	30,0	1,06	102,26	1,55	0,82	86,34	0,66	0,21	7,78	59,82	32,4	Ar	1,12
35	7,2	2,90	0,064	26,28	9,07	0,24	0,27	12,34	10,34	30,6	1,19	94,50	1,44	0,75	86,12	0,56	0,24	6,58	61,42	32	Ar	1,10
36	7,5	2,82	0,056	29,21	9,72	0,28	0,27	13,04	10,89	30,4	1,20	85,46	1,46	0,72	89,84	0,54	0,26	7,78	57,82	34,4	Ar	1,17
37	6,8	3,36	0,092	21,18	8,68	0,29	0,28	12,39	10,82	32,0	1,15	80,03	2,43	0,98	97,48	0,70	0,17	9,78	55,82	34,4	Ar	1,23
38	6,6	3,34	0,112	17,30	10,49	0,32	0,37	12,93	11,67	32,0	1,11	76,88	2,01	0,87	75,04	0,76	0,12	7,78	63,82	28,4	Ar	0,98



**Tabla 2. (Continuación).**

Muestra	pH	MO	N	C/N	P	K	Na	Ca	Mg	CIC	Ca/Mg	Ca+Mg	Fe	Cu	Mn	Zn	B	Arena	Arcilla	Limo	Textura	Da
		%			ppm	meq/100g suelo						K	ppm					%				g/cm <sup>3</sup>
39	7,2	3,39	0,132	14,90	8,22	0,24	0,30	11,33	11,37	31,4	1,00	94,58	1,63	0,76	69,96	0,60	0,16	7,78	53,82	38,4	Ar	1,03
40	6,9	3,07	0,100	17,81	9,66	0,17	0,32	10,23	11,71	30,4	0,87	129,06	1,70	0,90	70,52	0,53	0,25	7,78	57,82	34,4	Ar	1,22
41	7,4	3,07	0,096	18,55	10,70	0,25	0,31	11,90	11,25	32,2	1,06	92,60	1,41	0,63	77,24	0,54	0,17	7,78	47,82	44,4	Ar-L	1,12
42	7,9	3,25	0,088	21,42	8,95	0,25	0,37	13,77	11,26	27,2	1,22	100,12	0,84	0,35	90,84	0,34	0,18	9,78	51,82	38,4	Ar	1,18
43	7,2	3,53	0,104	19,69	13,38	0,40	0,30	11,32	10,05	33,4	1,13	53,43	3,30	1,16	104,4	0,91	0,10	8,58	55,42	36	Ar	1,13
44	7,4	2,79	0,096	16,86	11,21	0,17	0,30	12,51	10,25	25,4	1,22	133,88	1,95	0,84	66,92	0,48	0,27	11,78	55,82	32,4	Ar	1,10
45	7,5	3,17	0,096	19,15	9,07	0,23	0,29	13,30	11,02	30,2	1,21	105,74	1,24	0,53	80,76	0,43	0,13	10,58	57,42	32	Ar	1,11
46	7,2	3,05	0,096	18,43	8,92	0,24	0,29	12,94	11,27	32,6	1,15	100,88	1,48	0,78	83,28	0,51	0,15	9,78	59,82	30,4	Ar	1,13
47	6,7	3,32	0,104	18,52	7,66	0,24	0,34	12,55	11,23	34,6	1,12	99,08	2,28	0,98	80,36	0,74	0,13	4,58	65,42	30	Ar	0,95
48	6,4	3,30	0,112	17,09	8,97	0,26	0,30	13,07	11,38	34,4	1,15	94,04	2,64	1,17	78,68	0,98	0,17	7,78	63,82	28,4	Ar	1,07
49	6,8	3,05	0,096	18,43	7,07	0,23	0,34	14,29	11,61	36,2	1,23	112,61	3,19	1,12	98,68	0,68	0,12	7,78	55,82	36,4	Ar	1,05
50	6,7	3,26	0,112	16,88	6,21	0,20	0,40	14,59	11,90	36,6	1,23	132,45	2,62	0,95	75,72	0,58	0,08	5,78	67,82	26,4	Ar	0,89
51	7,3	2,98	0,112	15,43	7,82	0,17	0,35	14,70	11,64	31,4	1,26	154,94	1,38	0,72	75,76	0,49	0,20	7,78	57,82	34,4	Ar	1,13
52	7,4	3,07	0,104	17,12	8,27	0,26	0,36	15,07	11,57	35,0	1,30	102,46	1,34	0,55	58,6	0,50	0,04	9,78	59,82	30,4	Ar	0,97
53	7,6	2,97	0,096	17,95	11,26	0,25	0,38	14,97	11,26	33,2	1,33	104,92	3,49	0,65	80,12	0,50	0,03	11,78	51,82	36,4	Ar	0,98
54	7,6	2,89	0,104	16,12	7,73	0,24	0,32	14,78	10,72	31,4	1,38	106,25	1,12	0,46	71,24	0,42	0,11	11,78	55,82	32,4	Ar	1,16
55	7,8	2,90	0,080	21,03	10,49	0,23	0,36	14,48	9,42	27,2	1,54	103,91	3,15	0,86	106,84	0,58	0,16	14,58	53,42	32	Ar	1,22
56	7,5	3,13	0,100	18,16	8,99	0,24	0,40	15,65	11,42	34,8	1,37	112,79	7,10	0,75	80,88	0,51	0,01	13,78	57,82	28,4	Ar	0,93
57	7,6	2,83	0,088	18,65	6,82	0,20	0,40	16,09	11,66	33,8	1,38	138,75	1,64	0,71	90,6	0,47	0,16	4,58	65,42	30	Ar	1,07
58	6,7	3,30	0,096	19,94	7,46	0,21	0,34	14,25	11,66	33,8	1,22	123,38	1,81	0,95	70,76	0,58	0,06	5,78	65,82	28,4	Ar	1,11
59	7,2	3,11	0,096	18,79	5,73	0,19	0,36	13,95	11,55	34,8	1,21	134,21	1,46	0,87	64,28	0,51	0,12	6,58	65,42	28	Ar	1,04
60	7,2	2,99	0,120	14,45	6,63	0,23	0,32	14,37	11,34	32,8	1,27	111,78	2,48	0,99	81,56	0,62	0,15	7,78	59,82	32,4	Ar	1,14

**Tabla 3. Resultados de las propiedades físicas y químicas evaluadas en la hacienda Santa Elena, suerte 80, al inicio del cultivo (T1).**

Muestra	pH	MO	N	C/N	P	K	Na	Ca	Mg	CIC	Ca/Mg	Ca+Mg	Fe	Cu	Mn	Zn	B	Arena	Arcilla	Limo	Textura	Da g/cm <sup>3</sup>
		%			ppm	meq/100g suelo						K						ppm				
1	6,9	3,00	0,036	48,34	16,05	0,26	0,23	14,41	6,96	16,0	2,07	82,19	89,68	1,13	168,90	2,82	0,23	27,78	40,22	32	Ar	1,36
2	6,6	3,21	0,032	58,19	17,59	0,17	0,16	13,32	4,33	19,6	3,08	103,82	38,07	3,57	100,64	3,43	0,28	34,18	35,42	30,4	F-Ar	1,29
3	6,8	3,00	0,028	62,15	12,36	0,25	0,21	18,20	9,16	16,8	1,99	109,44	183,28	3,68	175,33	3,00	0,23	23,78	42,22	34	Ar	1,28
4	6,6	3,23	0,044	42,58	7,87	0,19	0,17	16,17	5,81	23,8	2,78	115,68	74,48	2,74	92,47	3,34	0,29	22,18	43,42	34,4	Ar	1,19
5	6,9	2,70	0,028	55,93	10,87	0,24	0,22	17,65	9,03	19,2	1,95	111,17	108,36	2,11	162,79	2,51	0,19	23,78	42,22	34	Ar	1,18
6	6,5	3,70	0,040	53,65	15,29	0,17	0,15	14,37	4,46	20,2	3,22	110,76	72,24	2,55	82,71	3,20	0,26	28,18	41,42	30,4	Ar	1,27
7	6,4	3,69	0,036	59,45	14,05	0,19	0,15	14,58	4,58	23,8	3,18	100,84	20,41	2,88	92,53	3,15	0,25	28,18	41,42	30,4	Ar	1,39
8	6,9	3,61	0,044	47,59	9,77	0,24	0,19	15,27	5,29	24,2	2,89	85,67	31,17	3,38	109,84	3,43	0,22	30,18	43,42	26,4	Ar	1,27
9	6,5	3,64	0,036	58,65	8,38	0,16	0,16	13,17	4,21	17,8	3,13	108,63	32,31	3,41	71,90	4,17	0,31	32,18	37,42	30,4	F-Ar	1,41
10	6,4	3,37	0,024	81,45	17,19	0,20	0,19	13,28	4,21	21,4	3,15	87,45	27,23	3,35	87,32	3,49	0,22	30,18	39,42	30,4	F-Ar	1,23
11	7,0	3,00	0,036	48,34	79,96	0,27	0,24	19,33	7,57	20,6	2,55	99,63	38,88	2,30	124,01	3,22	0,21	27,78	46,22	26	Ar	1,38
12	6,7	2,79	0,028	57,80	12,71	0,16	0,18	12,67	3,97	16,8	3,19	104,00	88,56	2,39	75,43	3,21	0,27	34,18	33,42	32,4	F-Ar	1,49
13	6,6	2,90	0,040	42,05	24,86	0,24	0,18	15,70	7,22	18,6	2,17	95,50	53,08	2,09	134,47	2,51	0,19	33,78	40,22	26	Ar	1,38
14	6,6	3,41	0,028	70,64	6,16	0,17	0,17	14,52	4,93	20,2	2,95	114,41	57,28	2,35	72,14	2,77	0,25	30,18	41,42	28,4	Ar	1,50
15	6,9	3,00	0,032	54,38	8,61	0,32	0,27	20,31	9,96	22,8	2,04	94,59	69,04	1,95	189,53	2,30	0,24	27,78	48,22	24	Ar	1,45
16	6,6	3,29	0,032	59,64	12,39	0,25	0,16	15,09	5,04	21,0	2,99	80,52	29,36	3,32	105,70	3,16	0,21	30,18	41,42	28,4	Ar	1,43
17	6,6	3,48	0,032	63,08	10,48	0,15	0,16	14,61	4,68	21,4	3,12	128,60	56,96	2,20	73,24	2,99	0,28	30,18	37,42	32,4	F-Ar	1,45
18	6,3	3,32	0,032	60,18	11,48	0,17	0,15	13,93	4,39	19,2	3,17	107,76	54,92	2,11	68,66	3,26	0,26	28,18	37,42	34,4	F-Ar	1,25
19	6,6	2,57	0,024	62,11	15,02	0,15	0,13	10,73	3,31	28,4	3,24	93,60	38,41	2,74	74,46	3,44	0,28	44,18	29,42	26,4	F-Ar	1,44
20	6,6	3,36	0,028	69,61	9,68	0,15	0,16	11,73	3,77	20,6	3,11	103,33	34,47	2,98	53,65	3,33	0,32	34,18	37,42	28,4	F-Ar	1,35
21	6,7	3,20	0,032	58,00	9,90	0,28	0,22	15,81	6,99	17,2	2,26	81,43	77,00	2,79	144,54	2,84	0,22	27,78	44,22	28	Ar	1,40
22	6,5	3,16	0,028	65,46	14,71	0,15	0,17	10,76	3,61	16,4	2,98	95,80	39,23	3,00	58,39	2,81	0,34	38,18	31,42	30,4	F-Ar	1,47
23	6,7	2,90	0,044	38,23	12,59	0,38	0,23	18,00	8,43	17,4	2,14	69,55	54,16	2,29	136,40	2,60	0,28	27,78	42,22	30	Ar	1,50
24	6,8	3,37	0,032	61,09	20,59	0,20	0,17	15,63	4,54	19,0	3,44	100,85	42,22	3,23	102,64	2,92	0,16	28,18	41,42	30,4	Ar	1,40
25	6,9	2,90	0,032	52,57	16,51	0,29	0,19	18,93	6,46	20,2	2,93	87,55	66,20	2,08	196,70	2,82	0,14	27,78	44,22	28	Ar	1,37
26	6,9	3,23	0,036	52,04	70,19	0,22	0,12	17,80	4,00	24,2	4,45	99,09	12,36	1,94	75,31	2,60	0,18	30,18	39,42	30,4	F-Ar	1,32
27	6,9	3,25	0,028	67,33	11,12	0,20	0,14	15,09	4,30	18,2	3,51	96,95	24,23	2,94	64,93	2,57	0,19	32,18	41,42	26,4	Ar	1,46
28	6,8	3,47	0,024	83,87	9,58	0,20	0,18	17,83	4,66	24,0	3,83	112,45	40,44	1,87	54,75	2,27	0,24	20,18	45,42	34,4	Ar	1,55
29	6,7	2,78	0,032	50,39	12,26	0,17	0,11	11,34	3,41	15,6	3,33	86,76	46,98	2,78	78,96	2,15	0,32	38,18	33,42	28,4	F-Ar	1,56
30	5,9	3,42	0,024	82,66	47,01	0,18	0,16	12,22	3,78	18,8	3,23	88,89	41,67	3,34	69,75	2,60	0,24	30,18	37,42	32,4	F-Ar	1,65
31	6,6	3,40	0,024	82,17	39,31	0,21	0,19	15,82	7,22	18,2	2,19	109,71	56,36	2,29	132,71	3,24	0,24	25,78	44,22	30	Ar	1,47
32	6,6	3,14	0,024	75,89	20,02	0,17	0,16	13,34	4,02	20,4	3,32	102,12	22,25	2,30	78,10	2,49	0,27	34,18	35,42	30,4	F-Ar	1,50
33	6,9	2,60	0,024	62,84	12,31	0,26	0,17	15,11	6,59	19,0	2,29	83,47	37,08	1,70	110,02	2,33	0,21	31,78	38,22	30	F-Ar	1,39
34	6,7	3,37	0,040	48,87	55,75	0,20	0,17	16,94	5,14	20,8	3,30	110,40	15,80	2,19	66,08	3,16	0,21	28,18	41,42	30,4	Ar	1,46
35	7,0	2,70	0,036	43,50	104,12	0,34	0,18	21,69	7,70	20,4	2,82	86,44	31,04	1,36	144,52	3,04	0,17	27,78	42,22	30	Ar	1,38
36	6,6	2,88	0,040	41,76	17,17	0,19	0,15	14,96	4,57	19,8	3,27	102,79	25,43	2,32	71,56	2,54	0,26	34,18	35,42	30,4	F-Ar	1,51
37	6,6	3,09	0,036	49,79	10,80	0,18	0,14	12,99	3,86	18,4	3,37	93,61	23,91	2,49	71,67	2,52	0,25	34,18	35,42	30,4	F-Ar	1,48
38	6,9	3,41	0,044	44,95	9,61	0,24	0,23	15,43	4,87	21,0	3,17	84,58	20,27	2,29	64,29	2,51	0,27	28,18	39,42	32,4	F-Ar	1,52

**Tabla 3. (Continuación).**

Muestra	pH	MO	N	C/N	P	K	Na	Ca	Mg	CIC	Ca/Mg	Ca+Mg	Fe	Cu	Mn	Zn	B	Arena	Arcilla	Limo	Textura	Da g/cm <sup>3</sup>
		%			ppm	meq/100g suelo						K						ppm				
39	6,6	3,60	0,044	47,46	16,19	0,21	0,16	14,28	4,18	21,6	3,42	87,90	25,61	2,76	68,81	2,70	0,25	28,18	39,42	32,4	F-Ar	1,47
40	6,6	3,90	0,036	62,84	13,20	0,22	0,19	15,34	4,96	21,6	3,09	92,27	23,14	2,63	55,89	2,71	0,22	28,18	43,42	28,4	Ar	1,41
41	6,9	2,70	0,028	55,93	18,81	0,26	0,25	16,65	7,70	22,2	2,16	93,65	43,00	2,07	124,91	2,64	0,12	27,78	36,22	36	F-Ar	1,55
42	6,6	3,43	0,028	71,06	15,48	0,17	0,19	13,92	4,36	21,4	3,19	107,53	22,99	2,83	55,14	2,54	0,21	28,18	41,42	30,4	Ar	1,44
43	6,8	3,00	0,028	62,15	16,98	0,31	0,26	17,85	8,73	21,8	2,04	85,74	42,48	2,10	128,20	2,52	0,21	35,78	44,22	20	Ar	1,32
44	6,7	3,51	0,028	72,71	15,56	0,17	0,17	14,05	4,34	20,8	3,24	108,18	22,87	2,73	50,59	2,69	0,21	32,18	41,42	26,4	Ar	1,25
45	6,9	2,70	0,032	48,94	28,22	0,28	0,17	16,81	6,78	20,4	2,48	84,25	73,24	2,47	139,80	2,81	0,17	35,78	40,22	24	Ar	1,30
46	6,6	2,90	0,028	60,08	18,17	0,17	0,15	12,74	3,80	18,2	3,35	97,29	27,54	2,69	67,10	2,44	0,22	36,18	35,42	28,4	F-Ar	1,36
47	6,7	3,09	0,032	56,01	20,63	0,20	0,19	13,52	4,58	21,2	2,95	90,50	27,06	2,91	65,45	2,69	0,19	30,18	41,42	28,4	Ar	1,27
48	6,6	3,24	0,032	58,73	19,66	0,20	0,19	14,52	4,88	21,0	2,98	97,00	27,75	3,04	59,29	2,74	0,20	30,18	41,42	28,4	Ar	1,40
49	6,6	3,33	0,032	60,36	16,39	0,19	0,20	14,84	5,08	12,4	2,92	104,84	22,68	2,90	51,99	2,62	0,16	28,18	43,42	28,4	Ar	1,54
50	6,5	3,19	0,032	57,82	10,90	0,21	0,21	15,24	5,03	20,8	3,03	96,52	28,21	2,63	61,78	2,52	0,20	28,18	43,42	28,4	Ar	1,35

**Tabla 4. Resultados de las propiedades físicas y químicas evaluadas en la hacienda Santa Elena, suerte 80, después de la segunda fertilización (T2).**

Muestra	pH	N		C/N	P ppm	K	Na	Ca	Mg	CIC	Ca/Mg	Ca+Mg K	Fe	Cu	Mn	Zn	B	Arena			Arcilla	Limo	Textura	Da g/cm <sup>3</sup>
		%	%															%	%					
1	6,9	3,16	0,136	13,48	20,29	0,29	0,30	14,48	6,39	22,0	2,27	71,97	20,26	2,35	147,56	3,57	0,27	27,78	40,22	32	Ar	1,36		
2	6,9	2,65	0,068	22,60	13,26	0,25	0,55	13,87	4,81	18,2	2,88	74,72	30,17	2,44	134,84	3,64	0,24	34,18	35,42	30,4	F-Ar	1,29		
3	6,6	3,16	0,076	24,12	8,72	0,36	0,34	16,73	6,41	20,4	2,61	64,28	23,90	1,94	142,24	3,60	0,20	23,78	42,22	34	Ar	1,28		
4	6,7	3,39	0,108	18,21	12,17	0,34	0,32	17,68	6,65	23,6	2,66	71,56	20,13	1,90	159,84	3,34	0,18	22,18	43,42	34,4	Ar	1,19		
5	6,9	3,21	0,084	22,17	16,73	0,28	0,30	16,69	6,41	23,4	2,60	82,50	14,67	1,59	137,28	2,76	0,23	23,78	42,22	34	Ar	1,18		
6	6,7	3,19	0,084	22,03	11,43	0,33	0,26	16,53	6,49	23,0	2,55	69,76	26,41	1,96	173,76	3,02	0,26	28,18	41,42	30,4	Ar	1,27		
7	6,6	3,49	0,100	20,24	13,20	0,37	0,29	17,46	6,59	24,6	2,65	65,00	12,30	1,78	152,68	3,38	0,25	28,18	41,42	30,4	Ar	1,39		
8	6,6	3,15	0,108	16,92	10,29	0,32	0,29	15,66	5,92	21,6	2,65	67,44	15,17	1,90	142,68	3,63	0,21	30,18	43,42	26,4	Ar	1,27		
9	6,4	3,23	0,092	20,36	18,88	0,78	0,29	15,27	5,59	23,0	2,73	26,74	25,77	2,40	161,20	3,81	0,17	32,18	37,42	30,4	F-Ar	1,41		
10	6,6	3,13	0,068	26,70	10,68	0,30	0,27	14,93	5,37	22,4	2,78	67,67	17,68	2,07	135,96	3,58	0,21	30,18	39,42	30,4	F-Ar	1,23		
11	6,8	3,32	0,108	17,83	60,04	0,33	0,31	18,05	5,63	22,2	3,21	71,76	26,83	2,20	167,68	4,18	0,13	27,78	46,22	26	Ar	1,38		
12	6,7	2,62	0,068	22,35	16,81	0,19	0,27	12,81	4,19	17,2	3,06	89,47	19,49	1,60	127,04	3,02	0,29	34,18	33,42	32,4	F-Ar	1,49		
13	6,7	2,95	0,076	22,51	10,58	0,26	0,25	15,66	5,84	20,6	2,68	82,69	13,82	1,56	135,92	3,11	0,22	33,78	40,22	26	Ar	1,38		
14	6,7	3,12	0,084	21,54	7,17	0,24	0,34	16,39	6,43	21,6	2,55	95,08	11,49	1,48	138,52	3,05	0,28	30,18	41,42	28,4	Ar	1,50		
15	6,5	3,20	0,084	22,10	7,61	0,45	0,68	17,69	6,79	24,0	2,61	54,40	26,25	1,91	173,72	3,17	0,27	27,78	48,22	24	Ar	1,45		
16	6,7	2,91	0,116	14,55	15,92	0,37	0,30	17,64	6,18	23,4	2,85	64,38	18,21	2,06	153,76	4,46	0,18	30,18	41,42	28,4	Ar	1,43		
17	6,8	2,94	0,100	17,05	9,88	0,28	0,28	17,59	6,46	23,2	2,72	85,89	13,65	1,40	140,72	2,94	0,22	30,18	37,42	32,4	F-Ar	1,45		
18	6,8	3,04	0,092	19,17	11,61	0,26	0,18	16,72	5,83	20,4	2,87	86,73	15,92	1,51	150,04	2,79	0,21	28,18	37,42	34,4	F-Ar	1,25		
19	6,7	2,45	0,068	20,90	19,30	0,19	0,23	11,39	3,84	15,0	2,97	80,16	23,30	1,41	117,92	2,96	0,29	44,18	29,42	26,4	F-Ar	1,44		
20	6,6	3,01	0,100	17,46	11,07	0,27	0,52	13,55	5,07	18,6	2,67	68,96	21,35	1,93	126,52	2,80	0,26	34,18	37,42	28,4	F-Ar	1,35		
21	6,3	3,29	0,092	20,74	13,20	0,35	0,24	14,92	5,44	22,2	2,74	58,17	19,56	2,13	146,84	3,48	0,17	27,78	44,22	28	Ar	1,40		
22	6,6	2,74	0,068	23,37	10,91	0,20	0,23	12,75	4,60	16,6	2,77	86,75	19,22	1,91	130,32	3,04	0,32	38,18	31,42	30,4	F-Ar	1,47		
23	6,5	3,14	0,124	14,69	12,09	0,34	0,25	16,81	6,21	23,6	2,71	67,71	17,70	1,74	132,08	3,24	0,26	27,78	42,22	30	Ar	1,50		
24	7,0	3,17	0,156	11,79	68,29	0,25	0,32	18,58	6,23	24,6	2,98	99,24	9,43	1,25	131,04	3,00	0,19	28,18	41,42	30,4	Ar	1,40		
25	6,7	3,02	0,132	13,27	16,27	0,40	0,29	18,43	6,69	23,2	2,75	62,80	10,66	1,30	149,08	3,09	0,18	27,78	44,22	28	Ar	1,37		
26	6,8	2,94	0,132	12,92	105,34	0,39	0,23	21,25	5,22	21,8	4,07	67,87	8,36	1,10	147,24	3,15	0,15	30,18	39,42	30,4	F-Ar	1,32		
27	6,6	3,32	0,132	14,59	27,47	0,30	0,24	17,97	6,04	21,8	2,98	80,03	13,57	1,71	132,84	3,45	0,21	32,18	41,42	26,4	Ar	1,46		
28	6,9	2,94	0,100	17,05	12,43	0,34	0,18	20,35	6,39	20,6	3,18	78,65	7,78	1,06	141,61	2,62	0,22	20,18	45,42	34,4	Ar	1,55		
29	6,7	2,79	0,084	19,27	19,05	0,23	0,26	13,89	4,88	17,4	2,85	81,61	20,46	1,54	135,12	2,60	0,20	38,18	33,42	28,4	F-Ar	1,56		
30	6,6	3,10	0,120	14,98	11,17	0,31	0,27	14,41	5,32	21,4	2,71	63,65	19,31	1,87	135,68	3,14	0,20	30,18	37,42	32,4	F-Ar	1,65		
31	6,5	3,34	0,080	24,22	12,26	0,32	0,24	15,91	5,58	21,8	2,85	67,16	15,81	1,63	135,64	3,88	0,21	25,78	44,22	30	Ar	1,47		
32	6,6	2,92	0,100	16,94	14,71	0,24	0,21	15,41	5,40	19,2	2,85	86,71	11,85	1,27	133,88	3,23	0,24	34,18	35,42	30,4	F-Ar	1,50		
33	6,7	2,91	0,100	16,88	15,92	0,28	0,24	16,25	5,61	19,6	2,90	78,07	8,80	1,07	125,56	2,82	0,26	31,78	38,22	30	F-Ar	1,39		
34	6,9	2,71	0,068	23,12	60,49	0,31	0,23	19,42	6,13	23,8	3,17	82,42	7,32	1,05	125,24	3,75	0,23	28,18	41,42	30,4	Ar	1,46		
35	7,0	3,05	0,108	16,38	138,25	0,34	0,23	20,82	5,82	23,6	3,58	78,35	8,11	1,00	140,08	3,88	0,09	27,78	42,22	30	Ar	1,38		
36	6,5	2,84	0,068	24,23	20,32	0,36	0,30	15,17	5,49	14,4	2,76	57,39	14,55	1,24	143,12	3,24	0,26	34,18	35,42	30,4	F-Ar	1,51		
37	6,7	2,99	0,076	22,82	13,68	0,24	0,24	15,67	5,33	19,8	2,94	87,50	11,13	1,25	118,20	2,87	0,26	34,18	35,42	30,4	F-Ar	1,48		
38	6,6	2,86	0,084	19,75	11,85	0,27	0,22	16,61	5,94	16,0	2,80	83,52	7,94	1,10	123,28	2,76	0,23	28,18	39,42	32,4	F-Ar	1,52		

**Tabla 4. (Continuación).**

Muestra	pH	MO	N	C/N	P	K	Na	Ca	Mg	CIC	Ca/Mg	Ca+Mg	Fe	Cu	Mn	Zn	B	Arena	Arcilla	Limo	Textura	Da
		%			ppm	meq/100g suelo				K		ppm						%				g/cm <sup>3</sup>
39	6,5	2,83	0,096	17,10	19,15	0,26	0,26	16,90	5,78	23,0	2,92	87,23	10,99	1,35	129,92	3,56	0,18	28,18	39,42	32,4	F-Ar	1,47
40	6,7	3,36	0,092	21,18	16,00	0,32	0,33	15,95	5,82	22,4	2,74	68,03	9,65	1,24	132,72	3,50	0,19	28,18	43,42	28,4	Ar	1,41
41	6,6	3,20	0,136	13,65	15,88	0,42	0,29	17,04	6,16	21,6	2,77	55,24	9,85	1,32	115,44	3,19	0,14	27,78	36,22	36	F-Ar	1,55
42	7,0	3,02	0,084	20,85	23,00	0,30	0,27	16,17	5,99	19,8	2,70	73,87	11,40	1,44	129,72	3,15	0,14	28,18	41,42	30,4	Ar	1,44
43	6,7	3,01	0,108	16,17	17,81	0,34	0,26	17,52	6,57	25,0	2,67	70,85	9,65	1,54	122,16	3,29	0,15	35,78	44,22	20	Ar	1,32
44	6,8	3,08	0,124	14,41	10,29	0,29	0,25	16,91	5,95	22,0	2,84	78,83	10,70	1,47	117,24	3,09	0,16	32,18	41,42	26,4	Ar	1,25
45	6,5	3,08	0,124	14,41	29,32	0,37	0,21	15,40	5,14	19,0	3,00	55,51	20,57	1,85	143,68	3,63	0,18	35,78	40,22	24	Ar	1,30
46	6,8	2,92	0,076	22,29	14,29	0,27	0,22	15,27	5,11	18,6	2,99	75,48	12,18	1,45	104,88	2,78	0,25	36,18	35,42	28,4	F-Ar	1,36
47	6,9	3,41	0,116	17,05	21,08	0,29	0,25	16,52	5,73	21,2	2,88	76,72	11,52	1,62	121,88	3,32	0,23	30,18	41,42	28,4	Ar	1,27
48	6,6	3,00	0,100	17,40	20,96	0,44	0,27	16,06	5,86	20,8	2,74	49,82	12,92	1,74	103,60	3,33	0,20	30,18	41,42	28,4	Ar	1,40
49	6,8	3,03	0,092	19,10	13,38	0,37	0,34	16,89	6,05	22,8	2,79	62,00	10,63	1,38	122,60	3,26	0,20	28,18	43,42	28,4	Ar	1,54
50	6,7	3,08	0,092	19,42	9,92	0,33	0,27	17,07	5,97	21,8	2,86	69,82	8,96	1,25	106,92	3,04	0,15	28,18	43,42	28,4	Ar	1,35

**Tabla 5. Resultados de las propiedades físicas y químicas evaluadas en la hacienda San Rafael, suerte 261, al inicio del cultivo (T1).**

Muestra	pH	MO	N	C/N	P	K	Na	Ca	Mg	CIC	Ca/Mg	Ca+Mg	Fe	Cu	Mn	Zn	B	Arena	Arcilla	Limo	Textura	Da
		%			ppm	meq/100g suelo						K						ppm				
1	6,8	3,30	0,132	14,50	61,22	0,30	0,16	9,48	2,96	15,8	3,20	41,47	12,56	5,14	48,52	6,33	0,19	17,78	35,82	46,4	F-Ar-L	1,33
2	7,0	3,24	0,124	15,16	51,14	0,27	0,16	6,92	2,81	18,2	2,46	36,04	9,01	5,43	41,36	5,98	0,20	17,78	37,82	44,4	F-Ar-L	1,19
3	6,8	2,60	0,072	20,95	77,17	0,30	0,14	7,94	2,68	16,2	2,96	35,40	19,79	5,58	52,45	6,03	0,15	31,78	31,82	36,4	F-Ar	1,22
4	6,8	3,24	0,120	15,66	74,05	0,39	0,18	9,08	2,90	18,8	3,13	30,72	14,63	4,98	37,64	6,28	0,19	29,78	31,82	38,4	F-Ar	1,21
5	6,8	2,99	0,112	15,49	53,87	0,26	0,17	8,43	2,96	19,8	2,85	43,81	14,23	5,00	38,49	5,66	0,22	21,78	33,82	44,4	F-Ar	1,37
6	6,6	2,87	0,140	11,89	61,87	0,33	0,06	8,52	2,78	13,0	3,06	34,24	17,32	5,63	42,84	6,55	0,23	27,78	33,82	38,4	F-Ar	1,39
7	6,9	2,57	0,120	12,42	99,80	0,27	0,16	9,46	2,90	15,8	3,26	45,78	14,87	5,48	61,48	6,62	0,16	27,78	31,82	40,4	F-Ar	1,23
8	7,0	3,66	0,136	15,61	95,36	0,39	0,14	12,90	3,66	15,6	3,52	42,46	13,80	4,54	67,81	5,60	0,38	22,18	35,02	42,8	F-Ar	1,28
9	6,9	3,49	0,128	15,82	109,95	0,28	0,19	9,33	2,75	14,8	3,39	43,14	24,23	5,67	54,15	6,54	0,17	27,78	33,82	38,4	F-Ar	1,29
10	6,9	3,49	0,128	15,82	97,67	0,24	0,16	12,65	3,51	19,0	3,60	67,33	12,73	4,81	54,80	5,44	0,39	26,18	33,02	40,8	F-Ar	1,47
11	7,0	3,52	0,128	15,95	25,37	0,26	0,23	10,80	1,96	18,8	5,51	49,08	12,00	5,77	46,24	5,56	0,19	17,78	35,82	46,4	F-Ar-L	1,32
12	7,0	3,66	0,136	15,61	68,32	0,28	0,16	10,91	3,43	13,8	3,18	51,21	14,90	5,22	61,19	4,94	0,39	20,18	33,02	46,8	F-Ar	1,47
13	6,9	3,45	0,112	17,87	48,18	0,18	0,15	6,05	2,41	14,6	2,51	47,00	14,14	5,27	42,34	5,54	0,20	19,78	35,82	44,4	F-Ar-L	1,20
14	7,0	3,22	0,120	15,56	57,55	0,14	0,17	5,97	2,28	13,6	2,62	58,93	13,13	5,75	30,52	5,05	0,19	17,78	37,82	44	F-Ar-L	1,19
15	7,0	3,22	0,116	16,10	95,06	0,28	0,20	9,74	2,89	16,6	3,37	45,11	8,33	4,84	44,12	6,43	0,17	19,78	37,82	42,4	F-Ar-L	1,18
16	6,8	3,52	0,104	19,63	66,24	0,22	0,16	9,36	2,86	19,0	3,27	55,55	11,24	5,73	43,11	5,49	0,19	23,78	35,82	40,4	F-Ar	1,26
17	6,8	3,27	0,136	13,95	83,15	0,29	0,19	10,37	3,12	11,4	3,32	46,52	3,79	6,28	40,97	6,16	0,16	17,78	37,82	44,4	F-Ar-L	1,25
18	6,9	3,33	0,136	14,20	64,97	0,37	0,15	10,74	3,49	19,0	3,08	38,46	10,34	5,52	50,60	6,77	0,17	17,78	39,82	42,4	F-Ar-L	1,22
19	6,7	3,18	0,116	15,90	101,01	0,30	0,13	9,90	3,23	17,0	3,07	43,77	12,56	5,34	35,35	6,82	0,20	17,78	39,82	42,4	F-Ar-L	1,24
20	6,8	3,52	0,128	15,95	100,77	0,22	0,15	12,11	3,79	20,0	3,20	72,27	14,40	4,71	52,33	5,50	0,38	18,18	35,02	46,8	F-Ar-L	1,20
21	6,8	3,53	0,152	13,47	123,07	0,26	0,16	7,90	2,87	17,4	2,75	41,42	15,96	5,30	49,46	7,70	0,16	13,78	37,82	48,4	F-Ar-L	1,27
22	6,9	3,29	0,136	14,03	93,27	0,20	0,14	11,81	3,60	16,4	3,28	77,05	16,34	5,40	51,20	5,33	0,41	24,18	35,02	40,8	F-Ar	1,31
23	7,0	3,00	0,112	15,54	80,03	0,20	0,16	8,25	2,88	17,2	2,86	55,65	12,40	5,94	48,86	6,07	0,14	23,78	35,82	40,4	F-Ar	1,03
24	7,1	3,26	0,136	13,90	70,99	0,23	0,16	12,53	3,63	20,0	3,45	70,26	14,33	5,12	56,54	5,14	0,40	18,18	35,02	46,8	F-Ar-L	1,18
25	6,6	3,36	0,112	17,40	49,97	0,21	0,17	9,01	3,00	16,6	3,00	57,19	11,01	5,96	43,28	5,19	0,21	22,18	33,42	44,4	F-Ar	1,13
26	7,0	2,95	0,116	14,75	44,08	0,11	0,18	9,40	2,82	14,6	3,33	111,09	9,36	7,07	36,15	4,64	0,24	18,18	33,42	48,4	F-Ar-L	1,19
27	7,1	3,12	0,092	19,67	41,69	0,10	0,20	9,64	2,97	14,8	3,25	126,10	13,39	6,96	31,48	4,19	0,24	12,18	35,42	52,4	F-Ar-L	1,24
28	6,7	3,29	0,120	15,90	58,26	0,11	0,19	8,35	2,85	17,0	2,93	101,82	11,97	6,95	24,67	5,10	0,24	14,18	37,42	48,4	F-Ar-L	1,20
29	6,5	2,99	0,116	14,95	68,68	0,22	0,18	8,91	3,21	17,8	2,78	55,09	11,81	5,99	29,21	5,54	0,20	9,78	37,82	52,4	F-Ar-L	1,29
30	6,4	3,47	0,152	13,24	63,24	0,23	0,15	8,94	3,20	15,8	2,79	52,78	10,52	6,48	41,53	6,22	0,16	15,78	39,82	44,4	F-Ar-L	1,26
31	6,6	3,32	0,112	17,19	50,45	0,18	0,16	8,89	3,10	17,0	2,87	66,61	8,68	7,30	31,16	5,43	0,18	12,18	37,42	50,4	F-Ar-L	1,25
32	7,0	3,84	0,116	19,20	58,83	0,16	0,21	13,24	4,17	16,8	3,18	108,81	10,69	5,50	44,01	4,22	0,39	8,18	35,02	56,8	F-Ar-L	1,12
33	6,7	2,98	0,132	13,09	49,46	0,17	0,17	9,75	3,09	18,8	3,16	75,53	4,93	5,65	25,83	4,78	0,17	8,18	39,42	52,4	F-Ar-L	1,12
34	7,5	3,06	0,136	13,05	42,18	0,15	0,17	14,79	3,23	17,6	4,58	120,13	8,80	5,41	53,03	4,01	0,40	12,18	37,02	50,8	F-Ar-L	1,17
35	6,9	3,02	0,116	15,10	43,16	0,21	0,15	10,53	3,05	20,0	3,45	64,67	12,40	6,07	36,41	5,11	0,15	16,18	37,42	46,4	F-Ar-L	1,19
36	6,7	3,41	0,152	13,01	60,38	0,25	0,14	12,74	3,90	16,4	3,27	66,56	12,81	4,53	75,00	4,50	0,39	18,18	35,02	46,8	F-Ar-L	1,17
37	6,7	3,18	0,124	14,88	34,08	0,26	0,15	10,72	3,47	16,0	3,09	54,58	4,96	5,04	60,41	6,59	0,11	16,18	37,42	46,4	F-Ar-L	1,18
38	6,7	2,98	0,116	14,90	49,74	0,13	0,16	10,34	3,39	17,0	3,05	105,62	8,96	5,90	40,01	4,77	0,22	8,18	39,42	52,4	F-Ar-L	1,18

**Tabla 5. (Continuación).**

Muestra	pH	MO	N	C/N	P	K	Na	Ca	Mg	CIC	Ca/Mg	Ca+Mg	Fe	Cu	Mn	Zn	B	Arena	Arcilla	Limo	Textura	Da
		%			ppm	meq/100g suelo						K	ppm					%				g/cm <sup>3</sup>
39	6,9	3,03	0,092	19,10	36,84	0,17	0,13	10,51	2,92	17,2	3,60	79,00	6,46	5,69	35,21	5,01	0,17	16,18	35,42	48,4	F-Ar-L	1,23
40	7,0	3,17	0,116	15,85	56,83	0,16	0,18	10,73	3,32	19,0	3,23	87,81	6,70	5,78	41,85	5,07	0,17	10,18	37,42	52,4	F-Ar-L	1,39
41	6,9	3,33	0,136	14,20	72,22	0,14	0,18	10,11	3,36	20,0	3,01	96,21	7,69	5,83	36,81	4,77	0,18	8,18	39,42	52,4	F-Ar-L	1,24
42	6,9	3,48	0,108	18,69	50,87	0,15	0,17	9,55	3,39	18,4	2,82	86,27	6,33	6,18	36,27	4,79	0,19	8,18	39,42	52,4	F-Ar-L	1,15
43	7,0	3,22	0,116	16,10	64,68	0,22	0,15	11,18	3,38	17,4	3,31	66,18	5,94	5,54	49,83	5,30	0,16	12,18	39,42	48,4	F-Ar-L	1,35
44	7,5	3,55	0,132	15,60	54,97	0,14	0,21	14,30	4,68	17,8	3,06	135,57	7,43	5,44	40,31	3,80	0,47	8,18	37,02	54,8	F-Ar-L	0,97
45	6,8	2,73	0,124	12,77	63,58	0,12	0,20	9,82	3,62	17,0	2,71	112,00	9,94	6,30	27,09	4,32	0,22	12,18	39,42	48,4	F-Ar-L	1,41
46	7,2	3,43	0,100	19,90	39,67	0,14	0,20	16,33	4,92	18,0	3,32	151,79	7,60	5,45	34,33	3,72	0,41	8,18	41,02	50,8	Ar-L	1,18
47	7,0	3,09	0,136	13,18	37,48	0,14	0,19	10,64	3,43	18,2	3,10	100,50	3,01	5,99	25,67	4,37	0,21	10,18	39,42	50,4	F-Ar-L	1,28
48	7,2	3,56	0,136	15,18	56,25	0,23	0,17	14,01	4,11	16,6	3,41	78,78	9,33	4,70	69,90	4,13	0,38	16,18	35,02	48,8	F-Ar-L	1,17
49	6,7	3,31	0,136	14,12	62,97	0,14	0,16	10,60	3,29	18,4	3,22	99,21	7,62	5,40	45,01	5,09	0,17	16,18	37,42	46,4	F-Ar-L	1,23
50	7,0	2,82	0,152	10,76	52,06	0,19	0,24	11,07	3,50	18,8	3,16	76,68	5,51	6,04	48,91	4,29	0,17	10,18	39,42	50,4	F-Ar-L	1,17
51	6,7	3,52	0,132	15,47	74,42	0,14	0,15	6,50	2,55	17,4	2,55	64,64	6,86	5,39	44,59	5,44	0,17	12,18	39,42	48,4	F-Ar-L	1,23
52	6,9	3,38	0,128	15,32	99,53	0,14	0,13	12,13	3,13	17,2	3,88	109,00	4,81	4,92	52,90	5,77	0,11	10,18	39,42	50,4	F-Ar-L	1,21
53	6,6	3,24	0,124	15,16	78,83	0,16	0,13	11,40	3,81	18,4	2,99	95,06	7,30	5,32	47,57	5,99	0,18	12,18	39,42	48,4	F-Ar-L	1,30
54	6,7	2,76	0,124	12,91	88,86	0,16	0,13	9,15	2,78	16,8	3,29	74,56	7,98	6,01	46,78	5,74	0,14	14,18	39,42	46,4	F-Ar-L	1,37
55	6,5	3,54	0,132	15,56	106,92	0,22	0,12	10,40	3,82	18,4	2,72	64,64	13,35	4,93	54,55	6,25	0,14	16,18	37,42	46,4	F-Ar-L	1,05
56	6,9	3,48	0,128	15,77	55,75	0,19	0,16	13,00	4,34	18,4	3,00	91,26	10,00	5,70	34,10	4,40	0,38	16,18	39,02	44,8	F-Ar-L	1,16
57	6,7	3,39	0,112	17,56	92,04	0,28	0,15	11,55	3,63	18,4	3,18	54,21	4,87	5,85	31,17	5,25	0,16	14,18	39,42	46,4	F-Ar-L	1,08
58	6,6	3,33	0,112	17,25	79,28	0,20	0,15	12,90	4,30	17,0	3,00	86,00	11,10	5,20	50,30	4,30	0,39	14,18	37,02	48,8	F-Ar-L	1,23
59	6,6	3,01	0,112	15,59	53,84	0,15	0,13	9,53	3,26	14,4	2,92	85,27	11,34	6,62	36,27	5,49	0,18	20,18	37,42	42,4	F-Ar	1,27
60	6,8	3,53	0,128	16,00	69,34	0,19	0,15	11,60	3,41	16,8	3,40	79,00	13,50	5,02	40,30	4,71	0,42	22,18	33,02	44,8	F-Ar	1,25

**Tabla 6. Resultados de las propiedades físicas y químicas evaluadas en la hacienda San Rafael, suerte 261, después de la fertilización (T2).**

Muestra	pH	MO	N	C/N	P	K	Na	Ca	Mg	CIC	Ca/Mg	Ca+Mg	Fe	Cu	Mn	Zn	B	Arena	Arcilla	Limo	Textura	Da
		%			ppm	meq/100g suelo						K						ppm				
1	6,6	3,57	0,112	18,49	74,79	0,39	0,30	10,20	1,98	14,0	5,15	31,23	25,45	6,40	46,41	5,10	0,18	17,78	35,82	46,4	F-Ar-L	1,33
2	7,1	3,19	0,092	20,11	46,60	0,31	0,37	11,31	2,45	15,0	4,62	44,39	20,48	7,18	34,78	4,33	0,19	17,78	37,82	44,4	F-Ar-L	1,19
3	7,1	2,96	0,076	22,59	61,22	0,27	0,30	9,56	2,09	14,0	4,57	43,15	34,36	6,59	30,29	4,09	0,19	31,78	31,82	36,4	F-Ar	1,22
4	7,0	3,17	0,096	19,15	64,56	0,28	0,30	8,75	1,76	14,6	4,97	37,54	31,59	6,67	33,15	4,74	0,15	29,78	31,82	38,4	F-Ar	1,21
5	7,1	3,16	0,076	24,12	57,28	0,23	0,34	9,55	1,88	14,0	5,08	49,70	32,48	6,83	27,31	4,09	0,25	21,78	33,82	44,4	F-Ar	1,37
6	7,0	3,24	0,096	19,58	69,37	0,31	0,25	8,82	1,69	11,0	5,22	33,90	35,96	6,42	45,61	4,99	0,18	27,78	33,82	38,4	F-Ar	1,39
7	7,0	3,00	0,080	21,75	88,77	0,35	0,30	10,59	2,11	15,2	5,02	36,29	37,00	6,43	47,97	5,20	0,09	27,78	31,82	40,4	F-Ar	1,23
8	7,0	3,26	0,112	16,88	75,07	0,33	0,33	12,09	2,30	13,8	5,26	43,61	28,80	6,29	48,39	5,71	0,15	22,18	35,02	42,8	F-Ar	1,28
9	6,9	3,50	0,104	19,52	119,59	0,50	0,27	9,85	1,77	16,4	5,56	23,24	50,48	6,62	51,96	5,82	0,12	27,78	33,82	38,4	F-Ar	1,29
10	7,0	3,66	0,112	18,96	121,52	0,47	0,25	11,58	1,99	14,0	5,82	28,87	24,46	5,89	40,52	6,21	0,10	26,18	33,02	40,8	F-Ar	1,47
11	7,0	3,23	0,112	16,73	78,79	0,31	0,29	10,12	1,89	16,0	5,35	38,74	30,24	7,11	44,57	4,80	0,19	17,78	35,82	46,4	F-Ar-L	1,32
12	6,5	3,41	0,120	16,48	63,24	0,39	0,31	11,63	1,97	14,4	5,90	34,87	31,50	6,58	49,92	5,12	0,13	20,18	33,02	46,8	F-Ar	1,47
13	7,0	3,22	0,120	15,56	60,32	0,29	0,29	9,82	1,91	16,0	5,14	40,45	26,50	6,44	37,30	4,87	0,15	19,78	35,82	44,4	F-Ar-L	1,20
14	6,9	3,08	0,072	24,81	66,70	0,18	0,31	8,53	1,60	15,0	5,33	56,28	28,88	6,96	23,49	3,99	0,19	17,78	37,82	44	F-Ar-L	1,19
15	6,9	3,29	0,096	19,88	73,03	0,28	0,36	9,55	1,66	14,2	5,75	40,04	25,05	6,23	34,62	4,93	0,15	19,78	37,82	42,4	F-Ar-L	1,18
16	6,8	3,18	0,076	24,27	66,80	0,22	0,36	10,05	1,97	15,6	5,10	54,64	24,12	6,35	24,98	4,37	0,15	23,78	35,82	40,4	F-Ar	1,26
17	6,5	3,46	0,148	13,56	105,95	0,40	0,29	10,12	1,98	14,6	5,11	30,25	32,28	7,06	44,86	5,70	0,08	17,78	37,82	44,4	F-Ar-L	1,25
18	7,0	3,46	0,128	15,68	74,54	0,40	0,35	11,48	2,22	10,2	5,17	34,25	22,97	6,51	45,46	5,91	0,16	17,78	39,82	42,4	F-Ar-L	1,22
19	6,9	3,45	0,100	20,01	111,07	0,42	0,26	10,89	2,11	20,4	5,16	30,95	32,92	6,71	46,93	6,03	0,14	17,78	39,82	42,4	F-Ar-L	1,24
20	7,3	3,16	0,100	18,33	68,44	0,23	0,42	10,07	2,16	16,8	4,66	53,17	22,49	6,95	36,04	4,78	0,20	18,18	35,02	46,8	F-Ar-L	1,20
21	6,9	3,54	0,104	19,74	74,86	0,24	0,34	9,66	1,99	16,4	4,85	48,54	26,56	7,40	35,55	5,14	0,19	13,78	37,82	48,4	F-Ar-L	1,27
22	6,8	3,10	0,096	18,73	70,85	0,22	0,29	9,66	1,90	17,8	5,08	52,55	31,34	7,20	26,18	4,62	0,12	24,18	35,02	40,8	F-Ar	1,31
23	7,1	3,29	0,104	18,35	62,11	0,21	0,38	10,16	1,99	16,2	5,11	57,86	21,26	6,69	20,29	4,74	0,11	23,78	35,82	40,4	F-Ar	1,03
24	6,9	3,47	0,096	20,97	63,26	0,40	0,24	10,41	2,05	17,6	5,08	31,15	30,28	6,47	50,24	5,48	0,10	18,18	35,02	46,8	F-Ar-L	1,18
25	6,8	3,38	0,112	17,50	64,22	0,48	0,23	10,26	2,13	17,2	4,82	25,81	25,94	6,05	45,81	4,94	0,12	22,18	33,42	44,4	F-Ar	1,13
26	7,0	3,14	0,092	19,80	52,28	0,23	0,30	10,41	1,96	16,0	5,31	53,78	27,06	7,24	38,69	4,70	0,17	18,18	33,42	48,4	F-Ar-L	1,19
27	6,9	3,32	0,112	17,19	65,17	0,22	0,36	11,51	2,16	15,4	5,33	62,14	29,06	7,46	26,64	4,28	0,16	12,18	35,42	52,4	F-Ar-L	1,24
28	6,7	3,39	0,104	18,91	71,63	0,25	0,28	10,40	1,99	13,4	5,23	49,56	30,53	7,30	39,97	4,64	0,14	14,18	37,42	48,4	F-Ar-L	1,20
29	6,9	3,31	0,084	22,86	73,56	0,26	0,33	10,61	2,08	15,8	5,10	48,81	25,32	7,06	36,97	4,98	0,18	9,78	37,82	52,4	F-Ar-L	1,29
30	6,8	3,34	0,088	22,02	70,24	0,25	0,30	10,19	1,98	14,0	5,15	48,68	34,64	7,78	44,78	4,95	0,13	15,78	39,82	44,4	F-Ar-L	1,26
31	6,7	3,41	0,096	20,60	58,43	0,28	0,32	10,54	2,03	10,4	5,19	44,89	25,11	7,86	40,14	4,86	0,13	12,18	37,42	50,4	F-Ar-L	1,25
32	7,1	3,69	0,136	15,74	68,48	0,27	0,31	10,85	2,19	19,8	4,95	48,30	21,33	6,81	35,14	4,93	0,13	8,18	35,02	56,8	F-Ar-L	1,12
33	7,2	3,31	0,088	21,82	51,56	0,19	0,38	11,98	2,24	10,6	5,35	74,84	16,47	7,21	32,13	4,24	0,19	8,18	39,42	52,4	F-Ar-L	1,12
34	7,6	3,38	0,128	15,32	49,24	0,24	0,38	13,05	2,00	14,6	6,53	62,71	14,55	6,61	37,59	4,71	0,14	12,18	37,02	50,8	F-Ar-L	1,17
35	7,0	3,18	0,128	14,41	52,77	0,27	0,28	10,66	2,04	19,2	5,23	47,04	23,62	7,86	32,36	4,62	0,14	16,18	37,42	46,4	F-Ar-L	1,19
36	6,8	3,27	0,128	14,82	52,84	0,31	0,28	10,54	2,10	14,4	5,02	40,77	24,76	6,51	48,36	4,49	0,13	18,18	35,02	46,8	F-Ar-L	1,17
37	6,7	3,36	0,112	17,40	65,00	0,42	0,27	11,69	2,27	15,4	5,15	33,24	21,30	6,24	60,28	4,96	0,10	16,18	37,42	46,4	F-Ar-L	1,18
38	6,9	3,41	0,120	16,48	48,19	0,27	0,32	14,22	2,86	16,4	4,97	63,26	18,24	6,66	39,20	4,26	0,11	8,18	39,42	52,4	F-Ar-L	1,18



**Tabla 6. (Continuación).**

Muestra	pH	MO	N	C/N	P	K	Na	Ca	Mg	CIC	Ca/Mg	Ca+Mg	Fe	Cu	Mn	Zn	B	Arena	Arcilla	Limo	Textura	Da
		%			meq/100g suelo							K						ppm				
39	6,6	3,44	0,112	17,82	71,32	0,28	0,28	11,01	2,10	15,0	5,24	46,82	18,78	6,41	42,68	4,42	0,13	16,18	35,42	48,4	F-Ar-L	1,23
40	6,9	3,51	0,112	18,18	87,55	0,32	0,27	11,56	2,93	17,0	3,95	45,28	19,21	6,51	45,18	4,75	0,11	10,18	37,42	52,4	F-Ar-L	1,39
41	6,9	3,60	0,112	18,64	58,87	0,26	0,32	11,91	2,41	16,6	4,94	55,08	17,49	6,63	36,62	4,34	0,13	8,18	39,42	52,4	F-Ar-L	1,24
42	6,4	3,46	0,112	17,92	71,74	0,30	0,28	11,76	2,27	21,0	5,18	46,77	22,68	7,05	51,17	4,93	0,13	8,18	39,42	52,4	F-Ar-L	1,15
43	7,2	3,28	0,112	16,99	55,17	0,22	0,29	12,59	2,10	22,0	6,00	66,77	17,07	6,84	46,35	4,44	0,15	12,18	39,42	48,4	F-Ar-L	1,35
44	7,0	3,56	0,112	18,44	54,43	0,22	0,33	11,75	2,43	19,0	4,84	64,45	17,34	6,76	39,24	4,55	0,17	8,18	37,02	54,8	F-Ar-L	0,97
45	7,0	3,48	0,096	21,03	51,45	0,19	0,35	11,14	2,29	18,6	4,86	70,68	18,09	6,95	33,57	4,34	0,18	12,18	39,42	48,4	F-Ar-L	1,41
46	6,8	3,46	0,136	14,76	49,30	0,28	0,29	12,16	2,47	10,4	4,92	52,25	15,15	7,25	38,25	4,38	0,13	8,18	41,02	50,8	Ar-L	1,18
47	6,9	3,45	0,104	19,24	47,58	0,23	0,32	11,97	2,41	17,0	4,97	62,52	17,70	7,10	41,62	4,33	0,17	10,18	39,42	50,4	F-Ar-L	1,28
48	7,3	3,44	0,112	17,82	47,87	0,23	0,33	11,84	2,17	16,6	5,46	60,91	19,05	6,33	50,00	4,96	0,17	16,18	35,02	48,8	F-Ar-L	1,17
49	6,7	3,49	0,116	17,45	74,59	0,43	0,28	11,75	2,39	15,6	4,92	32,88	23,55	6,28	57,99	5,03	0,14	16,18	37,42	46,4	F-Ar-L	1,23
50	6,9	3,47	0,096	20,97	77,57	0,27	0,33	12,05	2,37	17,0	5,08	53,41	19,10	6,92	51,96	4,76	0,17	10,18	39,42	50,4	F-Ar-L	1,17
51	6,6	3,48	0,104	19,41	89,91	0,25	0,32	10,69	2,43	19,8	4,40	52,48	19,30	6,72	48,73	5,32	0,10	12,18	39,42	48,4	F-Ar-L	1,23
52	7,1	3,47	0,120	16,77	108,21	0,34	0,33	11,97	2,25	17,0	5,32	41,82	11,71	5,48	50,78	5,49	0,05	10,18	39,42	50,4	F-Ar-L	1,21
53	6,8	3,56	0,128	16,13	108,27	0,42	0,28	12,66	2,69	17,4	4,71	36,55	20,35	6,26	76,62	5,55	0,15	12,18	39,42	48,4	F-Ar-L	1,30
54	7,1	3,43	0,092	21,63	77,96	0,22	0,31	13,31	2,14	16,6	6,22	70,23	14,33	6,33	41,70	4,55	0,15	14,18	39,42	46,4	F-Ar-L	1,37
55	6,6	3,38	0,104	18,85	67,68	0,34	0,22	11,21	2,52	19,0	4,45	40,38	26,16	6,14	51,10	5,07	0,14	16,18	37,42	46,4	F-Ar-L	1,05
56	6,5	3,71	0,120	17,93	69,42	0,31	0,26	10,94	2,37	18,2	4,62	42,94	24,50	6,69	39,68	5,18	0,13	16,18	39,02	44,8	F-Ar-L	1,16
57	7,0	3,51	0,120	16,97	69,15	0,29	0,29	13,02	2,75	15,8	4,73	54,38	16,81	6,58	38,98	5,08	0,10	14,18	39,42	46,4	F-Ar-L	1,08
58	6,9	3,30	0,112	17,09	64,17	0,22	0,27	11,12	2,52	14,0	4,41	62,00	21,39	6,89	25,08	4,61	0,17	14,18	37,02	48,8	F-Ar-L	1,23
59	6,9	3,32	0,144	13,37	86,52	0,28	0,24	11,60	2,53	14,6	4,58	50,46	24,49	6,37	26,06	5,00	0,16	20,18	37,42	42,4	F-Ar	1,27
60	6,9	3,26	0,104	18,18	66,58	0,22	0,29	10,71	2,02	17,0	5,30	57,86	25,64	6,49	34,31	4,76	0,18	22,18	33,02	44,8	F-Ar	1,25

## ANEXO 2. Parámetros de comparación para niveles de fertilidad en suelos.

**Tabla 1. Clasificación de acidez de suelos de acuerdo al valor de pH (SCCS. 2000).**

<b>pH</b>	<b>Clasificación</b>
4.0 - 4.5	Acidez extrema
4.5 - 5.0	Acidez muy fuerte
5.0 - 5.5	Acidez fuerte
5.5 - 6.0	Acidez media
6.0 - 6.5	Acidez suave
6.5 - 7.0	Acidez muy suave
7.0 - 8.0	Alcalinidad suave
8.0 - 8.5	Alcalinidad moderada
8.5 - 9.0	Alcalinidad moderada
9.0 - 9.5	Alcalinidad fuerte
9.5 - 10.0	Alcalinidad muy fuerte

**Tabla 2. Nivel de N en suelos de clima cálido (SCCS. 2000).**

<b>Nivel</b>	<b>Bajo</b>	<b>Medio</b>	<b>Alto</b>
<b>% N</b>	< 0.10	0.10 - 0.20	> 0.20

**Tabla 3. Clasificación de la CIC (SCCS. 2000).**

<b>Contenido (meq/100g)</b>	<b>Interpretación</b>
< 6	Muy Débil
6-10	Débil
10-20	Normal
20-30	Elevada
> 30	Muy Elevada

**Tabla 4. Niveles críticos de fertilidad para la caña de azúcar, establecidos por CENICAÑA.**

Variable	Unidad	Nivel		
		Bajo	Medio	Alto
<b>pH</b>	-----	< 5.5	5.5 – 7.3	> 7.3
<b>Materia Orgánica</b>	%	< 2.0	2.0 – 4.0	> 4.0
<b>Fósforo</b>	ppm	< 5.0	5.0 – 10.0	> 10.0
<b>Calcio</b>	meq/100g	< 3.0	3.0 – 6.0	> 6.0
<b>Magnesio</b>	meq/100g	< 1.5	1.5 – 2.5	> 2.5
<b>Sodio</b>	meq/100g	< 0.05	0.05 – 0.10	> 0.10
<b>Potasio</b>	meq/100g	< 0.20	0.20 – 0.40	> 0.40
<b>Hierro</b>	ppm	< 40	40 – 80	> 80
<b>Cobre</b>	ppm	< 1.0	1.0 – 3.0	> 3.0
<b>Manganeso</b>	ppm	< 20.0	20 – 40	> 40
<b>Cinc</b>	ppm	< 1.0	1.0 – 1.5	> 1.5
<b>Boro</b>	ppm	< 0.4	0.40 – 0.60	> 0.60
<b>Azufre</b>	ppm	< 6.0	6.0 – 12.0	> 12.0
<b>C.I.C</b>	meq/100g	< 10.0	10.0 – 20.0	> 20.0

**ANEXO 3. Parámetros estadísticos de las propiedades físicas y químicas evaluadas en cada suerte (lote).**

**Tabla 1. Promedios, desviaciones estándar y coeficientes de variación de cada una de las variables medidas en las suertes, en el T1.**

Variable	Peralonso, suerte 121			Santa Elena, suerte 80			San Rafael, suerte 261		
		S	CV		S	CV		S	CV
Da	1.13	0.10	8.62	1.40	0.10	7.44	1.23	0.10	7.80
Arcilla	55.39	5.88	10.61	40.06	3.88	9.68	36.79	2.42	6.59
CIC	26.95	6.37	23.64	20.10	2.67	13.30	17.13	1.82	10.64
pH	7.18	0.36	4.96	6.68	0.20	2.99	6.86	0.21	3.07
MO	3.17	0.19	6.02	3.18	0.32	9.95	3.25	0.27	8.26
N	0.07	0.03	47.02	0.03	0.01	18.37	0.12	0.01	12.10
P	13.26	5.43	40.96	20.49	19.12	93.30	67.02	21.59	32.21
K	0.37	0.30	80.69	0.22	0.05	24.76	0.21	0.07	33.03
Na	0.26	0.06	23.42	0.18	0.03	19.25	0.16	0.03	17.50
Ca	17.64	3.90	22.08	15.17	2.35	15.52	10.39	2.07	19.95
Mg	13.72	2.13	15.52	5.43	1.71	31.52	3.28	0.55	16.77
Fe	23.41	10.06	42.98	45.23	29.31	64.81	10.70	4.07	38.01
Cu	1.49	0.62	41.64	2.56	0.55	21.49	5.61	0.61	10.89
Mn	88.80	20.55	23.14	95.32	39.33	41.26	44.24	11.00	24.87
Zn	1.27	0.45	35.43	2.85	0.40	13.98	5.36	0.86	15.95
B	0.21	0.064	29.99	0.23	0.05	20.43	0.24	0.10	42.38

= Promedio; S = Desviación estándar; CV = Coeficiente de Variación.

**Tabla 2. Promedios, desviaciones estándar y coeficientes de variación de cada una de las variables medidas en las suertes, en el T2.**

Variable	Peralonso, suerte 121			Santa Elena, suerte 80			San Rafael, suerte 261		
		S	CV		S	CV		S	CV
Da	1.13	0.10	8.62	1.40	0.10	7.44	1.23	0.10	7.80
Arcilla	55.39	5.88	10.61	40.06	3.88	9.68	36.79	2.42	6.59
CIC	30.51	3.42	11.20	21.16	2.52	11.90	15.85	2.51	15.83
pH	7.17	0.38	5.35	6.69	0.16	2.33	6.91	0.21	3.11
MO	3.11	0.22	7.22	3.05	0.21	7.05	3.37	0.16	4.84
N	0.10	0.02	18.97	0.10	0.02	22.45	0.11	0.02	15.50
P	10.99	3.77	34.30	22.01	24.28	110.33	70.29	17.73	25.22
K	0.28	0.09	31.94	0.32	0.09	28.11	0.29	0.08	26.53
Na	0.29	0.06	19.22	0.28	0.09	30.68	0.31	0.04	13.31
Ca	12.28	1.57	12.83	16.38	1.94	11.86	11.00	1.15	10.45
Mg	10.53	0.96	9.10	5.79	0.64	11.07	2.17	0.28	12.88
Fe	2.75	1.62	59.13	15.35	5.97	38.89	24.59	6.86	27.91
Cu	0.96	0.29	29.91	1.61	0.37	23.29	6.73	0.46	6.88
Mn	88.50	16.52	18.68	135.95	15.81	11.63	40.88	10.02	24.51
Zn	0.68	0.19	28.03	3.26	0.39	12.06	4.87	0.49	10.14
B	0.19	0.07	37.37	0.21	0.05	22.46	0.15	0.03	23.86

**= Promedio; S = Desviación estándar; CV = Coeficiente de Variación.**

**Tabla 3. Coeficientes de correlación lineal de Pearson y nivel de significancia de las propiedades físicas y químicas evaluadas en cada suerte, en el tratamiento 1 (T1).**

	pH	MO	N	P	K	Na	Ca	Mg	CIC	Fe	Cu	Mn	Zn	B	Da	Arcilla
pH		-0.2088 0.0063	0.0429 0.5784	-0.2007 0.0087	-0.0317 0.6812	0.4020 <.0001	0.3029 <.0001	0.4828 <.0001	0.5153 <.0001	-0.1877 0.0143	-0.3255 <.0001	0.1264 0.1004	-0.4375 <.0001	0.1096 0.1547	-0.4550 <.0001	0.4045 <.0001
MO			0.1780 0.0202	0.1265 0.1003	0.1266 0.0999	-0.0586 0.4478	-0.0152 0.8435	-0.0977 0.2050	-0.0908 0.2387	-0.2086 0.0063	0.1336 0.0824	-0.2471 0.0012	0.1650 0.0316	0.1744 0.0230	-0.0518 0.5023	-0.0266 0.7309
N				0.6459 <.0001	0.0494 0.5228	-0.2765 0.0003	-0.4970 <.0001	-0.3010 <.0001	-0.2407 0.0016	-0.4878 <.0001	0.6708 <.0001	0.4902 <.0001	0.5864 <.0001	0.0839 0.2769	-0.2826 0.0002	-0.2486 0.0011
P					-0.0915 0.2352	-0.5038 <.0001	-0.5580 <.0001	-0.6027 <.0001	-0.5087 <.0001	-0.3816 <.0001	0.7387 <.0001	-0.4646 <.0001	0.8297 <.0001	0.0367 0.6346	0.0526 0.4954	-0.5698 <.0001
K						0.2187 0.0042	0.4009 <.0001	0.4042 <.0001	-0.0140 0.8559	0.0585 0.4486	-0.2711 0.0003	0.3767 <.0001	-0.1676 0.0289	-0.1641 0.0325	-0.1961 0.0104	0.2634 0.0005
Na							0.7058 <.0001	0.8039 <.0001	0.4751 <.0001	0.0201 0.7943	-0.6200 <.0001	0.3232 <.0001	-0.6335 <.0001	-0.2878 0.0001	-0.4778 <.0001	0.7958 <.0001
Ca								0.7773 <.0001	0.3719 <.0001	0.2145 0.0050	-0.8019 <.0001	0.6034 <.0001	-0.7119 <.0001	-0.1599 0.0373	-0.2183 0.0042	0.6410 <.0001
Mg									0.6301 <.0001	0.0794 0.3036	-0.8071 <.0001	0.4771 <.0001	-0.8139 <.0001	-0.1911 0.0125	-0.5228 <.0001	0.9121 <.0001
CIC										0.0040 0.9592	-0.6079 <.0001	0.2087 0.0063	-0.6940 <.0001	-0.0834 0.2795	-0.3889 <.0001	0.7002 <.0001
Fe											-0.3268 <.0001	0.6748 <.0001	-0.2696 0.0004	0.0749 0.3318	0.2886 0.0001	0.0137 0.8597
Cu												-0.6382 <.0001	0.8920 <.0001	0.1067 0.1660	0.1260 0.1016	-0.7184 <.0001
Mn													-0.5249 <.0001	-0.0537 0.4870	0.0721 0.3501	0.3383 <.0001
Zn														-0.0131 0.8651	0.2066 0.0069	-0.7660 <.0001
B															0.1552 0.0471	-0.2820 0.0002
Da																-0.5542 <.0001
Arcilla																

**Tabla 4. Coeficientes de correlación lineal de Pearson y nivel de significancia de las propiedades físicas y químicas evaluadas en cada suerte, en el tratamiento 2 (T2).**

	pH	MO	N	P	K	Na	Ca	Mg	CIC	Fe	Cu	Mn	Zn	B	Da	Arcilla
pH		-0.1554 0.0430	-0.2070 0.0068	-0.1363 0.0764	-0.3635 <.0001	0.1361 0.0768	-0.1945 0.0110	0.3464 <.0001	0.2940 <.0001	-0.3830 <.0001	-0.1518 0.0482	-0.2302 0.0025	-0.4242 <.0001	-0.0189 0.8063	-0.4382 <.0001	0.3094 <.0001
MO			0.5026 <.0001	0.4857 <.0001	0.2886 0.0001	0.0481 0.5334	-0.2841 0.0002	-0.3666 <.0001	-0.2543 0.0008	0.3004 <.0001	0.5470 <.0001	-0.4309 <.0001	0.4373 <.0001	-0.4830 <.0001	-0.2282 0.0028	-0.1337 0.0822
N				0.3399 <.0001	0.3053 <.0001	-0.0539 0.4850	0.0407 0.5986	-0.2188 0.0042	-0.1255 0.1029	0.1242 0.1065	0.2718 0.0003	-0.1579 0.0397	0.2939 0.0001	-0.4091 <.0001	-0.0689 0.3719	-0.1224 0.1118
P					0.1503 0.0504	-0.0055 0.9431	-0.3059 <.0001	-0.7716 <.0001	-0.6631 <.0001	0.6845 <.0001	0.8118 <.0001	-0.5771 <.0001	0.7974 <.0001	-0.4434 <.0001	0.0780 0.3122	-0.6002 <.0001
K						-0.2099 0.0060	0.0860 0.2646	-0.0808 0.2951	-0.0353 0.6476	0.1603 0.0368	-0.0091 0.9059	0.2479 0.0011	0.1790 0.0195	-0.1149 0.1357	0.1801 0.0188	-0.0992 0.1981
Na							0.0004 0.9958	-0.0238 0.7577	0.0063 0.9353	0.1254 0.1032	0.1421 0.0645	-0.1482 0.0537	0.0549 0.4767	-0.1683 0.0283	-0.1768 0.0211	0.0681 0.3775
Ca								0.2036 0.0077	0.1777 0.0204	-0.2486 0.0011	-0.5170 <.0001	0.7327 <.0001	-0.0987 0.2004	0.0853 0.2689	0.3980 <.0001	0.0817 0.2895
Mg									0.9388 <.0001	-0.8799 <.0001	-0.8736 <.0001	0.4166 <.0001	-0.9630 <.0001	0.1828 0.0171	-0.3742 <.0001	0.9058 <.0001
CIC										-0.8216 <.0001	-0.7751 <.0001	0.3260 <.0001	-0.8815 <.0001	0.0264 0.7326	-0.4429 <.0001	0.9133 <.0001
Fe											0.7909 <.0001	-0.3268 <.0001	0.8786 <.0001	-0.1676 0.0289	0.3413 <.0001	-0.8086 <.0001
Cu												-0.7469 <.0001	0.8393 <.0001	-0.3686 <.0001	-0.0054 0.9440	-0.6676 <.0001
Mn													-0.3528 <.0001	0.4449 <.0001	0.4136 <.0001	0.1819 0.0176
Zn														-0.2679 0.0004	0.3820 <.0001	-0.8509 <.0001
B															0.3227 <.0001	-0.0429 0.5785
Da																-0.5554 <.0001
Arcilla																

**ANEXO 4. Tablas de frecuencias para la relación MO/N en las diferentes suertes analizadas.**

**Tabla 1.** Tabla de frecuencias para la relación MO/N en la hacienda Peralonso, suerte 121, tratamiento T1.

<b>Relación <math>\frac{\%MO}{\%N}</math></b>	<b>Conteo total de número de muestras</b>	<b>Porcentaje equivalente</b>
<25	3	5.00
25-35	10	16.67
36-45	18	30.00
46-55	5	8.33
≥56	24	40.00
<b>Total</b>	<b>60</b>	<b>100.00</b>

**Tabla 2.** Tabla de frecuencias para la relación MO/N en la hacienda Peralonso, suerte 121, tratamiento T2.

<b>Relación <math>\frac{\%MO}{\%N}</math></b>	<b>Conteo total de número de muestras</b>	<b>Porcentaje equivalente</b>
<25	3	5.00
25-35	37	61.67
36-45	18	30.00
46-55	2	3.33
≥56	0	0.00
<b>Total</b>	<b>60</b>	<b>100.00</b>

**Tabla 3.** Tabla de frecuencias para la relación MO/N en la hacienda Santa Elena, suerte 80, tratamiento T1.

<b>Relación <math>\frac{\%MO}{\%N}</math></b>	<b>Conteo total de número de muestras</b>	<b>Porcentaje equivalente</b>
<25	0	0.00
25-35	0	0.00
36-45	0	0.00
46-55	0	0.00
≥56	50	100.00
<b>Total</b>	<b>50</b>	<b>100.00</b>



**Tabla 4.** Tabla de frecuencias para la relación MO/N en la hacienda Santa Elena, suerte 80, tratamiento T2.

<b>Relación <math>\frac{\%MO}{\%N}</math></b>	<b>Conteo total de número de muestras</b>	<b>Porcentaje equivalente</b>
<25	7	14.00
25-35	26	52.00
36-45	16	32.00
46-55	1	2.00
≥56	0	0.00
<b>Total</b>	<b>50</b>	<b>100.00</b>

**Tabla 5.** Tabla de frecuencias para la relación MO/N en la hacienda San Rafael, suerte 261, tratamiento T1.

<b>Relación <math>\frac{\%MO}{\%N}</math></b>	<b>Conteo total de número de muestras</b>	<b>Porcentaje equivalente</b>
<25	18	30.00
25-35	41	68.33
36-45	1	1.67
46-55	0	0.00
≥56	0	0.00
<b>Total</b>	<b>60</b>	<b>100.00</b>

**Tabla 6.** Tabla de frecuencias para la relación MO/N en la hacienda San Rafael, suerte 261, tratamiento T2.

<b>Relación <math>\frac{\%MO}{\%N}</math></b>	<b>Conteo total de número de muestras</b>	<b>Porcentaje equivalente</b>
<25	3	5.00
25-35	45	75.00
36-45	12	20.00
46-55	0	0.00
≥56	0	0.00
<b>Total</b>	<b>60</b>	<b>100.00</b>