



ACTIVIDAD 012 - EVALUACIÓN DE LA INCIDENCIA DE LA APLICACIÓN DE VINAZAS

CONVENIO INTERADMINISTRATIVO CVC No. 102 DE 2021
CELEBRADO ENTRE LA CORPORACIÓN AUTÓNOMA REGIONAL
DEL VALLE DEL CAUCA -CVC- Y LA UNIVERSIDAD NACIONAL DE
COLOMBIA SEDE PALMIRA



Noviembre de 2022



UNIVERSIDAD
NACIONAL
DE COLOMBIA

EVALUACIÓN DE LA INCIDENCIA DE LA APLICACIÓN DE VINAZAS

PROYECTO 1001 RESULTADO 1 ACTIVIDAD 012

**MONITOREO Y SEGUIMIENTO A LA CALIDAD DEL
AGUA SUBTERRÁNEA Y EL SUELO EN SITIOS
PRIORIZADOS – VIGENCIAS 2021 Y 2022**

INFORME FINAL

**CONVENIO INTERADMINISTRATIVO CVC No. 102
DE 2021 CELEBRADO ENTRE LA CORPORACIÓN
AUTÓNOMA REGIONAL DEL VALLE DEL CAUCA -
CVC- Y LA UNIVERSIDAD NACIONAL DE
COLOMBIA SEDE PALMIRA-FACULTAD DE
INGENIERÍA Y ADMINISTRACIÓN**

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA
NOVIEMBRE DE 2022**

EQUIPO DE TRABAJO

Germán Rueda Saa
Director del Proyecto

Dorian Prato García
Asesor

Roosevelt Moreno Rodríguez
Asesor

Liseth González Delgado
Coordinadora General

Roberto Ramírez
Ingeniero M.Sc Ingeniería Agroindustrial

Diego López
Ingeniero M.Sc Ingeniería Química

EQUIPO DE TRABAJO CVC

Herbert Olaya Cuesta
Supervisor

Claudia Martínez Herrera
Profesional DTA

Gustavo Adolfo Romero
Profesional DTA

Miguel Ángel Díaz
Profesional DTA

Christian De Jesús Sánchez Elizalde
Profesional DTA

CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN.....	10
2. MARCO REFERENCIAL.....	11
2.1. GESTIÓN SOSTENIBLE DEL SUELO	11
2.2. GESTIÓN DEL RECURSO HÍDRICO – AGUAS SUBTERRÁNEAS.....	12
2.3. ANTECEDENTES DE LA APLICACIÓN DE VINAZAS EN SUELOS AGRÍCOLAS CULTIVADOS CON CAÑA DE AZÚCAR	14
2.4. MARCO NORMATIVO	20
3. ÁREA DE ESTUDIO	21
4. METODOLOGÍA.....	25
4.1 CONCEPTUALIZACIÓN	25
4.2 PRIORIZACIÓN DE SITIOS DE MUESTREO	26
4.3. DESCRIPCIÓN DE UNIDADES CARTOGRÁFICAS DE LOS SITIOS MONITOREADOS.....	29
4.3.1. Ingenio Rio Paila	29
4.3.2. Ingenio Incauca	30
4.3.3. Ingenio Mayaguez	32
4.3.4. Ingenio Risaralda	35
4.3.5. Ingenio Providencia	36
4.3.6. Ingenio Manuelita	37
4.4. DISEÑO DE CAMPAÑAS DE MUESTREO Y SEGUIMIENTO A LA CALIDAD DEL SUELO Y AGUA SUBTERRÁNEA EN SITIOS PRIORIZADOS	40
4.4.1. Sitios priorizados de muestreo Municipio Bugalagrande.....	43
4.4.2. Sitios priorizados de muestreo del Municipio El Cerrito.	45
4.4.3. Sitios priorizados de muestreo en el Municipio de Palmira.	48
4.4.4. Sitios priorizados de muestreo del Municipio de Candelaria.	51
4.4.5. Sitios priorizados de muestreo Municipios de Jamundí.	54
4.4.6. Sitios priorizados de muestreo en el Municipio de Cartago.....	56
4.5. MUESTREO DE SUELOS Y AGUAS SUBTERRÁNEAS	58
4.5.1 Muestreo de suelos.....	58
4.5.2 Muestreo de aguas subterráneas.....	60
4.5.3 Rutas de muestreo de suelos y aguas subterráneas	61
5. CAMPAÑAS DE MUESTREO DE SUELOS Y AGUA SUBTERRÁNEA.....	66
5.1. CAMPAÑAS DE MUESTREO DE SUELOS	66
5.2. CAMPAÑA DE MUESTREO DE AGUA SUBTERRÁNEA	70
6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	74
6.1. ANÁLISIS DE LAS PROPIEDADES DE SUELOS EN CULTIVOS DE CAÑA DE AZÚCAR	74
6.1.1. Resultados propiedades suelos en sitios priorizados del Ingenio Rio Paila	74
6.1.2. Resultados propiedades suelos en sitios priorizados del Ingenio Rio Mayagüez	79
6.1.3. Resultados propiedades suelos en sitios priorizados del Ingenio Risaralda ...	83

6.1.4.	Resultados propiedades suelos en sitios priorizados del Ingenio del Cauca ..	85
6.1.5.	Resultados propiedades suelos en sitios priorizados del Ingenio Providencia	89
6.1.6.	Resultados propiedades suelos en sitios priorizados del Ingenio Manuelita ...	93
6.2.	ANÁLISIS DE LA CALIDAD DEL AGUA SUBTERRÁNEA EN POZOS PRIORIZADOS EN CULTIVOS DE CAÑA DE AZÚCAR	97
6.2.1.	Resultados calidad de agua subterránea en pozos priorizados en predios del Ingenio Rio Paila	97
6.2.2.	Resultados calidad de agua subterránea en pozos priorizados en predios del Ingenio Mayagüez	99
6.2.3.	Resultados calidad de agua subterránea en pozos priorizados en predios del Ingenio Providencia.....	102
6.2.4.	Resultados calidad de agua subterránea en pozos priorizados en predios del Ingenio Risaralda	104
6.2.5.	Resultados calidad de agua subterránea en pozos priorizados en predios del Ingenio del Cauca	106
6.2.6.	Resultados calidad de agua subterránea en pozos priorizados en predios del Ingenio Manuelita	107
6.3.	CARACTERIZACIÓN DE DERIVADOS DE VINAZA Y AGUA DE RIEGO APLICADA EN CULTIVOS DE CAÑA DE AZÚCAR	110
6.3.1.	Caracterización de derivados de la vinaza para los Ingenios	110
6.3.2.	Análisis de derivados de la vinaza vs criterios calidad de la OMS	112
6.3.3.	Caracterización de agua de riego.....	119
7.	SOCIALIZACIONES	122
8.	CONSIDERACIONES FINALES	126
9.	RECOMENDACIONES	127
10.	BIBLIOGRAFÍA.....	128

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Caracterización química de la vinaza.	14
Tabla 2. Principales parámetros de fertilizantes preparados a partir de vinazas.	17
Tabla 3. Investigaciones realizadas en vinazas en Colombia	18
Tabla 4. Investigaciones relacionadas con el análisis de lixiviados de suelos a los que se les ha aplicado vinaza	19
Tabla 5. Sitios priorizados para monitoreo de la calidad del suelo y agua subterránea.	26
Tabla 6. Características de los sitios de monitoreo priorizados.	40
Tabla 7. Comportamiento histórico de algunas variables de calidad de agua subterránea en sitios priorizados.	42
Tabla 8. Sitios priorizados de muestreo en predios Ingenio Rio Paila del Municipio de Bugalagrande	44
Tabla 9. Sitios priorizados de muestreo del Ingenio Providencia en el Municipio de Cerrito	47
Tabla 10. Sitios priorizados de muestreo en Palmira – Ingenio Manuelita.	50
Tabla 11. Sitios priorizados de muestreo del en Candelaria Ingenio Mayaguez	52
Tabla 12. Sitios priorizados de muestreo Ingenio del Cauca en el Municipio de Jamundí	55
Tabla 13. Sitios priorizados de muestreo Ingenio Risaralda en el Municipio de Cartago	57
Tabla 14. Cronograma de muestreo de suelos en puntos priorizados, Vigencia 2021	68
Tabla 15. Cronograma de muestreo de suelos en puntos priorizados – Vigencia 2022	69
Tabla 16. Cronograma de muestreo de agua subterránea en puntos priorizados – Vigencia 2021	71
Tabla 17. Cronograma de muestreo de agua subterránea en puntos priorizados – Vigencia 2022	73
Tabla 18. Resultados de las propiedades físico-químicas de suelos en puntos priorizados para el ingenio Rio Paila.	75
Tabla 19. Resultados de las propiedades físico-químicas de suelos en puntos priorizados para el ingenio Rio Paila.	76
Tabla 20. Estadística descriptiva de propiedades del suelo en cultivos de caña de azúcar, Ingenio Rio Paila.	77
Tabla 21. Resultados de las propiedades físico-químicas de suelos en puntos priorizados para el Ingenio Mayaguez.	79
Tabla 22. Resultados de las propiedades físico-químicas de suelos en puntos priorizados para el Ingenio Mayaguez.	80
Tabla 23. Estadística descriptiva de propiedades del suelo en cultivos de caña de azúcar, Ingenio Mayaguez.	81
Tabla 24. Resultados de las propiedades físico-químicas de suelos en puntos priorizados para el Ingenio Risaralda.	83
Tabla 25. Estadística descriptiva de propiedades del suelo en cultivos de caña de azúcar, Ingenio Risaralda.	83
Tabla 26. Resultados de las propiedades físico-químicas de suelos en puntos priorizados, Ingenio Incauca.	86
Tabla 27. Estadística descriptiva de propiedades del suelo en cultivos de caña de azúcar, Ingenio Incauca.	87
Tabla 28. Resultados de las propiedades físico-químicas de suelos en puntos priorizados, Ingenio Providencia.	89

Tabla 29. Resultados de las propiedades físico-químicas de suelos en puntos priorizados, Ingenio Providencia.	90
Tabla 30. Estadística descriptiva de propiedades del suelo en cultivos de caña de azúcar, Ingenio Providencia.	91
Tabla 31. Resultados de las propiedades físico-químicas de suelos en puntos priorizados, Ingenio Manuelita.	93
Tabla 32. Resultados de las propiedades físico-químicas de suelos en puntos priorizados, Ingenio Manuelita.	94
Tabla 33. Estadística descriptiva de propiedades del suelo en cultivos de caña de azúcar, Ingenio Manuelita.	95
Tabla 34. Resultados de la calidad del agua subterránea en puntos priorizados, Ingenio Rio Paila.	97
Tabla 35. Resultados de la calidad del agua subterránea en puntos priorizados, Ingenio Rio Paila.	98
Tabla 36. Estadística descriptiva de propiedades en aguas subterráneas en pozos ubicados en cultivos de caña, Ingenio Rio Paila.	98
Tabla 37. Resultados de la calidad del agua subterránea en puntos priorizados, Ingenio Mayaguez.	100
Tabla 38. Resultados de la calidad del agua subterránea en puntos priorizados, Ingenio Mayaguez.	101
Tabla 39. Estadística descriptiva de propiedades en aguas subterráneas en pozos ubicados en cultivos de caña de azúcar, Ingenio Mayaguez.	101
Tabla 40. Resultados de la calidad del agua subterránea en puntos priorizados, Ingenio Providencia.	102
Tabla 41. Resultados de la calidad del agua subterránea en puntos priorizados, Ingenio Providencia.	103
Tabla 42. Estadística descriptiva de propiedades en aguas subterráneas en pozos ubicados en cultivos de caña de azúcar, Ingenio Providencia.	103
Tabla 43. Resultados de la calidad del agua subterránea en puntos priorizados, Ingenio Risaralda.	104
Tabla 44. Estadística descriptiva de propiedades en aguas subterráneas en pozos ubicados en cultivos de caña de azúcar, Ingenio Risaralda.	105
Tabla 45. Resultados de la calidad del agua subterránea en puntos priorizados, Ingenio Incauca.	106
Tabla 46. Estadística descriptiva de propiedades en aguas subterráneas en pozos ubicados en cultivos de caña de azúcar, Ingenio Incauca.	107
Tabla 47. Resultados de la calidad del agua subterránea en puntos priorizados, Ingenio Manuelita.	108
Tabla 48. Resultados de la calidad del agua subterránea en puntos priorizados, Ingenio Manuelita.	109
Tabla 49. Estadística descriptiva de propiedades en aguas subterráneas en pozos ubicados en cultivos de caña de azúcar, Ingenio Manuelita.	109
Tabla 50. Características de la vinaza aplicada sobre los cultivos de caña de azúcar.	111
Tabla 51. Características de la vinaza aplicada sobre los cultivos de caña de azúcar.	112
Tabla 52. Comparación entre la caracterización de la vinaza aplicada y los parámetros establecidos por la WHO (2006), Vinaza Ingenio Rio Paila.	113
Tabla 53. Comparación entre la caracterización de la vinaza aplicada y los parámetros establecidos por la WHO (2006), Vinaza Ingenio Mayaguez.	114

Tabla 54. Comparación entre la caracterización de la vinaza aplicada y los parámetros establecidos por la WHO (2006), Vinaza Ingenio Providencia.	115
Tabla 55. Comparación entre la caracterización de la vinaza aplicada y los parámetros establecidos por la WHO (2006), Vinaza Ingenio Risaralda.	116
Tabla 56. Comparación entre la caracterización de la vinaza aplicada y los parámetros establecidos por la WHO (2006), Vinaza Ingenio Incauca.	117
Tabla 57. Comparación entre la caracterización de la vinaza aplicada y los parámetros establecidos por la WHO (2006), Vinaza Ingenio Manuelita.	118
Tabla 58. Características típicas de la vinaza obtenida a partir de caña de azúcar.	119
Tabla 59. Características del agua de riego aplicada sobre cultivos de caña de azúcar.	119
Tabla 60. Características del agua de riego aplicada sobre cultivos de caña de azúcar.	120
Tabla 61. Características del agua de riego empleada en agricultura FAO (1989).	121

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Unidad fertilizadora empleada en campo para la incorporación de vinaza.	15
Figura 2. Representación esquemática de los procesos y condiciones en el suelo que pueden verse afectadas por el riego con vinaza. Tomado y modificado de Moran et al. (2016).	16
Figura 3. Área de estudio - Cuencas asociadas a los predios priorizados	21
Figura 4. Localización de sitios priorizados para el monitoreo de la calidad de suelo y agua subterránea.	28
Figura 5. Sitios de muestreo ubicados en predios del Municipio de Bugalagrande.	45
Figura 6. Sitios de muestreo pertenecientes al Municipio El Cerrito.	48
Figura 7. Sitios de muestreo pertenecientes al Municipio de Palmira.	51
Figura 8. Sitios de muestreo pertenecientes al Municipio de Candelaria.	54
Figura 9. Sitios de muestreo pertenecientes al Municipio de Jamundí.	56
Figura 10. Sitios de muestreo pertenecientes al Municipio de Cartago.	57
Figura 11. Esquema metodológico para la toma de muestras de suelo	58
Figura 12. Muestreo por Cuadrillas reportado por Khomutinin et al. (2020).	59
Figura 13. Ruta de acceso a los sitios de muestreo asociados al Ingenio Manuelita.	62
Figura 14. Ruta de acceso a los sitios de muestreo asociados al Ingenio Risaralda.	63
Figura 15. Ruta de acceso a los sitios de muestreo asociados al Ingenio Providencia.	63
Figura 16. Ruta de acceso a los sitios de muestreo asociados al Ingenio Mayaguez.	64
Figura 17. Ruta de acceso a los sitios de muestreo asociados al Ingenio Rio Paila.	65
Figura 18. Ruta de acceso a los sitios de muestreo asociados al Ingenio Incauca.	65
Figura 19. Proceso de muestreo de suelo en puntos priorizados.	67
Figura 20. Proceso de muestreo de suelo en puntos priorizados.	71
Figura 21. Resultados de propiedades fisicoquímicas del suelo en puntos priorizados asociados al Ingenio Rio Paila.	78
Figura 22. Resultados de propiedades fisicoquímicas del suelo en puntos priorizados asociados al Ingenio Mayaguez.	82
Figura 23. Resultados de propiedades fisicoquímicas del suelo en puntos priorizados asociados al Ingenio Risaralda.	85
Figura 24. Resultados de propiedades fisicoquímicas del suelo en puntos priorizados asociados al Ingenio Incauca.	88
Figura 25. Resultados de propiedades fisicoquímicas del suelo en puntos priorizados asociados al Ingenio Providencia.	92
Figura 26. Resultados de propiedades fisicoquímicas del suelo en puntos priorizados asociados al Ingenio Manuelita.	96
Figura 27. Reunión CVC-UNAL-UMATA septiembre 10 de 2021.	122
Figura 28. Reunión funcionarios CVC de Recursos Hídricos.	123
Figura 29. Reunión funcionarios CVC y personal de algunos ingenios del Valle del Cauca.	123
Figura 30. Socialización de avances con el comité técnico de la CVC.	124
Figura 31. Socialización de resultados con el comité técnico de la CVC y personal del grupo de Recursos Hidricos de CVC.	124
Figura 32. Socializaciones de avance de acciones asociadas a la actividad 012 del Convenio CVC – UNAL.	125

Figura 33. Socialización final de la actividad 012 del Convenio CVC – UNAL.

125

LISTA DE FOTOGRAFÍA

Fotografía 1. Sitios priorizados en el Ingenio Rio Paila.	43
Fotografía 2. Sitios priorizados en el Ingenio Providencia.	46
Fotografía 3. Sitios priorizados en el Ingenio Manuelita.	49
Fotografía 4. Sitios priorizados en el Ingenio Mayagüez.	52
Fotografía 5. Sitios priorizados en el Ingenio Incauca.	55
Fotografía 6. Sitios priorizados en el Ingenio Risaralda.	56
Fotografía 7. Toma de muestras en diferentes cultivos de caña de azúcar.	66
Fotografía 8. Toma de muestra de agua en campo.	70
Fotografía 9. Toma de muestra de vinaza y agua de riego.	110

1. INTRODUCCIÓN

A través del tiempo y de manera constante, la calidad y características de los suelos y de las aguas subterráneas son modificadas por procesos geomorfológicos, climáticos, ecológicos, además de la incidencia socioeconómica, cultural y política a las cuales se encuentran sometidos estos recursos. Es por esto que se hace necesario el monitoreo y seguimiento de estos recursos, buscando evaluar el impacto que generan las diferentes prácticas agronómicas en cultivos agrícolas. Entre estas prácticas se encuentra la fertiirrigación de suelos sembrados con caña de azúcar mediante el uso o incorporación de derivados de la vinaza, que es un subproducto generado de la producción de alcohol etílico y azúcar, que es mezclado con urea para su incorporación en el suelo. Este producto presenta características específicas que le confieren un gran potencial de aprovechamiento, principalmente potasio, sin embargo, es necesario hacer seguimiento a la calidad de los suelos y de las aguas subterráneas y garantizar la prevención y protección del medio edáfico y las aguas subterráneas.

En este sentido, en el marco del Convenio interadministrativo 102 de 2021, celebrado entre la Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca y la Universidad Nacional de Colombia Sede Palmira, se presentan los resultados del monitoreo y seguimiento a la calidad de suelos y aguas subterráneas en 42 sitios priorizados por la CVC donde se emplea la vinaza como fertilizante en cultivos de caña de azúcar. Este estudio hace parte del Proyecto 1001 - Resultado 1 - Actividad 012 “**Evaluación de la incidencia de la aplicación de vinazas**” para las vigencias 2021 y 2022.

El estudio se desarrolló en municipios priorizados por la CVC (Palmira, El Cerrito, Candelaria, Bugalagrande, Cartago y Jamundí), en suelos cultivados con caña de azúcar donde se encuentran pozos de monitoreo de aguas subterráneas, para el monitoreo y seguimiento a la calidad de suelos y aguas respectivamente. Se presentan los resultados de las propiedades fisicoquímicas de suelos y agua de pozo en 42 sitios definidos por la CVC (pozos someros de monitoreo de agua subterránea y suelos cultivados con caña de azúcar), para las vigencias 2021 y 2022.

Las etapas en el desarrollo de la Actividad 012 fueron: i) levantamiento de información del estado actual de las parcelas experimentales, ii) recopilación de la información actualizada relacionada con la aplicación de vinazas en suelos cultivados con caña de azúcar, iii) campañas de monitoreo y seguimiento a la calidad del agua subterránea y el suelo en sitios priorizados, y iv) socialización de las actividades realizadas a usuarios relacionados con el uso y aplicación de vinaza y a personal de la CVC.

Este proyecto hace parte de la responsabilidad ambiental de la CVC con los recursos naturales, el monitoreo y seguimiento al impacto de prácticas agronómicas en cultivos agrícolas encaminado a la gestión sostenible del suelo en el Valle del Cauca y está articulado con la política definida por el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible en el año 2016.

2. MARCO REFERENCIAL

2.1. GESTIÓN SOSTENIBLE DEL SUELO

El suelo se puede definir como un componente natural y finito, constituido principalmente por minerales, agua, aire, materia orgánica y organismos vivos, los cuales interactúan entre sí mediante procesos bióticos y abióticos, siendo estas funciones vitales para el buen funcionamiento de la sociedad y del planeta. Constantemente, los suelos son modificados por procesos climáticos, geomorfológicos y ecológicos del territorio, además de la incidencia directa de los procesos socio económicos, culturales y políticos a los que se ven sometidos. En Colombia se presentan doce órdenes de suelos, entre los cuales se destacan los poco evolucionados (entisoles e inceptisoles), los suelos evolucionados y poco fértiles (ultisoles y oxisoles), y los suelos altamente fértiles (andisoles y molisoles) con una presencia en el territorio del 58.11%, 28.79% y 7.5%, respectivamente (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2016).

De acuerdo con datos del IGAC, en el país 22 millones de hectáreas tienen vocación agrícola, 15 millones de hectáreas asociadas a la ganadería y 4 millones agroforestal. Sin embargo, en el panorama nacional se reporta el uso de 5 millones de hectáreas para uso agrícola, y más de 34 millones de hectáreas para actividades ganaderas, reflejando una inconsistencia en la utilización actual de los suelos. Adicionalmente, el incremento poblacional y la dinámica económica requieren una demanda creciente sobre los servicios ecosistémicos ofrecidos por el recurso suelo, generando un rápido deterioro del medio edáfico (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2016).

Teniendo en cuenta la problemática asociada a la gestión sostenible del suelo, el IDEAM en colaboración con el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible - MADS, realizaron un diagnóstico para valorar dicha situación. El diagnóstico se compone de varios componentes: i) fuerzas motrices, siendo estas las fuerzas que inducen al cambio o proceso de degradación del suelo (incremento de la población, actividades agropecuarias insostenibles, explotación de hidrocarburos y minería, industria, construcciones, turismo, actividades portuarias, políticas y normas institucionales, cultura, desarrollo en conocimiento, ciencia y tecnología, ordenamiento del suelo, variabilidad ambiental, cambio climático), ii) presión, refiriéndose a los puntos de estrés ambiental (expansión urbano sin criterios sostenibles, uso de productos químicos, deforestación e incendios, labranza convencional, factores de fragilidad del suelo, expansión de actividades turísticas y portuarias), iii) estado del suelo, siendo esta la condición o componente ambiental bajo estudio (sellamiento, erosión, contaminación, pérdida de materia orgánica y biota, desbalance de nutrientes, compactación), iv) impacto, relacionado con los efectos de un factor de estrés en el funcionamiento de un ecosistema (disminución de la productividad, pérdida de la biodiversidad, cambio en el régimen de agua del suelo y ciclos hidrológicos, cambio climático, cambio en el paisaje, pérdida de servicios ecosistémicos asociados al suelo, afectación a la salud humana y animal) y, v) respuesta, con relación a las reacciones sociales y políticas que puedan reducir las fuerzas motrices y presiones (educación, capacitación, sensibilización, fortalecimiento institucional, armonización de normas y políticas, fortalecimiento de instrumentos de planificación ambiental, monitoreo y seguimiento de la calidad del suelo, investigación, innovación, preservación, restauración y uso sostenible del suelo) (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2016).

En este sentido, la Política para la Gestión Sostenible del Suelo (MADS, 2016) promueve el manejo sostenible del suelo en Colombia durante los próximos 20 años, en un contexto en el que confluyan la conservación de la biodiversidad, el agua y el aire, el ordenamiento del territorio y la gestión del riesgo, contribuyendo al desarrollo sostenible y al bienestar de los colombianos. Las líneas estratégicas del Plan de Acción para la gestión sostenible del suelo están relacionadas con: 1. Fortalecimiento institucional y armonización de normas y políticas; 2. Educación, capacitación y sensibilización; 3. Fortalecimiento de instrumentos de planificación ambiental y sectorial; 4. Monitoreo y seguimiento a la calidad del suelo; 5. Investigación, innovación y transferencia de tecnología; y 6. Preservación, restauración, y uso sostenible del suelo (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2016).

Por tal motivo, se hace necesario el monitoreo y seguimiento a la calidad de suelos y aguas subterráneas en diferentes municipios del Valle del Cauca y su relación con la aplicación de derivados de la vinaza en cultivos de caña de azúcar. Este proyecto estará enmarcado en el programa 4 de la política de gestión sostenible del suelo, con campañas de monitoreo y seguimiento a la calidad del suelo como herramienta para la toma de decisiones referentes a su preservación, restauración y uso sostenible.

2.2. GESTIÓN DEL RECURSO HÍDRICO – AGUAS SUBTERRÁNEAS

Las aguas subterráneas son consideradas como uno de los recursos más importantes para el abastecimiento de poblaciones y un gran contribuyente para garantizar la seguridad alimentaria (Hadžić *et al.*, 2015). Así mismo, el suelo es un gran depósito de almacenamiento de agua para abastecer diferentes cuerpos hídricos; similarmente, el medio edáfico permite el crecimiento y desarrollo de plantas, además de su función como suministro de alimentos y de fibra (Nortcliff *et al.*, 2011).

Colombia es considerado como uno de los países con mayor riqueza hídrica en el mundo, debido a su localización geográfica, su orografía y una gran variedad de regímenes climáticos. Sin embargo, si se considera diferentes aspectos como el crecimiento poblacional, la ubicación de actividades socioeconómicas en regiones con baja oferta hídrica, la existencia de necesidades hídricas insatisfechas de los ecosistemas y el aumento del número de impactos de origen antrópico sobre el agua, se concluye que la disponibilidad del recurso es cada vez menor. La abundancia hídrica en Colombia puede ser cuantificada mediante valores de escurrimiento y rendimientos; para el caso de la región andina, corriente asociada al río Cauca el valor de escurrimiento es de 1684 mm, con un rendimiento de 53 l/s.km² (Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, 2010).

La mayor parte de los recursos hídricos disponibles y utilizables en el planeta, se encuentran en el subsuelo. Colombia presenta condiciones similares con un gran potencial de aguas subterráneas, donde aproximadamente el 75% del territorio, cuenta con zonas favorables para el almacenamiento de estas. En el caso de la cuenca del río Cauca, la oferta de agua subterránea con mejor posibilidad de explotación se encuentra relacionada con una extensión de 4600 km², con recursos dinámicos de 3 km³/año (Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, 2010).

Según estimaciones realizadas por el IDEAM, la demanda hídrica para el desarrollo de actividades agrícolas en Colombia se encuentra representada en un 54% del total, obteniendo un beneficio económico provisto por el recurso hídrico de 0.41 billones de

pesos/año aproximadamente (Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, 2010).

Por otro lado, se reporta que el manejo y la gestión del recurso hídrico se encuentran asociados al riesgo por déficit o exceso de agua. El déficit se puede interpretar como la generación de problemas de disponibilidad del recurso, desabastecimiento y racionamiento del mismo, mientras el exceso puede ser generador de inundaciones, avenidas torrenciales y/o deslizamientos. Con base a esto, la gestión realizada sobre el recurso hídrico se puede abordar mediante cuatro procesos: planificación, administración, seguimiento y monitoreo, además del manejo de conflictos relacionados con el agua (Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, 2010).

La planificación, es el proceso mediante el cual se establecen los planes de gestión ambiental regionales, planes de acción, los planes de ordenación y manejo de cuencas hidrográficas (POMCA), planes de ordenamiento del recurso hídrico (PORH) entre otros. La administración del recurso hídrico se relaciona principalmente con los permisos de concesión de aguas y de vertimientos de residuos líquidos. Para el caso puntual de la administración de las aguas subterráneas, se resalta que la mayoría de las autoridades ambientales cuentan con normatividad interna para trámites de exploración y concesión de aguas subterráneas. De forma paralela, adelantan diferentes actividades como la instalación de redes de monitoreo, campañas de muestreo y determinación de la calidad del agua, censos de usuarios, ejecución de obras civiles e implementación de cobros por concepto de tasas por uso y retributivas (Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, 2010).

Por su parte el seguimiento y monitoreo se encuentra asociado con la red de cuantificación de agua superficial y de calidad de la misma, con la cual cuenta el IDEAM. Adicionalmente, se menciona la integración con las corporaciones autónomas regionales en la conformación de la red nacional de monitoreo de aguas subterráneas, cuyo fin es generar la línea base requerida para proyectar el uso de este recurso a mediano y largo plazo. Por último, el conflicto por la afectación de la calidad del agua se puede relacionar con el desarrollo de actividades económicas, la presencia de centros poblados y de procesos erosivos (Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, 2010).

La gestión integral del recurso hídrico nace como respuesta a la crisis del agua, la cual se puede expresar como la presión insostenible sobre el recurso por efecto de la creciente demanda de agua, la contaminación y el crecimiento demográfico. Se puede definir como “un proceso que promueve la gestión y el aprovechamiento coordinado de los recursos hídricos, la tierra y los recursos naturales relacionados, con el fin de maximizar el bienestar social y económico de manera equitativa sin comprometer la sustentabilidad de los ecosistemas vitales”, según la Global Water Partnership – GWP. Es así, como la gestión integrada del agua es el principal referente para el diseño de modelos de gestión pública del recurso, siendo uno de estos la Política Nacional de Gestión Integral del Recurso Hídrico (GIRH). Para el marco conceptual de la política se han identificado cuatro aspectos los cuales son la oferta hídrica, la demanda, la calidad y los riesgos que afectan la oferta de agua. A su vez estos aspectos se encuentran relacionados con los objetivos de la política nacional de GIRH, para la cual se reporta como objetivo principal “Garantizar la sostenibilidad del recurso hídrico, mediante una gestión y un uso eficiente y eficaz, articulados al ordenamiento y uso del territorio y a la conservación de los ecosistemas que

regulan la oferta hídrica, considerando el agua como factor de desarrollo económico y de bienestar social, e implementando procesos de participación equitativa e incluyente”. Finalmente, el desarrollo de los objetivos establecidos en la política permitirá alcanzar el aseguramiento de la oferta del recurso, la optimización de la demanda, el minimizar la contaminación y, el prevenir los riesgos asociados a la oferta del recurso (Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, 2010). Disminuir los riesgos por contaminación asociados al uso y manejo inadecuado de residuos de la agroindustria colombiana como lo son las vinazas provenientes de la producción de alcohol etílico, comprendiendo que este tipo de compuesto por sus características presenta un gran poder contaminante, así como un gran valor en fertilización de suelos (Aristizabal, 2015).

2.3. ANTECEDENTES DE LA APLICACIÓN DE VINAZAS EN SUELOS AGRÍCOLAS CULTIVADOS CON CAÑA DE AZÚCAR

La caña de azúcar es una gramínea cultivada ampliamente en áreas tropicales y subtropicales a nivel mundial. Entre sus usos predomina la obtención de jugos y la extracción de sacarosa, así como en procesos fermentativos para la producción de etanol y ácido acético. Al ser producido a partir de fuentes renovables, el etanol presenta una importancia significativa para luchar contra la intensificación del cambio climático principalmente en la generación de gases de efecto invernadero (Páez *et al.*, 2016).

En concordancia con las políticas nacionales e internacionales de sostenibilidad, y dando cumplimiento a la Ley 693 del 2001 para potenciar la producción y aprovechamiento de la destilación de alcohol de caña de azúcar, en el Departamento del Valle del Cauca se han construido seis destilerías que generan más de 1050 m³/día de etanol, y como subproducto de la destilación se generan alrededor de 2500 m³/día de vinaza (Páez *et al.*, 2016). La vinaza es un líquido de color marrón oscuro, obtenido en el proceso de destilación de alcohol, en proporciones que puede variar entre 1 a 14 litros de vinaza por litro de alcohol anhidro. Las propiedades de la vinaza (químicas y densidad) pueden variar de acuerdo con el material usado para obtener el mosto (Tabla 1).

Tabla 1. Caracterización química de la vinaza.

Parámetros	Unidades	Manuelita	Mayagüez	Providencia
		Promedio	Promedio	Promedio
Grados Brix	%	50	12	16.3
pH	---	4.8	4.6	5.0
Carbono orgánico total	mg COT/L	242400	38932	68525
Sólidos totales	mg ST/L	565245.3	132661.5	161518
Demanda química de oxígeno	mg O ₂ /L	654756	145835	159120
Alcalinidad total	mg CaCO ₃ /L	7403.3	3440	2180
Conductividad Específica	µS/cm	31466.7	26450	34050
Sulfatos	mg SO ₄ /L	33447	4259	6608
Fosfatos	Mg PO ₄ /L	242	19.7	70
Nitrógeno amoniacal	mg N-NH ₃ /L	383.3	57.5	141.5
Nitratos	mg N-NO ₃ /L	5591	1422	1422
Cloruros	mg Cl/L	13824	1832.5	5058.5
Fenoles	mg Fenol/L	8.9	3.4	3.9

Fuente: Páez *et al.*, 2012.

Los ingenios que poseen destilería usan principalmente la vinaza como fertilizante líquido mediante una mezcla con urea (25 – 45%). Su aplicación a gran escala para el riego y fertilización de la caña, es una alternativa económica y eficaz debido a sus altos niveles de potasio, calcio y materia orgánica. En la actualidad, se incorporan alrededor de 11,000 ton/año de vinaza líquida (6 – 15 m³/ha), para cubrir 42,000 ha de cultivo que se encuentran sobre acuíferos con diferentes tipos de vulnerabilidad (Páez *et al.*, 2016). La vinaza incorporada en el suelo se relaciona con el incremento en la producción de caña de azúcar, aportando a las necesidades de potasio (K) del cultivo, cubriendo parte de los requerimientos de nitrógeno (N) y otros nutrientes, así como el aumento en la materia orgánica y la capacidad de intercambio catiónico del suelo (Cengicaña, 2017).

Este tipo de práctica se puede realizar empleando métodos manuales, por gravedad o por aspersion (inyección) sobre los surcos con dispositivos específicos instalados en los tractores de campo, con el fin de evitar la escorrentía superficial (Páez *et al.*, 2016). Los ingenios que cuentan con este tipo de práctica aplican vinaza líquida mezclada con urea en una relación de mezcla vinaza (lt) – úrea (bultos) de 1200 a 1300 y de 5 a 6 bultos, respectivamente. El transporte de este material hasta las suertes se realiza por medio de carrotaques con capacidad aproximada de 35,000 – 45,000 litros. Una vez el fertilizante llega al área de aplicación, es transferido a unidades fertilizadoras las cuales cuentan con tanques de almacenamiento entre 1500 – 2500 litros operadas con tractores que fertilizan dos surcos por recorrido (Figura 1). La mezcla de vinaza y urea es incorporada al terreno por medio de la ruptura de 15 cm de suelo y el riego controlado por boquillas, las cuales han sido calibradas según la cantidad de fertilizante requerido (Páez *et al.*, 2012).



Figura 1. Unidad fertilizadora empleada en campo para la incorporación de vinaza.

La aplicación continua de vinaza incide en altos contenidos de potasio en el suelo (7 cmol/kg), estrechando la relación Ca/K lo cual induce deficiencias de calcio en la planta (Cenicaña, 1995). Adicionalmente, Tejada (2010) reporta que la aplicación de vinaza incidió en el aumento del pH de un suelo del orden vertisol, debido a la oxidación de los componentes orgánicos de la vinaza. Moran *et al.* (2016) encontraron que el riego con

vinaza genera cambios químicos, físicos y bioquímicos del suelo, siendo la compactación, la disminución de la permeabilidad, la deposición de material orgánico sobre la capa superior del suelo y el endurecimiento de este, algunos de los primeros cambios observados. De forma similar Páez *et al.* (2016) mencionan que la aplicación de vinaza genera cambios leves en la calidad del agua subterránea, principalmente en el aumento de sales disueltas y el enriquecimiento de iones como Na^+ y K^+ .

La Figura 2 representa un esquema de los posibles cambios o procesos que podrían alterarse por el riego con vinaza. Entre estas modificaciones se encuentra: i) el aumento en el contenido de NO_3^- , compuesto que podría lixiviar a las aguas subterráneas, ii) la acumulación de sales y cationes en el suelo, incidiendo en el aumento de la salinidad y la sodicidad del mismo, iii) excesos de materia orgánica, los cuales reducen la porosidad del suelo promoviendo condiciones anaeróbicas y fitotoxicidad en el cultivo.

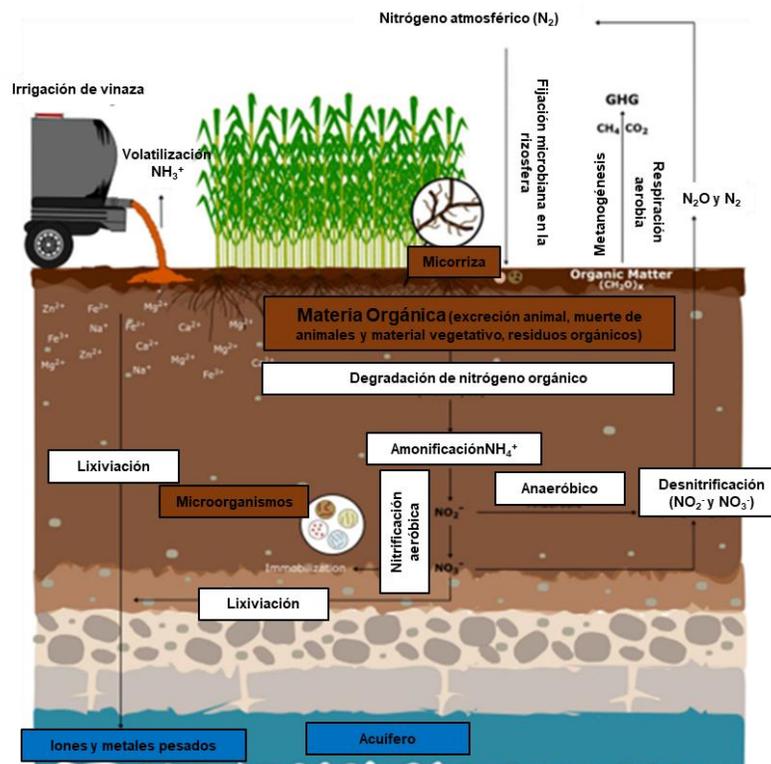


Figura 2. Representación esquemática de los procesos y condiciones en el suelo que pueden verse afectadas por el riego con vinaza. Tomado y modificado de Moran *et al.* (2016).

En cuanto a las políticas de uso responsable de las vinazas, la CVC autoridad ambiental en el Valle del Cauca regula las prácticas de manejo para la aplicación de vinaza de manera coordinada con los ingenios azucareros (Páez *et al.*, 2012; Páez y Candela, 2015). En este sentido, a través de la Resolución 0100-No 630 0081 de 2012, la CVC reglamentó para el Valle del Cauca, el uso, manejo, aplicación y almacenamiento de las vinazas y los productos que de ella se deriven. Adicionalmente, el Acuerdo C.D. CVC No. 042 de 2010, adopta la reglamentación para la gestión de las aguas subterráneas en el área de jurisdicción de la CVC en el Departamento.

En la Tabla 2 se muestran los principales parámetros ambientales de los fertilizantes líquidos preparados a partir de vinazas denominados Vinurea, Mayavin y Provin, elaborados por los ingenios Manuelita, Mayagüez y Providencia, respectivamente.

Tabla 2. Principales parámetros de fertilizantes preparados a partir de vinazas.

Parámetros	Unidades	Manuelita Vinurea	Mayagüez Mayavin	Providencia Provin
Grados Brix	%	55	18	17.3
pH	---	5.0	4.4	4.1
Carbono orgánico total	mg COT/L	---	72050	68525
Sólidos totales	mg ST/L	633600	367649.5	173475
Demanda química de oxígeno	mg O ₂ /L	517765	170757	134306.5
Alcalinidad total	mg CaCO ₃ /L	13400	1700	900
Conductividad Específica	µS/cm	23516.7	45299.5	33125
Sulfatos	mg SO ₄ /L	19577.5	10279	---
Fosfatos	Mg PO ₄ /L	246	8.7	---
Nitrógeno amoniacal	mg N-NH ₃ /L	1111.5	504.2	221.5
Nitratos	mg N-NO ₃ /L	5818.5	---	1422
Cloruros	mg Cl/L	13065	1391.5	5643
Fenoles	mg Fenol/L	---	3.23	2.5

Fuente: Páez *et al.*, 2012.

En la Tabla 3 se presenta el resumen de diferentes estudios sobre la aplicación de vinazas en suelos agrícolas, principalmente de Colombia. La Tabla 4 incluye los impactos de la aplicación de vinaza y su relación con la lixiviación en suelos.

Tabla 3. Investigaciones realizadas en vinazas en Colombia

Tipo de suelo	Objetivo de investigación	Principales resultados	Fuente
Arcilloso	Evaluar el rendimiento de producción de caña cuando se aplica vinaza	La producción y el rendimiento de la caña de azúcar no presenta diferencias significativas, sin embargo, se reportan mejoras en el rendimiento de la caña entre el 4-11%.	Domínguez y Besosa, 1992
Molisoles y Vertisoles	Determinación de dosis de vinaza para la caña de azúcar y la eficiencia de esta.	En suelos con contenidos de 0.2 cmol K intercambiable/kg se puede usar dosis hasta 200 kg K ₂ O/ha y para suelos con contenido de 0.4 cmol K intercambiable /kg se pueden aplicar dosis entre 100-150 kg K ₂ O/ha	Cenicafía, 2007
Valle del Cauca	Revisión de investigaciones relacionadas con el tema de las vinazas en el Valle del Cauca	La cantidad requerida de K ₂ O por el cultivo de la caña de azúcar se estima en aproximadamente 10,955 toneladas/año y el aporte de K ₂ O por parte de las vinazas de 10; 32.5; 35 y 55% de sólidos totales es de alrededor de 10,679 toneladas por año. Las aplicaciones sucesivas de vinaza del 10% de sólidos totales, realizadas por más de veinte años en cantidades exageradamente altas, aumentaron ligeramente el pH, los contenidos de Mg y Na intercambiables y la conductividad eléctrica y acrecentaron notoriamente los contenidos de P disponible y de K intercambiable en los primeros 40 cm de profundidad del suelo.	Quintero, 2007
Arcilloso muy fino	Evaluación de los efectos de la aplicación de vinaza + urea + cloruro de K en la producción de caña de azúcar y en las propiedades químicas de los suelos	No se observaron diferencias significativas en la producción/ha de caña y azúcar debidas a las fuentes y dosis de nutrimentos utilizados. En los suelos solo hubo un ligero aumento en la materia orgánica. Se encontró que el uso adecuado de las vinazas concentradas reemplaza la aplicación de KCl en caña de azúcar.	Gómez, 2007
Distintos suelos característicos del Valle del Cauca	Evaluación de los efectos de la aplicación de fertilizantes elaborados a partir de vinaza en la zona no saturada y aguas subterráneas del Valle del Cauca	Como resultado principal se obtuvo que, en la zona no saturada, algunas parcelas, presentaron baja retención de agua y en consecuencia una alta capacidad de transporte de los constituyentes de la vinaza. Se estableció que en algunas parcelas se aplican láminas de riego altas, lo que puede causar contaminación de las aguas subterráneas. Esto se debe a que se incrementa la humedad del perfil del suelo y por lo tanto la recarga, arrastrando posibles sustancias contaminantes.	Páez <i>et al.</i> , 2012
Distintos suelos característicos del Valle del Cauca	Caracterizar la vulnerabilidad del acuífero con la aplicación de vinazas y establecer los patrones de flujo y monitoreo de la calidad del agua	Se verificó que los sedimentos de la parcela Hacienda Real y Zainera presentan una baja capacidad de retención de agua en la zona no saturada y son vulnerables a los cambios en las características naturales de las aguas subterráneas. En la mayoría de las parcelas no se presentaron alteraciones importantes de la calidad del agua subterránea; solo en las Hacienda Real se encontraron concentraciones de nitratos entre 0.1-12.1 mg NO ₃ /L.	Páez y Candela, 2015
Arenoso, arcilloso- arenoso y arcilloso	Evaluar la mineralización de N después de aplicar dosis de vinaza (0.75 y 150 m ³ /ha) en suelos con distintas texturas	Se encontró una correlación positiva entre el N absorbido y la materia seca de las plantas de caña de azúcar, mientras que se observaron correlaciones negativas entre el N absorbido y el N mineralizado a los 42 días, y entre el N absorbido y el N potencialmente mineralizable.	Da Silva <i>et al.</i> 2020
Arcilloso y arenoso	Evaluar si la aplicación de vinaza a largo plazo cambia los atributos químicos y físicos de los suelos arcillosos y arenosos cultivados con caña de azúcar.	La aplicación de vinaza aumentó el contenido de macronutrientes, en promedio, en un 23% en el suelo arcilloso y en un 80% en el suelo arenoso. Además, la aplicación de vinaza a largo plazo aumentó la microporosidad del suelo arenoso en un 22%, lo que permitió una mayor disponibilidad de agua para la caña de azúcar.	Cardoso <i>et al.</i> 2021

Tabla 4. Investigaciones relacionadas con el análisis de lixiviados de suelos a los que se les ha aplicado vinaza

Título	Objetivo	Resultados	Fuente
Biochar decreases dissolved organic carbon but not nitrate leaching in relation to vinasse application in a Brazilian sugarcane soil	Evaluar el potencial del biocarbón (carbón vegetal producido a partir de la torta de filtración pirolizada) para mitigar la lixiviación de carbono y nutrientes en un suelo ferralsol brasileño cultivado después de la aplicación de vinaza.	El tratamiento con vinaza afecta fuertemente los flujos de carbono y NO ₃ en este suelo tropical. El biocarbón atenuó la lixiviación de carbono orgánico disuelto, probablemente mediante la estabilización de compuestos complejos ya presentes en el suelo, pero no disminuyó los flujos de NO ₃ .	Eykelbosh et al. 2015
Lead sorption and leaching from an Inceptisol sample amended with sugarcane vinasse	Evaluar la sorción y lixiviación de Pb a partir de muestras de suelo alteradas (0-20 cm) de un Inceptisol, bajo la influencia de vinaza de caña de azúcar.	La vinaza aumentó la capacidad máxima de sorción y la energía de unión del Pb con el suelo en condiciones de equilibrio. Sin embargo, en condiciones de no equilibrio, la vinaza mejoró la lixiviación de Pb.	Ribeiro et al. 2010
Toxicity evaluation of leached of sugarcane vinasse: Histopathology and immunostaining of cellular stress protein	Evaluar el potencial tóxico de la vinaza de caña de azúcar lixiviada utilizando tilapia del Nilo (<i>Oreochromis niloticus</i>) como organismo de prueba.	La vinaza lixiviada como la vinaza in natura eran tóxicas, estas pueden provocar cambios histológicos e inducir la respuesta citoprotectora en el hígado de pescado expuesto, evidenciada por una inmunotinción de las proteínas de estrés celular.	Coelho et al. 2018
Effects of vinasse irrigation on effluent ionic concentration in Brazilian Oxisols	Evaluar los impactos del riego con vinaza sobre las concentraciones iónicas de efluentes en ferralsoles brasileños de dos áreas en el centro de Brasil.	La dosis de vinaza, días después del riego y el uso de la tierra, tuvieron un efecto relevante en la concentración del efluente de la mayoría de los nutrientes. Las dosis altas de vinaza pueden aumentar la lixiviación de nutrientes y la dispersión del suelo independientemente del uso de la tierra y el tiempo después del riego.	Da Silva et al. 2013
Distribution of solutes NO ₃ ⁻ e Ca in soil columns with vinasse	Determinar los factores de retardo, coeficientes difusivo-dispersivos involucrados en el transporte y distribución de las curvas de efluentes de vinaza para los iones Calcio y Nitrato en columnas de suelo.	Los parámetros de transporte mostraron los efectos positivos de la adsorción y el ion calcio presente en la vinaza. Para el ion nitrato, a pesar de que la curva de avance no se ha ajustado, los parámetros indican que la baja adsorción al suelo puede causar que se mueva a mayores profundidades.	Da Silva et al. 2016
Sugarcane Vinasse Cations Dynamics in Cerrado Soils, Brazil	Dilucidar el comportamiento de los iones de potasio, sodio, calcio y magnesio presentes en la vinaza a lo largo del perfil superficial de un Latosol arcilloso y un Latosol arenoso de la región del Cerrado.	Se requiere un mayor volumen de efluente para la fertirrigación con vinaza en un latosol rojo distro férrico para proporcionar los nutrientes Mg ²⁺ , K ⁺ , y Ca ²⁺ en el perfil del suelo.	Filho et al. 2019
Aminocyclopyrachlor sorption-desorption and leaching in soil amended with organic materials from sugarcane cultivation	Evaluar el proceso de sorción -desorción del aminociclopiracloro en suelos con la adición de tres materiales orgánicos envejecidos a partir de la caña de azúcar y su transporte a través de la lixiviación.	Con la adición de vinaza, el 71% del herbicida alcanzó el lixiviado, mientras que el <50% alcanzó el lixiviado con los otros tratamientos. La disponibilidad de aminociclopiracloro no se redujo con la adición de material orgánico al suelo, lo que puede ser favorable para el control de malezas. Sin embargo, la presencia de vinaza conduce al riesgo de lixiviación a capas de suelo más profundas.	Takeshita et al. 2020
Identification of organic contaminants in vinasse and in soil and groundwater from fertigated sugarcane crop areas using target and suspect screening strategies	Estudiar la sostenibilidad de la reutilización de la vinaza como fertilizante en cultivos de caña de azúcar mediante la evaluación de si su reutilización es un vector importante de contaminación del suelo y las aguas subterráneas por antibióticos y otros contaminantes orgánicos en áreas fertirrigadas representativas de Brasil.	Los resultados no mostraron superposición entre los compuestos detectados en la vinaza y las muestras ambientales, lo que sugiere que los contaminantes encontrados en el suelo y las aguas subterráneas podrían provenir de fuentes alternativas distintas de la reutilización de la vinaza.	Da Silva et al. 2021
Cation concentrations and dynamics in the surface profile of two oxisols after the application of vinasse	Evaluar la dinámica y los niveles de cationes a lo largo del perfil de dos Oxisoles tras la aplicación de vinaza en columnas de elución.	Hubo un gran aumento de la concentración de K a lo largo del perfil superficial de ambos suelos (arcilloso y arenoso) después de la aplicación de vinaza. El aumento de las concentraciones de K promovió el transporte, principalmente de Ca y Mg, a capas más profundas en ambos suelos. En general, los iones metálicos tenían una mayor movilidad en suelos más arenosos, lo que resultaba en un mayor contenido de lixiviación.	Cabral et al. 2021

2.4. MARCO NORMATIVO

En Colombia, la política de gestión sostenible del recurso suelo y la política para la gestión integral del recurso hídrico, se constituyen en la hoja de ruta para la protección y preservación de estos recursos de igual forma, el Decreto 1076 de 2015 incluye límites máximos permisibles para garantizar el uso y aprovechamiento del recurso hídrico. En el Valle del Cauca, La CVC como Autoridad Ambiental del departamento regula el uso, manejo y aplicación de vinaza en el suelo por medio de la Resolución 0100-No 630 0081 de 2012. Adicionalmente, el Acuerdo C.D. CVC No. 042 de 2010, adopta la reglamentación para la gestión de las aguas subterráneas en el área de jurisdicción de la CVC en el Departamento.



Con base en estas normas generales, la CVC en el Valle del Cauca ha otorgado licencias ambientales, relacionadas con el manejo de vinazas producidas por los ingenios azucareros. Las licencias otorgadas por la CVC en el marco de esta actividad agrícola son: i) Ingenio Providencia (Resolución 150-998 de 2017), ii) Ingenio Incauca (Resolución 710-711 de 2016), iii) Ingenio Manuelita (Resolución 150-170 de 2017), iv) Ingenio Mayagüez (Resolución 150-495 de 2016), v) Ingenio Rio Paila (Resolución 150-277 de 2015), e vi) Ingenio Risaralda (Concepto 0620-11860-1-2014). Por otro lado, la caracterización de aguas subterráneas entregada de forma periódica por el sector azucarero se revisa a la luz de los criterios de calidad establecidos por el Decreto 1575 de 2007, por el cual se establece el Sistema para la Protección y Control de la Calidad del Agua para Consumo Humano.

la zona plana del valle geográfico del río Cauca y el 57.9% (60,384.14 ha) en la zona de ladera (POMCH Amaime, 2013).

En cuanto a su climatología, se evidencia la convergencia de los flujos del este o vientos alisios del nororiente y suroriente con la corriente ecuatorial del pacífico. Esta condición es directamente responsable del régimen bimodal de las lluvias, que se presentan con pocas variaciones, tanto en la zona central de la Cordillera Occidental, como en el resto del país. La precipitación media anual para la cuenca es de 1311 mm. Por su parte, la temperatura está determinada por los pisos térmicos y sus promedios anuales varían entre los 23°C en la parte baja, 18°C en la parte media, 12°C en la parte alta y 4°C en el páramo (POMCH Amaime, 2013).

Así mismo, existen tres tipos de uso actual del suelo predominantes en la cuenca del río Amaime, los cuales se presentan aproximadamente en un 92% del área total de la cuenca distribuidos así: i) cultivo de caña de azúcar y otros cultivos (38,113 ha – 36.55%), que se encuentra principalmente en la zona plana de la cuenca acompañado de pequeños intersticios de algunos cultivos transitorios de sorgo, maíz, soya y frijol, ii) el bosque natural y vegetación de páramo (32,872.11 ha – 31.52%), los cuales se presenta de forma continua o fragmentada, y iii) los pastos naturales (24,571.68 ha – 23.56%), los cuales se localizan principalmente en la zona de ladera que cubre el piedemonte, parte media de la cuenca y la parte alta, sobre las vertientes del río Coronado, Amaime y parte media de la subcuenca del río Nima (POMCH Amaime, 2013).

La Cuenca Río Cerrito, se localiza al oriente del Departamento del Valle del Cauca, en la vertiente occidental de la cordillera central en la región suroccidental de Colombia. Está ubicada en los municipios de El Cerrito (12,592.13 ha igual al 99.6%), concentrando la totalidad de la zona urbana, principal centro poblado existente en la cuenca y Ginebra (50.58 has – 0.4%). En cuanto a su información climatológica, la cuenca del río Cerrito, presenta influencia de los vientos de sotavento de la cordillera, caracterizados por ser vientos secos, respondiendo a una distribución de tipo bimodal de lluvias, característica propia del valle geográfico del río Cauca. La precipitación media anual en la cuenca es de 1151 mm.

Por otro lado, el área total de la cuenca hidrográfica del río Cerrito es de aproximadamente 12,642.7 ha, de las cuales: i) 76 ha (0.6% del área total de la cuenca) se encuentran ocupadas por bosques de guadua y se ubican en zonas clasificadas como áreas forestales protectoras-productoras, ii) 1243.82 ha (9.83% del área total de la cuenca) están ocupadas por bosque natural y se ubican en zonas clasificadas como áreas forestales protectoras, teniendo en cuenta que en esta cuenca no existen plantaciones forestales, iii) 363 ha (2.87% del área total de la cuenca) tienen presencia de rastrojo, distribuido en áreas consideradas de uso múltiple y en todas las áreas de aptitud forestal, iv) 2733 ha (21.61% del área de la cuenca) están dedicadas a la ganadería, por tanto presentan cobertura de pastos y están distribuidas en las diferentes áreas de aptitud o vocación de la cuenca, v) 7801 ha (61.70% del área total de la cuenca) están cubiertas por diversos cultivos, presentes de forma particular en áreas de uso múltiple, en áreas forestales protectoras y en áreas protectoras-productoras, vi) 4 ha (0.031% del área total de la cuenca) presentan otras coberturas relacionadas con eriales (terrenos improductivos como arenales) y/o cultivos ilícitos (POMCH Cerrito, 2013).

La Cuenca hidrográfica del Río La Paila se localiza al nororiente del Departamento del Valle del Cauca, en las estribaciones medias de la vertiente occidental de la Cordillera Central (2150 msnm) y el valle geográfico del río Cauca, del cual es afluente el río La Paila. Debido a que esta cuenca no presenta variación altitudinal representativa, es fácil obtener las unidades climáticas a partir del modelo digital de elevación del terreno, clasificando los intervalos entre curvas de nivel (ámbitos de elevación): i) < 1000 Msnm, unidad climática cálida, ii) 1000 – 2000 Msnm, unidad climática media, iii) 2000 – 3000 Msnm, unidad climática fría, iv) 3000 – 3200 Msnm, unidad climática muy fría, y v) > 3200 Msnm, unidad climática páramo (POMCH La Paila, 2009).

Las 44,103 ha que conforman la cuenca hidrográfica del río La Paila, no tienen uso del suelo actualizado al año 2006. Básicamente se reporta un aumento significativo en el uso de suelos para pastos, con un incremento del 18% desde 1998 a la fecha, mientras que el uso para el cultivo de café ha descendido en un 15% durante el mismo periodo. La pérdida de bosque obedece aproximadamente al 3%, resultado de la ampliación de la frontera agrícola dentro del cual se destaca la siembra de caña panelera.

La mayor ocupación de suelo es representada por pasto natural con 31,301.1 ha equivalentes al 70.97%, seguido de 5045.6 hectáreas cultivadas en caña de azúcar equivalentes a 11.44%. Por su parte, los cultivos permanentes, entre los cuales se cuentan café, plátano y frutales tienen un área de ocupación de 4693.5 ha equivalentes al 10.64% del área total. El bosque de guadua se encuentra presente en una superficie de 1183.6 ha equivalentes al 2.68%. El bosque natural alcanza el 1.82 % de ocupación con 805 ha, mientras que el bosque plantado no supera las 179 ha. Por otro lado, los cultivos transitorios como maíz, frijol, soya, sorgo, tomate reportan un área de 98.5 ha, alcanzando el 0.22% de la ocupación total. El área restante se distribuye en infraestructuras como reservorios, zona industrial y otros. Se reporta un área correspondiente a humedales de 5.85 ha y una cantera de 14.8 ha (POMCH La Paila, 2009).

La Cuenca del Río La Vieja nace y se desarrolla en la vertiente occidental de la cordillera central de Colombia y sus tributarios en la parte alta son los ríos Barragán y Quindío. Por su configuración hidrográfica, la Cuenca del Río La Vieja presenta climas desde muy fríos, del páramo alto o súper páramo, hasta cálido, y desde semihúmedos hasta muy húmedos. Los climas más fríos se encuentran en las partes altas de la cordillera central, próximas a la divisoria de aguas, y los climas cálidos se encuentran en la zona más baja del río La Vieja, próxima a su desembocadura en el río Cauca (Cartago). No obstante, la mayor parte de la cuenca presenta un clima templado semi húmedo y templado húmedo, según la clasificación de Caldas Lang, en la zona de relieve ondulado del abanico de Armenia – Pereira, donde se encuentra la mayor parte de población de la cuenca (POMCA La Vieja, 2018).

A nivel de toda la cuenca, el uso individual más importante es el de protección (32.01%), seguido del pastoreo intensivo (22.71%) y los cultivos permanentes semi-intensivos (17.96%). No obstante, tomando grupos de usos, el más extendido sigue siendo el de protección (incluidos los cuerpos de agua naturales) con el 32.72%, seguido por el pecuario con el 31.09%, el agrícola con el 24.11%, los usos combinados (mosaicos) con el 6.43% y los de producción forestal con el 1.65%. En total, los usos destinados a producción agropecuaria y forestal suman el 63.29% de la cuenca, frente al 32.72% en uso de

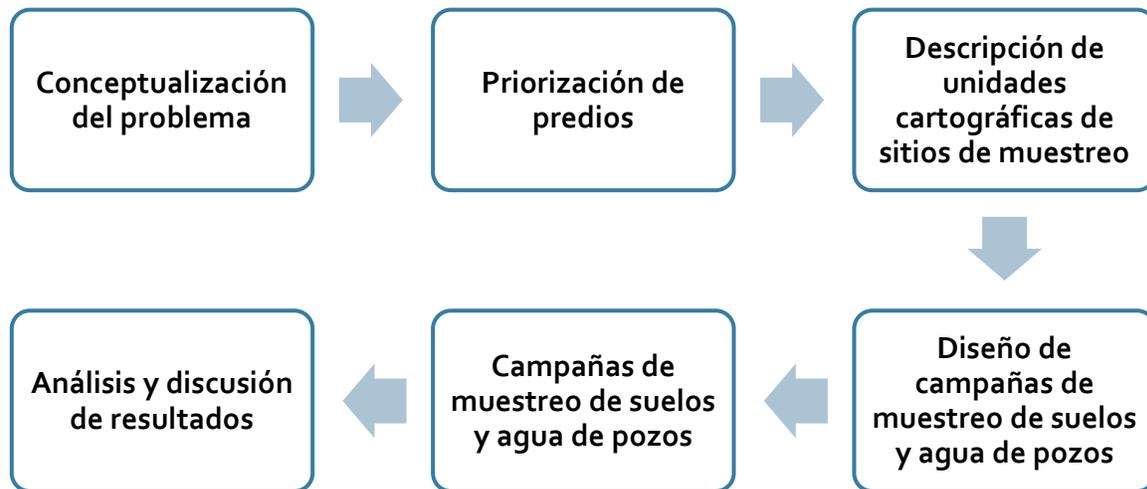
protección. Los demás usos abarcan el 3.99% de la cuenca, de los cuales el más importante es el residencial (urbano y suburbano), con el 1.89% (POMCA La Vieja, 2018).

La Cuenca hidrográfica del Río Timba está ubicada al sur del departamento del Valle del Cauca y al norte del departamento del Cauca, en territorio de los municipios de Jamundí Departamento del Valle del Cauca, y Buenos Aires y Suárez en el Departamento del Cauca, en el costado oriental de la cordillera Occidental en la región sur occidental de Colombia. En esta cuenca hay presencia predominante de mosaico de cultivos, pastos y espacios naturales (26.9%), bosque denso (14%), mosaico de pastos con espacios naturales (12.9%) seguidos de pastos limpios (9%) y vegetación secundaria o en transición (8.9%), situación que es coherente con la economía de la zona.

La Cuenca hidrográfica Río Bolo - Fraile (Guachal), se encuentra localizada en el suroccidente de Colombia en el sur del Departamento del Valle del Cauca, en el flanco occidental de la cordillera Central. El 56.9% del área corresponde a la zona de ladera y el 43.1% al valle geográfico del río Cauca o zona plana (CVC, 2008). La zona plana tiene un uso agrícola intensivo con alto grado de mecanización basado en la explotación de caña de azúcar (45.3%) y algunos cultivos transitorios (2%) como sorgo, maíz, soya, yuca, habichuela y hortalizas, como también algunas parcelas de cultivos permanentes de frutales y cacao. En la zona media el cultivo de café ocupa una mínima proporción (1.3%), y por lo general ha sido reemplazado por la ganadería extensiva que ocupa un 19.3%. El 21.3% del área de la cuenca corresponde a coberturas de bosques naturales en diferentes estados de sucesión que incluyen los bosques de guadua y rastrojos, los cuales son explotados principalmente para la extracción de leña, estacones y varas (CVC, 2008).

4. METODOLOGÍA

El enfoque metodológico del monitoreo y seguimiento de las propiedades fisicoquímicas de suelos y calidad de agua de pozos se presentan en el siguiente esquema.



4.1 CONCEPTUALIZACIÓN

La vinaza es un subproducto de la producción de azúcar y etanol, y debido a los altos contenidos de potasio, azufre, materia orgánica y elementos menores presentes en la vinaza, es utilizada como fertilizante (fertiirrigación) en suelos cultivados con caña de azúcar. También se emplea para enriquecer el proceso de compostaje al mezclarse con otros componentes como la cachaza. Sin embargo, existen dos inconvenientes asociados a esta práctica, teniendo en cuenta aspectos ambientales y energéticos; en primera instancia, se debe comprender que la incorporación continua de vinaza en el suelo, tiende a generar una amplia variedad de impactos negativos sobre el recurso hídrico y los cultivos asociados; adicionalmente, el alto contenido de compuestos orgánicos biodegradables presentes en la vinaza, permiten caracterizar este residuo como un subproducto residual de la cadena productiva del etanol, altamente energético. Teniendo en cuenta esto, la fertiirrigación en suelos promueve la pérdida de bioenergía al ser empleado de forma ineficiente (Fuess *et al.*, 2017), es por eso que se hace necesario realizar un seguimiento de las características del suelo y el agua subterránea con el fin de poder sondear el estado en el cual se encuentran estos recursos, comparando los resultados obtenidos con los estándares normativos de calidad del suelo y agua.

En este sentido, los ingenios azucareros productores de vinaza, cuentan con licencias ambientales para aplicar estos subproductos en el suelo, sujeto a verificación y seguimiento por parte de la autoridad ambiental, estas licencias establecen las propiedades y cantidades de derivados de la vinaza que se pueden aplicar en suelos agrícolas cultivados con caña de azúcar; las dosis autorizadas por la CVC son: i) Ingenio Providencia (Resolución 150-

998 de 2017) con permiso para incorporar vinaza (PROVIN) al suelo en una concentración y dosis entre 25 – 40% y 10 – 14 m³/ha, respectivamente, ii) Ingenio Incauca (Resolución 710-711 de 2016), incorporación de vinaza (INCAVIN-N) al suelo una dosis entre 5.69 – 8 m³/ha, iii) Ingenio Manuelita (Resolución 150-170 de 2017), incorpora vinaza (VINUREA) al suelo en una concentración y dosis entre 10 – 43% y 1.5 – 2.5 m³/ha, respectivamente, iv) Ingenio Mayagüez (Resolución 150-495 de 2016), incorpora vinaza (MAYAVIN) al suelo en una concentración y dosis entre 30 – 60% y 3.2 – 8.6 m³/ha, respectivamente, v) Ingenio Rio Paila (Resolución 150-277 de 2015), se le permite incorporar vinaza (FERTIRIO) al suelo en una concentración del 48% y dosis entre 7.3 – 7.7 m³/ha, y vi) Ingenio Risaralda (Concepto 0620-11860-1-2014) puede incorporar vinaza (FERTIVINK) al suelo, con un dosis propuesta de 0.9 – 270 kg de K₂O/ha (aproximadamente 4 m³/ha, según información entregada por el ingenio). . Se destaca que la dosis de derivados de vinaza aplicada por cada uno de los ingenios es función del contenido de potasio en el suelo.

4.2 PRIORIZACIÓN DE SITIOS DE MUESTREO

Con el fin de evaluar el estado actual de la calidad de suelos y aguas subterráneas en suelos cultivados con caña de azúcar y su relación con la aplicación de derivados de la vinaza en cultivos de caña, con el apoyo del Grupo de Recursos Hídricos, en predios de los 6 ingenios azucareros duales, se priorizaron 42 puntos de monitoreo (Tabla 5) ubicados a lo largo del Valle Geográfico del Río Cauca (Figura 4). Se seleccionaron predios cultivados con caña de azúcar con pozos de monitoreo con vulnerabilidades medias a bajas; esta información fue suministrada por la CVC a partir de la cartografía digital y la red de monitoreo de pozos. Esta estrategia permitió a la Corporación tener una mayor cobertura en el número de sitios de monitoreo (suelos y aguas).

Tabla 5. Sitios priorizados para monitoreo de la calidad del suelo y agua subterránea.

No.	Ciudad	Ingenio	Predio	Pozo	Ubicación	
					Longitud	Latitud
1	Bugalagrande	Rio Paila	Cecilia	vbg-pm-05	-76.20362895	4.25031588
2	Bugalagrande	Rio Paila	Margarita Floresta	vbg-pm-06	-76.199373	4.21483076
3	Bugalagrande	Rio Paila	Gertrudis	vbg-pm-07	-76.13308693	4.25017274
4	Bugalagrande	Rio Paila	Golfo	vbg-pm-09	-76.16028515	4.28835072
5	Bugalagrande	Rio Paila	Golfo	vbg-pm-10	-76.16222222	4.289444444
6	Bugalagrande	Rio Paila	Samaria	vbg-pm-08	-76.16301708	4.25847646
7	Candelaria	Incauca	Las Palmas	vcn-pm-63	-76.42175061	3.43350411
8	Candelaria	Incauca	Florencia	vcn-pm-65	-76.42078798	3.3410446
9	Candelaria	Incauca	Aranjuez	vcn-pm-64	-76.37397146	3.30112466
10	Jamundí	Incauca	Egipto	vj-pm-09	-76.52431518	3.16086627
11	Jamundí	Incauca	Egipto	vj-pm-11	-76.52640977	3.1610695
12	Candelaria	Mayagüez	Cofre	vcn-pm-18	-76.3380556	3.36361111
13	Candelaria	Mayagüez	Barbarita	vcn-pm-16	-76.3558333	3.42555556
14	Candelaria	Mayagüez	Unión	vcn-pm-15	-76.33222523	3.40897526

No.	Ciudad	Ingenio	Predio	Pozo	Ubicación	
					Longitud	Latitud
15	Candelaria	Mayagüez	Zainera	vcn-pm-27	-76.3167443	3.41433766
16	Candelaria	Mayagüez	Zainera	vcn-pm-29	-76.31445688	3.41656925
17	Candelaria	Mayagüez	Casa de Teja	vcn-pm-17	-76.3238889	3.33361111
18	Candelaria	Mayagüez	Arenal	vcn-pm-19	-76.3641667	3.38472222
19	Candelaria	Mayagüez	Esmeralda	vcn-pm-30	-76.33971115	3.34304642
20	Candelaria	Mayagüez	Esmeralda	vcn-pm-33	-76.33665182	3.34322482
21	Cartago	Risaralda	Cabuyas	vcr-pm-31	-75.97100861	4.73079551
22	Cartago	Risaralda	Cabuyas	vcr-pm-30	-75.96654079	4.7289546
23	Cerrito	Providencia	Alizal	vce-pm-23	-76.32872676	3.6202839
24	Cerrito	Providencia	Alizal	vce-pm-22	-76.32779075	3.62026499
25	Cerrito	Providencia	Aurora	vce-pm-11	-76.31202767	3.66708922
26	Cerrito	Providencia	Ceiba	vce-pm-10	-76.34705834	3.66812993
27	Cerrito	Providencia	Marsella	vce-pm-09	-76.40495083	3.68099803
28	Cerrito	Providencia	Unión Molina	vce-pm-08	-76.36722637	3.66010733
29	Cerrito	Providencia	Santa Lucía	vce-pm-19	-76.30035791	3.64039625
30	Cerrito	Providencia	Santa Lucía	vce-pm-30	-76.29951785	3.6406446
31	Cerrito	Providencia	Santa Lucía	vce-pm-28	-76.30138889	3.638888889
32	Palmira	Manuelita	Florencia	vp-pm-14	-76.33416667	3.582222222
33	Palmira	Manuelita	Soledad	vp-pm-35	-76.37359247	3.61021244
34	Palmira	Manuelita	Olga	vp-pm-76	-76.36870835	3.61377917
35	Palmira	Manuelita	Olga	vp-pm-46	-76.36883463	3.61715327
36	Palmira	Manuelita	Josepilla	vp-pm-33	-76.40321611	3.57084627
37	Palmira	Manuelita	Malimbu	vp-pm-32	-76.34363204	3.54469151
38	Palmira	Manuelita	Rosario	vp-pm-28	-76.29999893	3.58921524
39	Palmira	Manuelita	Rosario	vp-pm-27	-76.29883	3.60311
40	Palmira	Manuelita	Real	vp-pm-39	-76.33033273	3.59492084
41	Palmira	Manuelita	Santa Anita	vp-pm-13	-76.3259	3.58698
42	Palmira	Manuelita	Real	vp-pm-31	-76.33174487	3.5959258

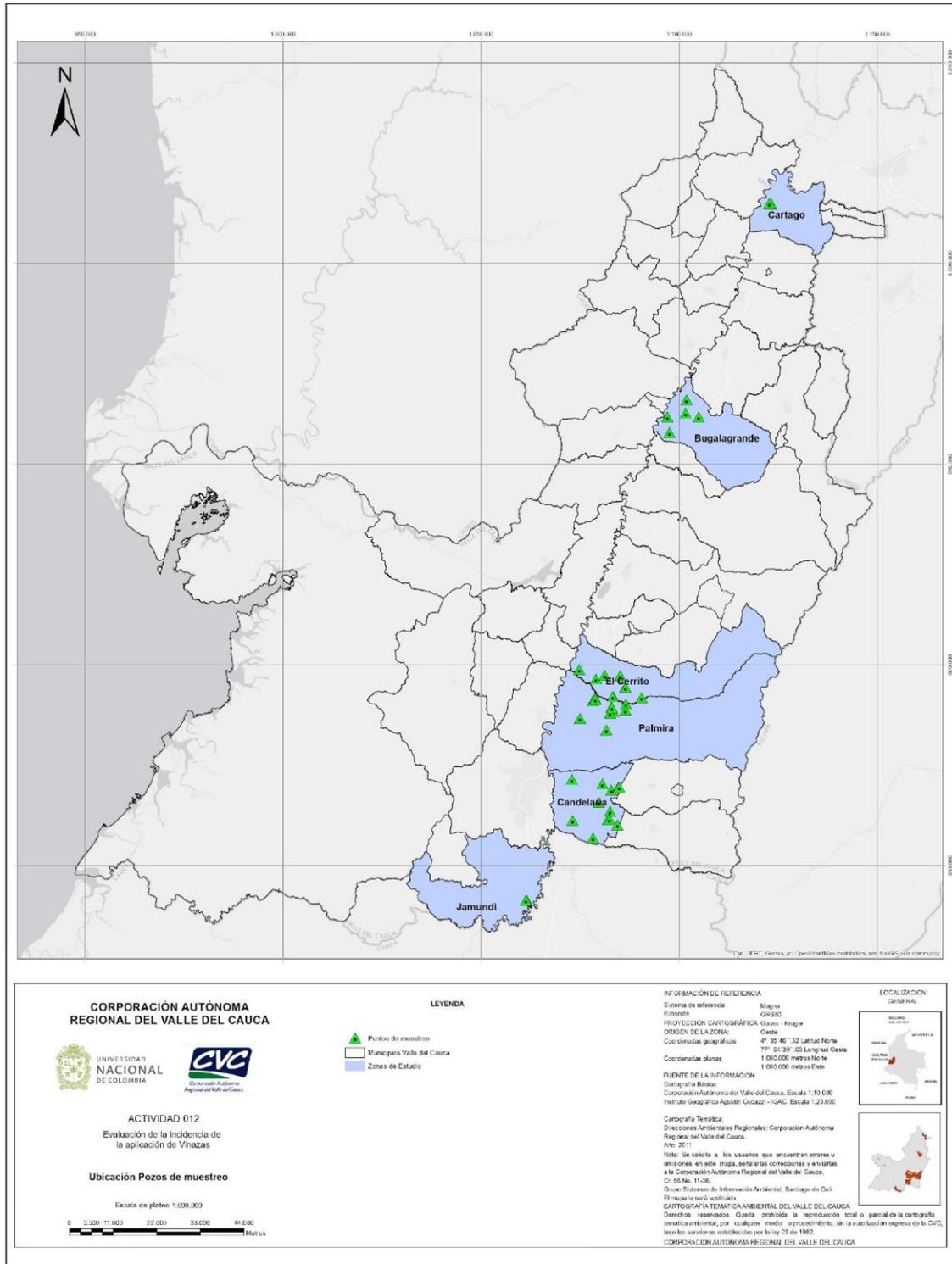


Figura 4. Localización de sitios priorizados para el monitoreo de la calidad de suelo y agua subterránea.

4.3. DESCRIPCIÓN DE UNIDADES CARTOGRÁFICAS DE LOS SITIOS MONITOREADOS

De acuerdo con el estudio realizado por el IGAC en el 2004 “*Levantamiento de suelos y zonificación de tierras del departamento del Valle del Cauca*”, a continuación, se presentan las unidades cartográficas y diferentes componentes taxonómicos para cada uno de los sitios de monitoreo.

4.3.1. Ingenio Rio Paila

- **Haciendas asociadas: Cecilia, Margarita Floresta**

Orden de suelo: Vertisol
Sub Orden de suelo: Usterts
Gran Grupo de suelo: Haplusterts
Sub Grupo de suelo: Udic Haplusterts - Chromic Udic Haplusterts
Consociación – Complejo de suelo: Complejo Botero – Medio

Descripción: Este tipo de suelos se ha desarrollado en aluviones finos, son bien drenados, profundos, de reacción neutra a moderadamente alcalina (pH 6.7 – 8.0 y 6.6 – 7.4 para los subgrupos de suelo Udic Haplusterts - Chromic Udic Haplusterts, respectivamente) y de fertilidad alta – muy alta. Se localizan en el cuerpo y base de los abanicos aluviales recientes, en relieves ligeramente planos con pendientes de 1 a 3%. Químicamente son suelos con una mediana CIC, mediana cantidad de bases totales, bajo contenido de carbono orgánico y de alta y baja disponibilidad de fósforo para los subgrupos de suelo Udic Haplusterts - Chromic Udic Haplusterts, respectivamente. La clasificación taxonómica se basa en la presencia de propiedades vérticas (suelos arcillosos, agrietas, con cuñas), y el régimen de humedad ústico (IGAC, 2004).

- **Haciendas asociadas: Gertrudis**

Orden de suelo: Molisol
Sub Orden de suelo: Ustolls
Gran Grupo de suelo: Haplustolls
Sub Grupo de suelo: Fluvaquentic Haplustolls - Fluventic Haplustolls
Consociación – complejo de suelo: Complejo Río La Paila - Río Palo

Descripción: Este tipo de suelos se ha desarrollado en aluviones mixtos, son bien – moderadamente drenados, profundos – moderadamente profundos, de reacción neutra a ligeramente ácida (pH 5.8 – 6.6 y 7.2 – 8.2, para los subgrupos de suelo Fluvaquentic Haplustolls y Fluventic Haplustolls, respectivamente) y de fertilidad alta – muy alta. Se localizan en el cuerpo y base de los abanicos aluviales recientes, en relieves ligeramente planos con pendientes de 1 a 3%. Químicamente: la consociación Río La Paila (Fluventic Haplustolls) son suelos con una mediana CIC, mediana cantidad de bases totales, bajo contenido de carbono orgánico y mediana disponibilidad de fósforo, mientras la consociación Río Palo (Fluvaquentic Haplustolls) son suelos con una mediana CIC, baja cantidad de bases totales, bajo contenido de carbono orgánico y baja disponibilidad de fósforo. La clasificación taxonómica se basa en la presencia del epipedón mólico (rico en materia orgánica bien humificada, saturado en cationes bivalentes generalmente Ca), la

saturación de bases mayor o igual al 50%, decrecimiento irregular en el contenido de carbono orgánico y el régimen de humedad ústico (IGAC, 2004).

- **Haciendas asociadas: Golfo**

Orden de suelo: Vertisol
Sub Orden de suelo: Aquerts
Gran Grupo de suelo: Endoaquerts
Sub Grupo de suelo: Typic Endoaquerts
Consociación – Complejo de suelo: Consociación Burriga

Descripción: Este tipo de suelos se ha desarrollado en aluviones muy finos, son pobremente drenados, muy superficiales, de reacción neutra a moderadamente alcalina (pH 6.7 – 8.1) y de fertilidad alta – muy alta. Se localizan en la cubeta de decantación del río Cauca, en relieves ligeramente planos con pendientes de 1 a 3%. Químicamente son suelos con una alta CIC, alta cantidad de bases totales, mediano contenido de carbono orgánico y baja disponibilidad de fósforo. La clasificación taxonómica se basa en la presencia de propiedades vérticas (suelos arcillosos, agrietas, con cuñas) y el régimen de humedad ácuico (IGAC, 2004).

- **Haciendas asociadas: Samaria**

Orden de suelo: Molisol
Sub Orden de suelo: Ustolls
Gran Grupo de suelo: Haplustolls
Sub Grupo de suelo: Fluventic Haplustolls
Consociación – complejo de suelo: Consociación Guadualito

Descripción: Este tipo de suelos se ha desarrollado en aluviones gruesos, son moderadamente drenados, moderadamente profundos, limitados por el nivel freático, de reacción neutra a moderadamente alcalina (pH 7.3 – 7.9) y de fertilidad alta. Se localizan en el cuerpo y base de los abanicos aluviales recientes, en relieves ligeramente planos con pendientes de 1 a 3%. Químicamente son suelos con un alta CIC, alta cantidad de bases totales, bajo contenido de carbono orgánico y de mediana disponibilidad de fósforo. La clasificación taxonómica se basa en la presencia del epipedón mólico (rico en materia orgánica bien humificada, saturado en cationes bivalentes generalmente Ca), la saturación de bases mayor o igual al 50%. Condiciones acuícas dentro de los 100 cm y el régimen de humedad ústico (IGAC, 2004).

4.3.2. Ingenio Incauca

- **Haciendas asociadas: Las Palmas**

Orden de suelo: Molisol
Sub Orden de suelo: Ustolls
Gran Grupo de suelo: Haplustolls
Sub Grupo de suelo: Entic Haplustolls - Cumulic Haplustolls
Consociación – complejo de suelo: Complejo Florida - Manuelita

Descripción: Este tipo de suelos se ha desarrollado en aluviones mixtos, son bien drenados, muy profundos, de reacción neutra a ligeramente ácida (pH 6.3 – 6.9 para el subgrupo de suelo Entic Haplustolls) y ligeramente – moderadamente alcalina (pH 7.5 – 8.4 para el subgrupo Cumulic Haplustolls) y de fertilidad moderada - alta. Se localizan en el cuerpo y base de los abanicos aluviales recientes, en relieves ligeramente planos con pendientes de 1 a 3%. Químicamente: la consociación Florida (Entic Haplustolls) son suelos con una baja CIC, baja cantidad de bases totales, bajo contenido de carbono orgánico y alta disponibilidad de fósforo, mientras la consociación Manuelita (Cumulic Haplustolls) son suelos con una mediana CIC, mediana cantidad de bases totales, mediano contenido de carbono orgánico y de fósforo. La clasificación taxonómica se basa en la presencia del epipedón mólico (rico en materia orgánica bien humificada, saturado en cationes bivalentes generalmente Ca), la saturación de bases mayor o igual al 50%, la ausencia de endopedón cámbico (Entic Haplustolls), el decrecimiento irregular en el contenido de carbono orgánico (Cumulic Haplustolls) y el régimen de humedad ústico (IGAC, 2004).

- **Haciendas asociadas: Florencia (Incauca)**

Orden de suelo: Inceptisol
Sub Orden de suelo: Ustepts
Gran Grupo de suelo: Haplustepts
Sub Grupo de suelo: Udifluentic Haplustepts - Fluventic Haplustolls
Consociación – complejo de suelo: Complejo Bengala – Río La Paila

Descripción: Este tipo de suelos se ha desarrollado en aluviones mixtos, son bien – moderadamente drenados, moderadamente – muy profundos, de reacción ligeramente ácida a moderadamente alcalina (pH 6.1 – 8.1 para el subgrupo Udifluentic Haplustepts) y neutra a moderadamente alcalina (pH 7.2 – 8.2, para el subgrupo de suelo Fluventic Haplustolls) y de fertilidad alta. Se localizan en el cuerpo y base de los abanicos aluviales recientes, en relieves ligeramente planos con pendientes de 1 a 3%. Químicamente: la consociación Río La Paila (Fluventic Haplustolls) son suelos con una mediana CIC, mediana cantidad de bases totales, bajo contenido de carbono orgánico y mediana disponibilidad de fósforo, mientras la consociación Río Palo (Fluvaquentic Haplustolls) son suelos con una mediana CIC, baja cantidad de bases totales, bajo contenido de carbono orgánico y baja disponibilidad de fósforo. La clasificación taxonómica se basa en: i) la presencia de endopedón cámbico, el decrecimiento irregular en el contenido de carbono orgánico y el régimen de humedad ústico para el subgrupo de suelo Udifluentic Haplustepts, ii) la presencia del epipedón mólico (rico en materia orgánica bien humificada, saturado en cationes bivalentes generalmente Ca), la saturación de bases mayor o igual al 50%, decrecimiento irregular en el contenido de carbono orgánico y el régimen de humedad ústico para el subgrupo de suelo Fluventic Haplustolls (IGAC, 2004).

- **Haciendas asociadas: Aranjuez**

Orden de suelo: Molisol
Sub Orden de suelo: Ustolls
Gran Grupo de suelo: Haplustolls
Sub Grupo de suelo: Cumulic Haplustolls
Consociación – complejo de suelo: Consociación Manuelita

Descripción: Este tipo de suelos se ha desarrollado en aluviones mixtos, son bien drenados, muy profundos, de reacción ligeramente – moderadamente alcalina (pH 7.5 – 8.4) y de fertilidad alta. Se localizan en el cuerpo y base de los abanicos aluviales recientes, en relieves ligeramente planos con pendientes de 1 a 3%. Químicamente son suelos con una mediana CIC, mediana cantidad de bases totales, mediano contenido de carbono orgánico y de fósforo. La clasificación taxonómica se basa en la presencia del epipedón mólico (rico en materia orgánica bien humificada, saturado en cationes bivalentes generalmente Ca), la saturación de bases mayor o igual al 50%, el decrecimiento irregular en el contenido de carbono orgánico y el régimen de humedad ústico (IGAC, 2004).

- **Haciendas asociadas: Egipto**

Orden de suelo: Alfisol
Sub Orden de suelo: Ustalfs
Gran Grupo de suelo: Haplustalfs
Sub Grupo de suelo: Aquertic Haplustalfs
Consociación – complejo de suelo: Consociación Tortugas

Descripción: Este tipo de suelos se ha desarrollado en aluviones finos, son imperfectamente drenados, superficiales limitados por el nivel freático, de reacción fuertemente ácida (pH 5.0 – 7.0) y de fertilidad moderada. Se localizan en el cuerpo y base de los abanicos aluviales subrecientes, en relieves ligeramente planos con pendientes de 1 a 3%. Químicamente son suelos con una alta CIC, mediana cantidad de bases totales, mediano contenido de carbono orgánico y baja disponibilidad de fósforo. La clasificación taxonómica se basa en la presencia del endopedón argílico (presencia de arcillas silicatadas), la saturación de bases mayor o igual al 35%, condiciones ácuicas dentro de los 75 cm superficiales y el régimen de humedad ústico (IGAC, 2004).

4.3.3. Ingenio Mayaguez

- **Haciendas asociadas: Arenal**

Orden de suelo: Molisol
Sub Orden de suelo: Ustolls
Gran Grupo de suelo: Haplustolls
Sub Grupo de suelo: Entic Haplustolls - Cumulic Haplustolls
Consociación – complejo de suelo: Complejo Florida – Manuelita

Descripción: Este tipo de suelos se ha desarrollado en aluviones mixtos, son bien drenados, muy profundos, de reacción neutra a ligeramente ácida (pH 6.3 – 6.9 para el subgrupo de suelo Entic Haplustolls) y ligeramente – moderadamente alcalina (pH 7.5 – 8.4 para el subgrupo Cumulic Haplustolls) y de fertilidad moderada - alta. Se localizan en el cuerpo y base de los abanicos aluviales recientes, en relieves ligeramente planos con pendientes de 1 a 3%. Químicamente: la consociación Florida (Entic Haplustolls) son suelos con una baja CIC, baja cantidad de bases totales, bajo contenido de carbono orgánico y alta disponibilidad de fósforo, mientras la consociación Manuelita (Cumulic Haplustolls) son suelos con una mediana CIC, mediana cantidad de bases totales, mediano contenido de carbono orgánico y de fósforo. La clasificación taxonómica se basa en la presencia del

epipedón mólico (rico en materia orgánica bien humificada, saturado en cationes bivalentes generalmente Ca), la saturación de bases mayor o igual al 50%, la ausencia de endopedón cámbico (Entic Haplustolls), el decrecimiento irregular en el contenido de carbono orgánico (Cumulic Haplustolls) y el régimen de humedad ústico (IGAC, 2004).

- **Haciendas asociadas: Unión**

Orden de suelo: Molisol
Sub Orden de suelo: Ustolls
Gran Grupo de suelo: Haplustolls
Sub Grupo de suelo: Cumulic Haplustolls
Consociación – complejo de suelo: Consociación Manuelita

Descripción: Este tipo de suelos se ha desarrollado en aluviones mixtos, son bien drenados, muy profundos, de reacción ligeramente – moderadamente alcalina (pH 7.5 – 8.4) y de fertilidad alta. Se localizan en el cuerpo y base de los abanicos aluviales recientes, en relieves ligeramente planos con pendientes de 1 a 3%. Químicamente son suelos con una mediana CIC, mediana cantidad de bases totales, mediano contenido de carbono orgánico y de fósforo. La clasificación taxonómica se basa en la presencia del epipedón mólico (rico en materia orgánica bien humificada, saturado en cationes bivalentes generalmente Ca), la saturación de bases mayor o igual al 50%, el decrecimiento irregular en el contenido de carbono orgánico y el régimen de humedad ústico (IGAC, 2004).

- **Haciendas asociadas: Cofre**

Orden de suelo: Molisol
Sub Orden de suelo: Ustolls
Gran Grupo de suelo: Haplustolls
Sub Grupo de suelo: Entic Haplustolls
Consociación – complejo de suelo: Consociación Florida

Descripción: Este tipo de suelos se ha desarrollado en aluviones medianos, son bien drenados, muy profundos, de reacción neutra a ligeramente ácida (pH 6.3 – 6.9) y de fertilidad moderada. Se localizan en el cuerpo y base de los abanicos aluviales recientes, en relieves ligeramente planos con pendientes de 1 a 3%. Químicamente son suelos con una baja CIC, baja cantidad de bases totales, bajo contenido de carbono orgánico y alta disponibilidad de fósforo. La clasificación taxonómica se basa en la presencia del epipedón mólico (rico en materia orgánica bien humificada, saturado en cationes bivalentes generalmente Ca), la saturación de bases mayor o igual al 50%, la ausencia de endopedón cámbico y el régimen de humedad ústico (IGAC, 2004).

- **Haciendas asociadas: Zainera**

Orden de suelo: Molisol
Sub Orden de suelo: Ustolls
Gran Grupo de suelo: Haplustolls
Sub Grupo de suelo: Fluventic Haplustolls
Consociación – complejo de suelo: Consociación Rio La Paila

Descripción: Este tipo de suelos se ha desarrollado en aluviones gruesos, son bien drenados, profundos, de reacción neutra a moderadamente alcalina (pH 7.2 – 8.2) y de fertilidad alta. Se localizan en el cuerpo y base de los abanicos aluviales recientes, en relieves ligeramente planos con pendientes de 1 a 3%. Químicamente son suelos con una mediana CIC, mediana cantidad de bases totales, bajo contenido de carbono orgánico y mediana disponibilidad de fósforo. La clasificación taxonómica se basa en la presencia del epipedón mólico (rico en materia orgánica bien humificada, saturado en cationes bivalentes generalmente Ca), la saturación de bases mayor o igual al 50%, decrecimiento irregular en el contenido de carbono orgánico y el régimen de humedad ústico (IGAC, 2004).

- **Haciendas asociadas: Casa de Teja**

Orden de suelo: Vertisol

Sub Orden de suelo: Usterts

Gran Grupo de suelo: Haplusterts

Sub Grupo de suelo: Entic Udic Haplusterts

Consociación – complejo de suelo: Consociación Galponera

Descripción: Este tipo de suelos se ha desarrollado en aluviones medianos, son moderadamente drenados, moderadamente profundos limitados por el nivel freático, de reacción neutra a moderadamente alcalina (pH 6.9 – 7.9) y de fertilidad alta. Se localizan en el cuerpo y base de los abanicos aluviales recientes, en relieves ligeramente planos con pendientes de 1 a 3%. Químicamente son suelos con una mediana CIC, mediana cantidad de bases totales, bajo contenido de carbono orgánico y baja disponibilidad de fósforo. La clasificación taxonómica se basa en la presencia de propiedades vérticas (suelos arcillosos, agrietas, con cuñas) y el régimen de humedad ústico (IGAC, 2004).

- **Haciendas asociadas: Esmeralda**

Orden de suelo: Molisol

Sub Orden de suelo: Ustolls

Gran Grupo de suelo: Haplustolls

Sub Grupo de suelo: Entic Haplustolls - Fluventic Haplustolls

Consociación – complejo de suelo: Complejo Libano – Río La Paila

Descripción: Este tipo de suelos se ha desarrollado en aluviones gruesos, son bien drenados, muy profundos, de reacción ligeramente ácida a neutra (pH 6.4 – 7.1 para el subgrupo Udifluventic Haplustepts) y neutra a moderadamente alcalina (pH 7.2 – 8.2, para el subgrupo de suelo Fluventic Haplustolls) y de fertilidad alta. Se localizan en el cuerpo y base de los abanicos aluviales recientes, en relieves ligeramente planos con pendientes de 1 a 3%. Químicamente: la consociación Río La Paila (Fluventic Haplustolls) son suelos con una mediana CIC, mediana cantidad de bases totales, bajo contenido de carbono orgánico y mediana disponibilidad de fósforo, mientras la consociación Libano (Entic Haplustolls) son suelos con una baja CIC, baja cantidad de bases totales, bajo contenido de carbono orgánico y alta disponibilidad de fósforo. La clasificación taxonómica se basa en la presencia del epipedón mólico (rico en materia orgánica bien humificada, saturado en cationes bivalentes generalmente Ca), la saturación de bases mayor o igual al 50%, la

ausencia de endopedón cámbico (Entic Haplustolls), decrecimiento irregular en el contenido de carbono orgánico (Fluventic Haplustolls) y el régimen de humedad ústico (IGAC, 2004).

- **Haciendas asociadas: Barbarita**

Orden de suelo: Molisol
Sub Orden de suelo: Ustolls
Gran Grupo de suelo: Haplustolls
Sub Grupo de suelo: Fluventic Haplustolls
Consociación – complejo de suelo: Consociación Guadualito

Descripción: Este tipo de suelos se ha desarrollado en aluviones gruesos, son moderadamente drenados, moderadamente profundos, limitados por el nivel freático, de reacción neutra a moderadamente alcalina (pH 7.3 – 7.9) y de fertilidad alta. Se localizan en el cuerpo y base de los abanicos aluviales recientes, en relieves ligeramente planos con pendientes de 1 a 3%. Químicamente son suelos con un alta CIC, alta cantidad de bases totales, bajo contenido de carbono orgánico y de mediana disponibilidad de fósforo. La clasificación taxonómica se basa en la presencia del epipedón mólico (rico en materia orgánica bien humificada, saturado en cationes bivalentes generalmente Ca), la saturación de bases mayor o igual al 50%. Condiciones acuícas dentro de los 100 cm y el régimen de humedad ústico (IGAC, 2004).

4.3.4. Ingenio Risaralda

- **Haciendas asociadas: Cabuyas**

Orden de suelo: Vertisol
Sub Orden de suelo: Aquerts
Gran Grupo de suelo: Endoaquerts
Sub Grupo de suelo: Chromic Endoaquerts - Fluvaquentic Humaquepts
Consociación – complejo de suelo: Complejo Rio de Janeiro – Palmasola

Descripción: Este tipo de suelos se ha desarrollado en aluviones muy finos, son pobremente drenados, superficiales limitados por el nivel freático, de reacción ligeramente ácida a neutra (pH 6.5 – 6.8 para el subgrupo Chromic Endoaquerts) y fuertemente ácida a moderadamente ácida (pH 5.3 – 5.6, para el subgrupo de suelo Fluvaquentic Humaquepts) y de fertilidad alta. Se localizan en la cubeta de decantación del río Cauca, en relieves ligeramente planos con pendientes de 1 a 3%. Químicamente: la consociación Rio de Janeiro (Chromic Endoaquerts) son suelos con una alta CIC, alta cantidad de bases totales, bajo contenido de carbono orgánico y de fósforo, mientras la consociación Palmasola (Fluvaquentic Humaquepts) son suelos con una alta CIC, alta cantidad de bases totales, mediano contenido de carbono orgánico y baja disponibilidad de fósforo. La clasificación taxonómica se basa en: i) la presencia de propiedades vérticas (suelos arcillosos, agrietas, con cuñas) y el régimen de humedad ácuico para el subgrupo Chromic Endoaquerts , ii) presencia de endopedón cámbico y epipedón mólico (rico en materia orgánica bien humificada, saturado en cationes bivalentes generalmente Ca), el decrecimiento irregular en el contenido de carbono orgánico y el régimen de humedad ácuico para el subgrupo Fluvaquentic Humaquepts (IGAC, 2004).

4.3.5. Ingenio Providencia

- **Haciendas asociadas: Alizal, Aurora, Santa Lucía**

Orden de suelo: Molisol
Sub Orden de suelo: Ustolls
Gran Grupo de suelo: Haplustolls
Sub Grupo de suelo: Vertic Haplustolls
Consociación – complejo de suelo: Consociación Palmeras

Descripción: Este tipo de suelos se ha desarrollado en aluviones mixtos, son bien drenados, profundos, de reacción neutra a moderadamente alcalina (pH 6.9 – 8.4) y de fertilidad muy alta. Se localizan en el cuerpo y base de los abanicos aluviales recientes, en relieves ligeramente planos con pendientes de 1 a 3%. Químicamente son suelos con alta CIC, alta cantidad de bases totales, bajo contenido de carbono orgánico y mediana disponibilidad de fósforo. La clasificación taxonómica se basa en la presencia del epipedón mólico (rico en materia orgánica bien humificada, saturado en cationes bivalentes generalmente Ca), la saturación de bases mayor o igual al 50% y el régimen de humedad ústico (IGAC, 2004).

- **Haciendas asociadas: Marsella**

Orden de suelo: Vertisol
Sub Orden de suelo: Usterts
Gran Grupo de suelo: Calciusterts
Sub Grupo de suelo: Udic Calciusterts
Consociación – complejo de suelo: Consociación Galpón

Descripción: Este tipo de suelos se ha desarrollado en aluviones finos, son imperfectamente drenados, superficiales limitados por el nivel freático, de reacción neutra a fuertemente alcalina (pH 7.0 – 8.5) y de fertilidad muy alta. Se localizan en el cuerpo y base de los abanicos aluviales recientes, en relieves ligeramente planos con pendientes de 1 a 3%. Químicamente son suelos con alta CIC, alta cantidad de bases totales, mediano contenido de carbono orgánico y alta disponibilidad de fósforo. La clasificación taxonómica se basa en la presencia de propiedades vérticas (suelos arcillosos, agrietas, con cuñas) y el régimen de humedad ústico (IGAC, 2004).

- **Haciendas asociadas: Ceiba**

Orden de suelo: Molisol
Sub Orden de suelo: Usterts
Gran Grupo de suelo: Calciusterts
Sub Grupo de suelo: Udic Calciusterts - Vertic Haplustolls
Consociación – complejo de suelo: Complejo Galpón – Palmeras

Descripción: Este tipo de suelos se ha desarrollado en aluviones muy mixtos, son imperfectamente – bien drenados, superficiales limitados por el nivel freático y profundos, de reacción neutra a fuertemente alcalina (pH 7.0 – 8.5, para el subgrupo Udic Calciusterts) y neutra a moderadamente alcalina (pH 6.9 – 8.4, para el subgrupo de suelo Vertic

Haplustolls) y de fertilidad muy alta. Se localizan en el cuerpo y base de los abanicos aluviales recientes, en relieves ligeramente planos con pendientes de 1 a 3%. Químicamente: la consociación Galpón (Udic Calciusterts) son suelos con alta CIC, alta cantidad de bases totales, mediano contenido de carbono orgánico y alta disponibilidad de fósforo, mientras la consociación Palmeras (Vertic Haplustolls) son suelos con alta CIC, alta cantidad de bases totales, bajo contenido de carbono orgánico y mediana disponibilidad de fósforo. La clasificación taxonómica se basa en: i) la presencia de propiedades vérticas (suelos arcillosos, agrietas, con cuñas) y el régimen de humedad ústico para el subgrupo Udic Calciusterts, ii) la presencia del epipedón mólico (rico en materia orgánica bien humificada, saturado en cationes bivalentes generalmente Ca), la saturación de bases mayor o igual al 50% y el régimen de humedad ústico para el subgrupo Vertic Haplustolls (IGAC, 2004).

- **Haciendas asociadas: Unión Molina**

Orden de suelo: Vertisol
Sub Orden de suelo: Ustolls
Gran Grupo de suelo: Haplustolls
Sub Grupo de suelo: Pachic Haplustolls
Consociación – complejo de suelo: Consociación Palmira

Descripción: Este tipo de suelos se ha desarrollado en aluviones mixtos, son bien drenados, muy profundos, de reacción neutra a moderadamente alcalina (pH 7.0 – 7.9) y de fertilidad alta. Se localizan en el cuerpo y base de los abanicos aluviales recientes, en relieves ligeramente planos con pendientes de 1 a 3%. Químicamente son suelos con alta CIC, alta cantidad de bases totales, alto contenido de carbono orgánico y baja disponibilidad de fósforo. La clasificación taxonómica se basa en la presencia del epipedón mólico (rico en materia orgánica bien humificada, saturado en cationes bivalentes generalmente Ca), la saturación de bases mayor o igual al 50% y el régimen de humedad ústico (IGAC, 2004).

4.3.6. Ingenio Manuelita

- **Haciendas asociadas: Florencia (Manuelita), Santa Anita**

Orden de suelo: Molisol
Sub Orden de suelo: Ustolls
Gran Grupo de suelo: Haplustolls
Sub Grupo de suelo: Cumulic Haplustolls - Pachic Haplustolls
Consociación – complejo de suelo: Complejo Manuelita – Palmira

Descripción: Este tipo de suelos se ha desarrollado en aluviones muy mixtos, son bien drenados, muy profundos, de reacción ligeramente – moderadamente alcalina (pH 7.5 – 8.4, para el subgrupo Cumulic Haplustolls) y reacción neutra a moderadamente alcalina (pH 7.0 – 7.9, para el subgrupo de suelo Pachic Haplustolls) y de fertilidad alta. Se localizan en el cuerpo y base de los abanicos aluviales recientes, en relieves ligeramente planos con pendientes de 1 a 3%. Químicamente: la consociación Manuelita (Cumulic Haplustolls) son suelos con una mediana CIC, mediana cantidad de bases totales, mediano contenido de carbono orgánico y de fósforo, mientras la consociación Palmira (Pachic Haplustolls) son

suelos con alta CIC, alta cantidad de bases totales, alto contenido de carbono orgánico y baja disponibilidad de fósforo. La clasificación taxonómica se basa en la presencia del epipedón mólico (rico en materia orgánica bien humificada, saturado en cationes bivalentes generalmente Ca), la saturación de bases mayor o igual al 50%, el decrecimiento irregular en el contenido de carbono orgánico (Cumulic Haplustolls) y el régimen de humedad ústico (IGAC, 2004).

- **Haciendas asociadas: Rosario**

Orden de suelo: Vertisol
Sub Orden de suelo: Ustolls
Gran Grupo de suelo: Haplustolls
Sub Grupo de suelo: Pachic Haplustolls
Consociación – complejo de suelo: Consociación Palmira

Descripción: Este tipo de suelos se ha desarrollado en aluviones mixtos, son bien drenados, muy profundos, de reacción neutra a moderadamente alcalina (pH 7.0 – 7.9) y de fertilidad alta. Se localizan en el cuerpo y base de los abanicos aluviales recientes, en relieves ligeramente planos con pendientes de 1 a 3%. Químicamente son suelos con alta CIC, alta cantidad de bases totales, alto contenido de carbono orgánico y baja disponibilidad de fósforo. La clasificación taxonómica se basa en la presencia del epipedón mólico (rico en materia orgánica bien humificada, saturado en cationes bivalentes generalmente Ca), la saturación de bases mayor o igual al 50% y el régimen de humedad ústico (IGAC, 2004).

- **Haciendas asociadas: Rosario, Real**

Orden de suelo: Molisol
Sub Orden de suelo: Ustolls
Gran Grupo de suelo: Haplustolls
Sub Grupo de suelo: Fluventic Haplustolls
Consociación – complejo de suelo: Consociación Guadualito

Descripción: Este tipo de suelos se ha desarrollado en aluviones gruesos, son moderadamente drenados, moderadamente profundos, limitados por el nivel freático, de reacción neutra a moderadamente alcalina (pH 7.3 – 7.9) y de fertilidad alta. Se localizan en el cuerpo y base de los abanicos aluviales recientes, en relieves ligeramente planos con pendientes de 1 a 3%. Químicamente son suelos con un alta CIC, alta cantidad de bases totales, bajo contenido de carbono orgánico y de mediana disponibilidad de fósforo. La clasificación taxonómica se basa en la presencia del epipedón mólico (rico en materia orgánica bien humificada, saturado en cationes bivalentes generalmente Ca), la saturación de bases mayor o igual al 50%. Condiciones acucias dentro de los 100 cm y el régimen de humedad ústico (IGAC, 2004).

- **Haciendas asociadas: Malimbu**

Orden de suelo: Molisol
Sub Orden de suelo: Ustolls
Gran Grupo de suelo: Haplustolls

Sub Grupo de suelo: Fluventic Haplustolls

Consociación – complejo de suelo: Consociación Rio La Paila

Descripción: Este tipo de suelos se ha desarrollado en aluviones gruesos, son bien drenados, profundos, de reacción neutra a moderadamente alcalina (pH 7.2 – 8.2) y de fertilidad alta. Se localizan en el cuerpo y base de los abanicos aluviales recientes, en relieves ligeramente planos con pendientes de 1 a 3%. Químicamente son suelos con una mediana CIC, mediana cantidad de bases totales, bajo contenido de carbono orgánico y mediana disponibilidad de fósforo. La clasificación taxonómica se basa en la presencia del epipedón mólico (rico en materia orgánica bien humificada, saturado en cationes bivalentes generalmente Ca), la saturación de bases mayor o igual al 50%, decrecimiento irregular en el contenido de carbono orgánico y el régimen de humedad ústico (IGAC, 2004).

- **Haciendas asociadas: Soledad, Olga**

Orden de suelo: Molisol

Sub Orden de suelo: Ustolls

Gran Grupo de suelo: Haplustolls

Sub Grupo de suelo: Entic Haplustolls

Consociación – complejo de suelo: Consociación Florida

Descripción: Este tipo de suelos se ha desarrollado en aluviones medianos, son bien drenados, muy profundos, de reacción neutra a ligeramente ácida (pH 6.3 – 6.9) y de fertilidad moderada. Se localizan en el cuerpo y base de los abanicos aluviales recientes, en relieves ligeramente planos con pendientes de 1 a 3%. Químicamente son suelos con una baja CIC, baja cantidad de bases totales, bajo contenido de carbono orgánico y alta disponibilidad de fósforo. La clasificación taxonómica se basa en la presencia del epipedón mólico (rico en materia orgánica bien humificada, saturado en cationes bivalentes generalmente Ca), la saturación de bases mayor o igual al 50%, la ausencia de endopedón cámbico y el régimen de humedad ústico (IGAC, 2004).

- **Haciendas asociadas: Josepilla**

Orden de suelo: Molisol

Sub Orden de suelo: Ustolls

Gran Grupo de suelo: Haplustolls

Sub Grupo de suelo: Cumulic Haplustolls

Consociación – complejo de suelo: Consociación Manuelita

Descripción: Este tipo de suelos se ha desarrollado en aluviones mixtos, son bien drenados, muy profundos, de reacción ligeramente – moderadamente alcalina (pH 7.5 – 8.4) y de fertilidad alta. Se localizan en el cuerpo y base de los abanicos aluviales recientes, en relieves ligeramente planos con pendientes de 1 a 3%. Químicamente son suelos con una mediana CIC, mediana cantidad de bases totales, mediano contenido de carbono orgánico y de fósforo. La clasificación taxonómica se basa en la presencia del epipedón mólico (rico en materia orgánica bien humificada, saturado en cationes bivalentes generalmente Ca), la saturación de bases mayor o igual al 50%, el decrecimiento irregular en el contenido de carbono orgánico y el régimen de humedad ústico (IGAC, 2004).

4.4. DISEÑO DE CAMPAÑAS DE MUESTREO Y SEGUIMIENTO A LA CALIDAD DEL SUELO Y AGUA SUBTERRÁNEA EN SITIOS PRIORIZADOS

Con base a la información suministrada por la CVC, se presentan las características de los sitios de monitoreo priorizados (Tabla 6). Se destaca que el principal orden de suelos encontrado es el molisol con un 65% de representatividad de los puntos priorizados, y una predominancia litológica de llanura aluvial de piedemonte, compuesta por gravas, arenas y limos del 76.2%.

Tabla 6. Características de los sitios de monitoreo priorizados.

Ingenio	Predio de Monitoreo	Municipio	Litología	Ecosistema	Orden de suelos
Incauca	Egipto	Jamundí	Cono aluvial	Bosque cálido húmedo en piedemonte coluvio-aluvial	Alfisolos
Incauca	Florencia	Florida	Llanura aluvial de piedemonte, compuesta por gravas, arenas y limos	Bosque cálido seco en piedemonte aluvial	Inceptisolos
Mayaguez	Casa de Teja	Candelaria	Cono aluvial	Bosque cálido seco en piedemonte coluvio-aluvial	Vertisolos
Incauca	Aranjuez	Florida	Llanura aluvial de piedemonte, compuesta por gravas, arenas y limos	Bosque cálido seco en piedemonte aluvial	Molisolos
Mayaguez	Esmeralda	Candelaria	Llanura aluvial de piedemonte, compuesta por gravas, arenas y limos	Bosque cálido seco en piedemonte aluvial	Molisolos
Mayaguez	Cofre	Candelaria	Llanura aluvial de piedemonte, compuesta por gravas, arenas y limos	Bosque cálido seco en piedemonte aluvial	Molisolos
Mayaguez	Arenal	Candelaria	Llanura aluvial de piedemonte, compuesta por gravas, arenas y limos	Bosque cálido seco en piedemonte aluvial	Molisolos
Mayaguez	La Unión	Candelaria	Llanura aluvial de piedemonte, compuesta por gravas, arenas y limos	Bosque cálido seco en piedemonte aluvial	Molisolos
Mayaguez	Zainera	Candelaria	Llanura aluvial de piedemonte, compuesta por gravas, arenas y limos	Bosque cálido seco en piedemonte aluvial	Molisolos
Mayaguez	La Barbarita	Candelaria	Llanura aluvial de piedemonte, compuesta por gravas, arenas y limos	Bosque cálido seco en piedemonte aluvial	Molisolos
Incauca	Las Palmas	Candelaria	Llanura aluvial de piedemonte, compuesta por gravas, arenas y limos	Bosque cálido seco en piedemonte aluvial	Molisolos
Manuelita	Malimbu	Palmira	Llanura aluvial de piedemonte, compuesta por gravas, arenas y limos	Arbustales y matorrales cálido seco en piedemonte aluvial	Molisolos
Manuelita	Josepilla	Palmira	Llanura aluvial de piedemonte, compuesta por gravas, arenas y limos	Arbustales y matorrales cálido seco en piedemonte aluvial	Molisolos
Manuelita	Florencia	Palmira	Llanura aluvial de piedemonte, compuesta por gravas, arenas y limos	Bosque cálido seco en piedemonte aluvial	Molisolos
Manuelita	Santa Anita	Palmira	Llanura aluvial de piedemonte, compuesta por gravas, arenas y limos	Bosque cálido seco en piedemonte aluvial	Molisolos
Manuelita	Rosario	Palmira	Llanura aluvial de piedemonte, compuesta por gravas, arenas y limos	Bosque cálido seco en piedemonte aluvial	Molisolos
Manuelita	Real	Palmira	Llanura aluvial de piedemonte, compuesta por gravas, arenas y limos	Bosque cálido seco en piedemonte aluvial	Molisolos

Ingenio	Predio de Monitoreo	Municipio	Litología	Ecosistema	Orden de suelos
Manuelita	Rosario	Palmira	Aluviones gruesos	Bosque cálido seco en piedemonte aluvial	Molisoles
Manuelita	Soledad	Palmira	Llanura aluvial de piedemonte, compuesta por gravas, arenas y limos	Bosque cálido seco en piedemonte aluvial	Molisoles
Manuelita	La Olga	Palmira	Llanura aluvial de piedemonte, compuesta por gravas, arenas y limos	Bosque cálido seco en piedemonte aluvial	Molisoles
Providencia	El Alizal	El Cerrito	Llanura aluvial de piedemonte, compuesta por gravas, arenas y limos	Bosque cálido seco en piedemonte aluvial	Molisoles
Providencia	Santa Lucia	El Cerrito	Llanura aluvial de piedemonte, compuesta por gravas, arenas y limos	Bosque cálido seco en piedemonte aluvial	Molisoles
Providencia	Unión Molina	El Cerrito	Llanura aluvial de piedemonte, compuesta por gravas, arenas y limos	Bosque cálido seco en piedemonte aluvial	Vertisoles
Providencia	Aurora	El Cerrito	Llanura aluvial de piedemonte, compuesta por gravas, arenas y limos	Bosque cálido seco en piedemonte aluvial	Vertisoles
Providencia	La Ceiba	El Cerrito	Llanura aluvial de piedemonte, compuesta por gravas, arenas y limos	Bosque cálido seco en piedemonte aluvial	Molisoles
Providencia	Marsella	El Cerrito	Llanura aluvial de piedemonte, compuesta por gravas, arenas y limos	Arbustales y matorrales calido seco en piedemonte aluvial	Vertisoles
Rio Paila	Margarita Floresta	Bugalagrande	Llanura aluvial de piedemonte, compuesta por gravas, arenas y limos	Bosque cálido seco en piedemonte aluvial	Vertisoles
Rio Paila	Gertrudis	Bugalagrande	Llanura aluvial de piedemonte, compuesta por gravas, arenas y limos	Bosque cálido seco en piedemonte aluvial	Molisoles
Rio Paila	La Cecilia	Bugalagrande	Llanura aluvial de piedemonte, compuesta por gravas, arenas y limos	Bosque cálido seco en piedemonte aluvial	Vertisoles
Rio Paila	Samaria	Bugalagrande	Aluviones gruesos	Bosque cálido seco en piedemonte aluvial	Molisoles
Rio Paila	Golfo	Bugalagrande	Depósitos aluviales rio Cauca (predominio de material arcilloso)	Bosque cálido seco en planicie aluvial	Vertisoles
Risaralda	Cabuyas	Cartago	Depósitos aluviales rio Cauca (predominio de material arcilloso)	Bosque cálido seco en planicie aluvial	Vertisoles

En la Tabla 7 se incluye el comportamiento histórico promedio de algunas variables de agua subterránea, en predios priorizados por la CVC para el monitoreo y seguimiento a la calidad de suelos y aguas subterráneas. Para cada sitio se relaciona el municipio y algunos parámetros de calidad del agua subterránea de estudios anteriores que fueron suministrados por el Grupo de Gestión del Riesgo y Cambio Climático de la CVC.

Se destaca en la información suministrada por la CVC para los sitios, que en el 74% de los pozos se realizó monitoreo y seguimiento de la calidad del agua subterránea de forma intermitente, mientras en el 26 % restante el seguimiento se realizó de forma anual. El 69% de los monitoreos se realizaron a partir del año 2010, con participación de la autoridad ambiental y de los ingenios azucareros en el desarrollo de los mismos.

Tabla 7. Comportamiento histórico de algunas variables de calidad de agua subterránea en sitios priorizados.

Nombre del predio	Municipio	Calidad del agua						
		pH	CE [μS/cm]	DQO [mg O ₂ / L]	OD [mg O ₂ / L]	S [mg SO ₄ /L]	N [mg N- NO ₃ /L]	F [mg PO ₄ -3/L]
Hacienda la Cecilia	Bugalagrande	7.52	889.48	12.53	4.88	10.04	1.05	1.66
Hacienda Margarita Floresta	Bugalagrande	7.49	608.5	7.61	0.55	10.86	1.15	1.19
Hacienda Gertrudis	Bugalagrande	6.49	367.26	11.38	0.83	14.02	2.17	2.32
Hacienda Samaria	Bugalagrande	7.69	734.3	9.83	0.83	5.53	1.15	1.58
Hacienda El Golfo - Suerte	Bugalagrande	7.44	716.22	14.35	0.6	5.46	1.43	2.55
Hacienda El Golfo - Suerte	Bugalagrande	7.58	750.44	15.82	0.47	17.83	0.63	3.07
Hacienda La Unión Molina	El Cerrito	7.26	960.65	-	1.28	33.32	2.02	0.41
Hacienda Marsella	El Cerrito	7.45	782.03	10.2	0.08	27.81	2.95	0.14
Hacienda la Ceiba	El Cerrito	7.48	610.89	-	2.05	30.75	2.73	0.82
Hacienda La Aurora	El Cerrito	7.08	695.18	7.5	-	22.47	1.73	0.09
Hacienda Santa Lucía	El Cerrito	6.95	756.96	31.18	-	28.19	0.58	0.03
Hacienda El Alizal	El Cerrito	7.24	871.75	10.68	-	31.76	0.23	0.15
Hacienda El Alizal	El Cerrito	7.17	923	7.32	-	29.81	0.45	0.21
Hacienda Santa Lucía	El Cerrito	7.04	768.67	16.03	-	32.1	1.76	0.1
Hacienda La Unión	Candelaria	7.06	966.12	5.04	0.4	32.94	1.66	0.37
Hacienda La Barbarita	Candelaria	7.18	839.76	9.09	0.56	43.75	0.28	0.85
Hacienda Casa de Teja	Candelaria	6.75	379.96	12.78	-	9.63	1.21	0.26
Hacienda El Cofre	Candelaria	6.99	648.36	7.89	0.29	17.72	0.32	0.69
Hacienda El Arenal	Candelaria	6.66	421.98	11.07	0.53	11.5	0.43	0.34
Hacienda La Zainera	Candelaria	7.17	925.34	10.5	-	43.36	2.33	0.14
Hacienda La Esmeralda	Candelaria	6.84	395.71	27.87	-	12.32	1.48	0.12
Hacienda Las Palmas	Florida	7.23	700	7	-	21.4	< 0.1	0.82
Hacienda Aranjuez Cauca	Florida	7.53	471	5	-	13.5	1.4	1.06
Hacienda Florencia Valle	Florida	6.59	622.6	7.53	-	22.28	0.21	0.94
Hacienda Egipto	Jamundí	6.31	325.6	8	-	9.045	-	-
Hacienda Egipto	Jamundí	6.44	234.25	15.5	-	16.77	1.07	-
Hacienda Cabuyas	Cartago	7.13	855.14	14.24	2.16	69.8	1.58	4.09
Hacienda Cabuyas	Cartago	7.02	2483.43	27.9	1.81	808.6	3.99	2.94
Hacienda Santa Anita	Palmira	6.99	1266.18	10.1	0.07	75.68	0.17	0.15
Hacienda Florencia	Palmira	7.17	1350.2	9.59	0.04	122.05	0.36	0.21
Hacienda El Rosario	Palmira	7.06	836.23	11.36	0.18	40.21	1.27	0.21
Hacienda El Rosario	Palmira	6.78	583.09	26.2	0.39	22.51	2.05	0.38

Nombre del predio	Municipio	Calidad del agua						
		pH	CE [μ S/cm]	DQO [mg O ₂ / L]	OD [mg O ₂ / L]	S [mg SO ₄ /L]	N [mg N- NO ₃ /L]	F [mg PO ₄ -3/L]
Hacienda Real	Palmira	7.27	731.7	5.65	0.31	30.13	4.09	0.22
Hacienda Real	Palmira	7.21	700.17	6.81	0.44	26.83	3.31	0.3
Hacienda Malimbú	Palmira	7	1019.8	8.72	0.22	60.5	1.1	0.6
Hacienda Josepilla	Palmira	7.1	1185.7	6.57	0.16	145.5	0.8	0.6
Hacienda La Soledad	Palmira	7.06	849.64	-	0.19	41.41	2.46	0.39
Hacienda La Olga - Suerte	Palmira	7.05	753.28	12.28	0.34	22.31	2.73	0.16
Hacienda La Olga	Palmira	7.33	765.57	-	-	29.1	2.43	0.12
Hacienda El Porvenir	El Cerrito	6.8	810.8	20.6	0.4	64.5	7.4	0.3

Donde CE es la conductividad eléctrica, OD es oxígeno disuelto, S son los sulfatos, N son los nitratos y F son los fosfatos.

Las campañas de monitoreo de suelo y agua subterránea se diseñaron con base a la ubicación de los sitios priorizados, la accesibilidad a los predios y las condiciones del terreno. De igual forma se tuvo en cuenta condiciones climáticas y el estado del cultivo. En las Figuras 4 a 8 se presenta la ubicación de cada sitio de muestreo priorizado por la CVC en el área de estudio. Así mismo, en las Tablas 8 a 13 se reporta la ubicación (georreferenciación) de los sitios de muestreo para cada una de las submuestras de suelo obtenidas en cada uno de los predios definidos por la autoridad ambiental.

4.4.1. Sitios priorizados de muestreo Municipio Bugalagrande

A continuación, se presenta el registro fotográfico de los sitios priorizados en el Ingenio Rio Paila.



Margarita Floresta



Cecilia



Gertrudis



Golfo



Samaria

Fotografía 1. Sitios priorizados en el Ingenio Rio Paila.

En la Tabla 8 y Figura 5 se presenta la información relacionada con los sitios priorizados con cultivos de caña de azúcar para el Ingenio Río Paila ubicados en el municipio de Bugalagrande.

Tabla 8. Sitios priorizados de muestreo en predios del Municipio de Bugalagrande.

Código de pozo	Nombre del predio	Coordenadas Latitud				Coordenadas Longitud			
		Grad.	Min.	Seg.	Latitud	Grad.	Min.	Seg.	Longitud
vbg-pm-5	La Cecilia	4	15	2	4.250555556	76	12	10	-76.20277778
		4	15	0	4.25000000	76	12	13	-76.20361111
		4	14	58	4.24944444	76	12	12	-76.20333333
		4	14	56	4.24888889	76	12	14	-76.20388889
vbg-pm-6	Margarita Floresta	4	12	52	4.21444444	76	11	57	-76.19916667
		4	12	52	4.21444444	76	11	59	-76.19972222
		4	12	49	4.21361111	76	12	0	-76.20000000
		4	12	48	4.21333333	76	12	2	-76.20055556
vbg-pm-7	Gertrudis	4	14	59	4.24972222	76	7	58	-76.13277778
		4	14	59	4.24972222	76	7	57	-76.13250000
		4	14	52	4.24777778	76	7	57	-76.13250000
		4	14	51	4.24750000	76	7	57	-76.13250000
vbg-pm-8	Samaria	4	15	32	4.25888889	76	9	52	-76.1644444
		4	15	31	4.25861111	76	9	50	-76.1638889
		4	15	28	4.25777778	76	9	48	-76.1633333
		4	15	34	4.25944444	76	9	55	-76.1652778
vbg-pm-9	El Golfo	4	17	18	4.28833333	76	9	37	-76.1602778
		4	17	18	4.28833333	76	9	39	-76.1608333
		4	17	20	4.28888889	76	9	40	-76.1611111
		4	17	22	4.28944444	76	9	41	-76.1613889
vbg-pm-10	El Golfo	4	17	21	4.28916667	76	9	44	-76.1622222
		4	17	20	4.28888889	76	9	42	-76.1616667
		4	17	19	4.28861111	76	9	41	-76.1613889
		4	17	16	4.28777778	76	9	39	-76.1608333

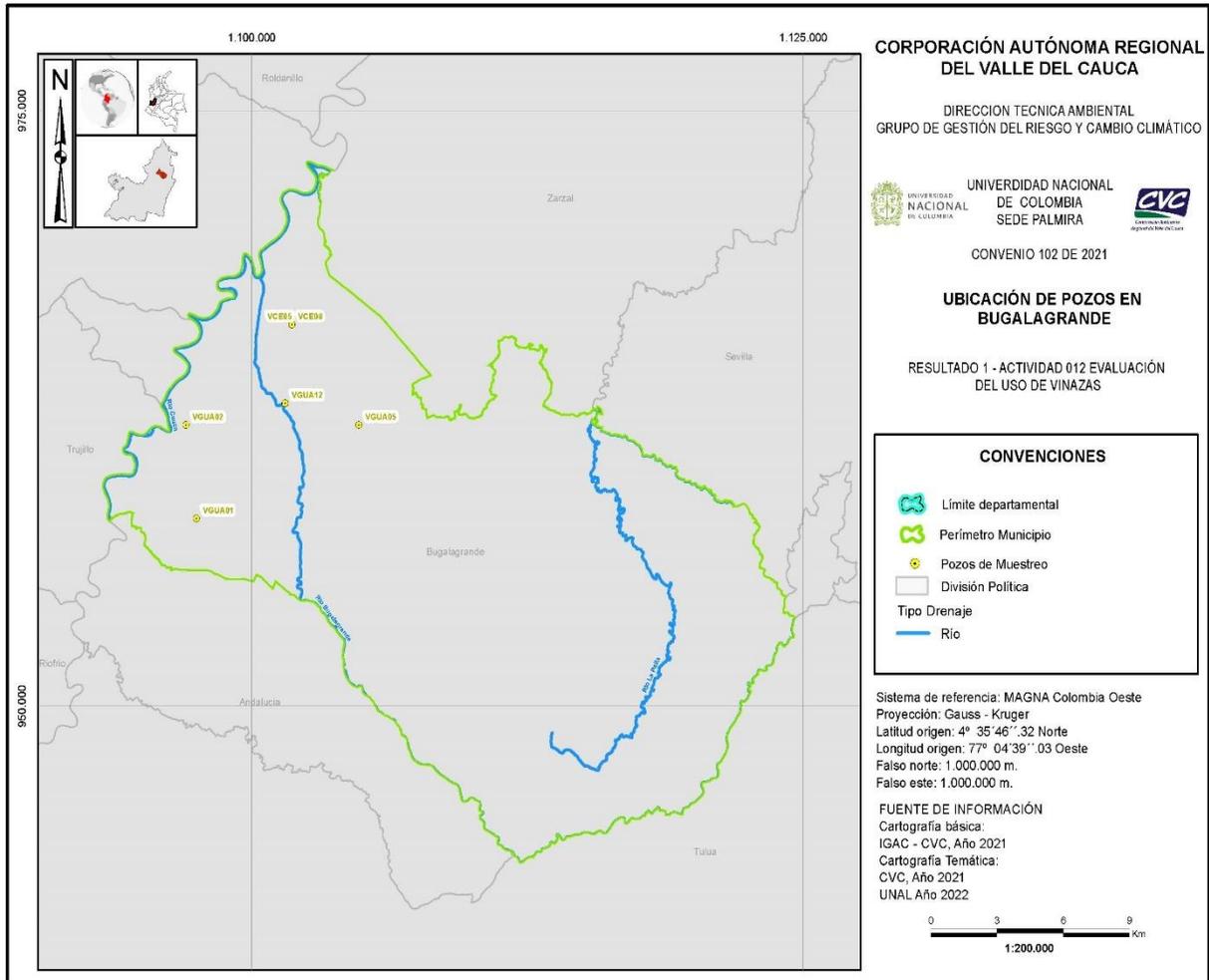


Figura 5. Sitios de muestreo ubicados en predios del Municipio de Bugalagrande.

4.4.2. Sitios priorizados de muestreo del Municipio El Cerrito.

A continuación, se presenta el registro fotográfico de los sitios priorizados en el Ingenio Providencia.



Alizal



Aurora



Ceiba



Unión Molina



Santa Lucía



Marsella

Fotografía 2. Sitios priorizados en el Ingenio Providencia.

En las Tabla 9 y la Figura 6 se presenta la información relacionada con los sitios priorizados con cultivos de caña de azúcar para el Ingenio Providencia ubicados en el municipio de El Cerrito.

Tabla 9. Sitios priorizados de muestreo en el Municipio de Cerrito.

Código de pozo	Nombre del predio	Coordenadas Latitud				Coordenadas Longitud			
		Grad.	Min.	Seg.	Latitud	Grad.	Min.	Seg.	Longitud
vce-pm-8	La Unión Molina	3	39	35	3.65972222	76	22	1	-76.3669444
		3	39	34	3.65944444	76	22	0	-76.3666667
		3	39	35	3.65972222	76	22	2	-76.3672222
		3	39	35	3.65972222	76	21	59	-76.3663889
vce-pm-9	Marsella	3	40	51	3.68083333	76	24	18	-76.4050000
		3	40	52	3.68111111	76	24	21	-76.4058333
		3	40	50	3.68055556	76	24	23	-76.4063889
		3	40	49	3.68027778	76	24	19	-76.4052778
vce-pm-10	La Ceiba	3	40	5	3.66805556	76	20	48	-76.3466667
		3	40	4	3.66777778	76	20	46	-76.3461111
		3	40	11	3.66972222	76	20	49	-76.3469444
		3	40	8	3.66888889	76	20	48	-76.3466667
vce-pm-11	La Aurora	3	40	1	3.66694444	76	18	43	-76.3119444
		3	40	5	3.66805556	76	18	41	-76.3113889
		3	40	2	3.66722222	76	18	42	-76.3116667
		3	40	3	3.66750000	76	18	42	-76.3116667
vce-pm-19	Santa Lucía	3	38	22	3.63944444	76	18	0	-76.3000000
		3	38	21	3.63916667	76	18	1	-76.3002778
		3	38	25	3.64027778	76	18	0	-76.3000000
		3	38	18	3.63833333	76	18	0	-76.3000000
vce-pm-22	El Alizal	3	37	13	3.62027778	76	19	39	-76.3275000
		3	37	16	3.62111111	76	19	38	-76.3272222
		3	37	10	3.61944444	76	19	38	-76.3272222
		3	37	8	3.61888889	76	19	40	-76.3277778
vce-pm-23	El Alizal	3	37	16	3.62111111	76	19	40	-76.3277778
		3	37	13	3.62027778	76	19	41	-76.3280556
		3	37	10	3.61944444	76	19	41	-76.3280556
		3	37	7	3.61861111	76	19	42	-76.3283333
vce-pm-28	Santa Lucía	3	38	18	3.63833333	76	18	4	-76.3011111
		3	38	20	3.63888889	76	18	3	-76.3008333
		3	38	22	3.63944444	76	18	3	-76.3008333
		3	38	25	3.64027778	76	18	3	-76.3008333
vce-pm-30	Santa Lucía	3	38	26	3.64055556	76	17	57	-76.2991667
		3	38	27	3.64083333	76	17	56	-76.2988889
		3	38	29	3.64138889	76	17	57	-76.2991667
		3	38	28	3.64111111	76	17	54	-76.2983333

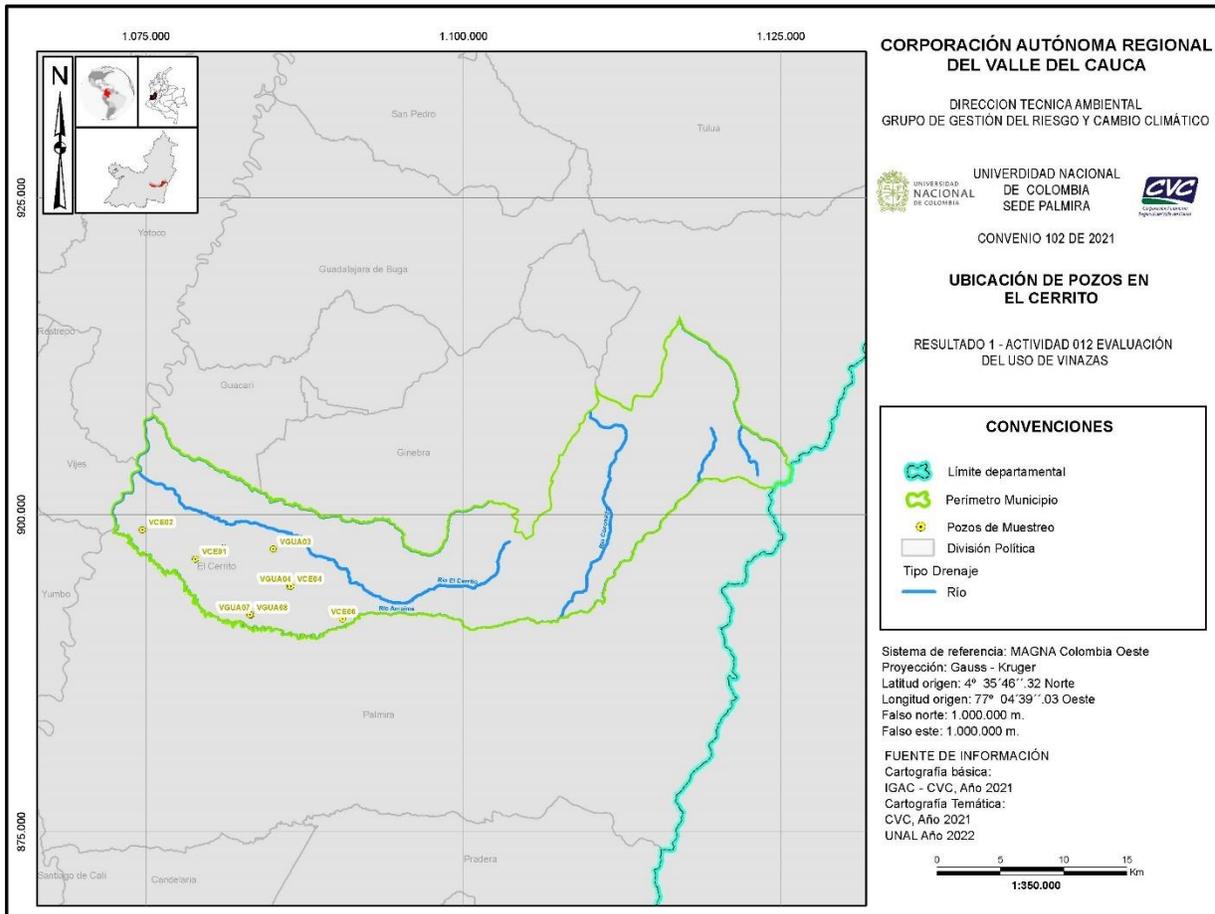


Figura 6. Sitios de muestreo pertenecientes al Municipio El Cerrito.

4.4.3. Sitios priorizados de muestreo en el Municipio de Palmira.

A continuación, se presenta el registro fotográfico de los sitios priorizados en el Ingenio Manuelita.



Rosario



Santa Anita



Josepilla



Real



Olga



Soledad



Florencia

Fotografía 3. Sitios priorizados en el Ingenio Manuelita.

En las Tabla 10 y la Figura 7 se presenta la información relacionada con los sitios priorizados con cultivos de caña de azúcar para el Ingenio Manuelita ubicados en el municipio de El Cerrito.

Tabla 10. Sitios priorizados de muestreo en Palmira – Ingenio Manuelita.

Código de pozo	Nombre del predio	Coordenadas Latitud				Coordenadas Longitud			
		Grad.	Min.	Seg.	Latitud	Grad.	Min.	Seg.	Longitud
vp-pm-13	Santa Anita	3	35	7	3.58527778	76	19	39	-76.3275
		3	35	10	3.58611111	76	19	39	-76.3275
		3	35	11	3.58638889	76	19	40	-76.327778
		3	35	14	3.58722222	76	19	39	-76.3275
vp-pm-14	Florencia	3	34	57	3.58250000	76	20	5	-76.3347222
		3	34	56	3.58222222	76	20	4	-76.3344444
		3	34	54	3.58166667	76	20	5	-76.3347222
		3	34	53	3.58138889	76	20	4	-76.3344444
vp-pm-27	El Rosario	3	36	12	3.60333333	76	17	58	-76.2994444
		3	36	13	3.60361111	76	17	57	-76.2991667
		3	36	9	3.60250000	76	17	57	-76.2991667
		3	36	8	3.60222222	76	17	59	-76.2997222
vp-pm-28	El Rosario	3	35	20	3.58888889	76	17	58	-76.2994444
		3	35	20	3.58888889	76	17	55	-76.2986111
		3	35	19	3.58861111	76	17	56	-76.2988889
		3	35	18	3.58833333	76	17	53	-76.2980556
vp-pm-39	Hacienda Real	3	35	44	3.59555556	76	19	53	-76.3313889
		3	35	43	3.59527778	76	19	52	-76.3311111
		3	35	42	3.59500000	76	19	53	-76.3313889
		3	35	41	3.59472222	76	19	52	-76.3311111
vp-pm-35	La Soledad	3	36	37	3.61027778	76	22	23	-76.3730556
		3	36	35	3.60972222	76	22	24	-76.3733333
		3	36	39	3.61083333	76	22	23	-76.3730556
		3	36	41	3.61138889	76	22	23	-76.3730556
vp-pm-76	La Olga	3	36	47	3.61305556	76	22	7	-76.3686111
		3	36	49	3.61361111	76	22	8	-76.3688889
		3	36	51	3.61416667	76	22	6	-76.3683333
		3	36	52	3.61444444	76	22	6	-76.3683333
vp-pm-46	La Olga	3	37	3	3.61750000	76	22	6	-76.3683333
		3	37	2	3.61722222	76	22	6	-76.3683333
		3	37	0	3.61666667	76	22	7	-76.3686111
		3	36	59	3.61638889	76	22	7	-76.3686111
vp-pm-32	Malimbú	3	32	44	3.54555556	76	20	35	-76.3430556
		3	32	43	3.54527778	76	20	35	-76.3430556
		3	32	41	3.54472222	76	20	36	-76.3433333
		3	32	39	3.54416667	76	20	36	-76.3433333
vp-pm-33	Josepilla	3	34	15	3.57083333	76	24	12	-76.4033333
		3	34	16	3.57111111	76	24	11	-76.4030556
		3	34	18	3.57166667	76	24	11	-76.4030556
		3	34	19	3.57194444	76	24	12	-76.4033333

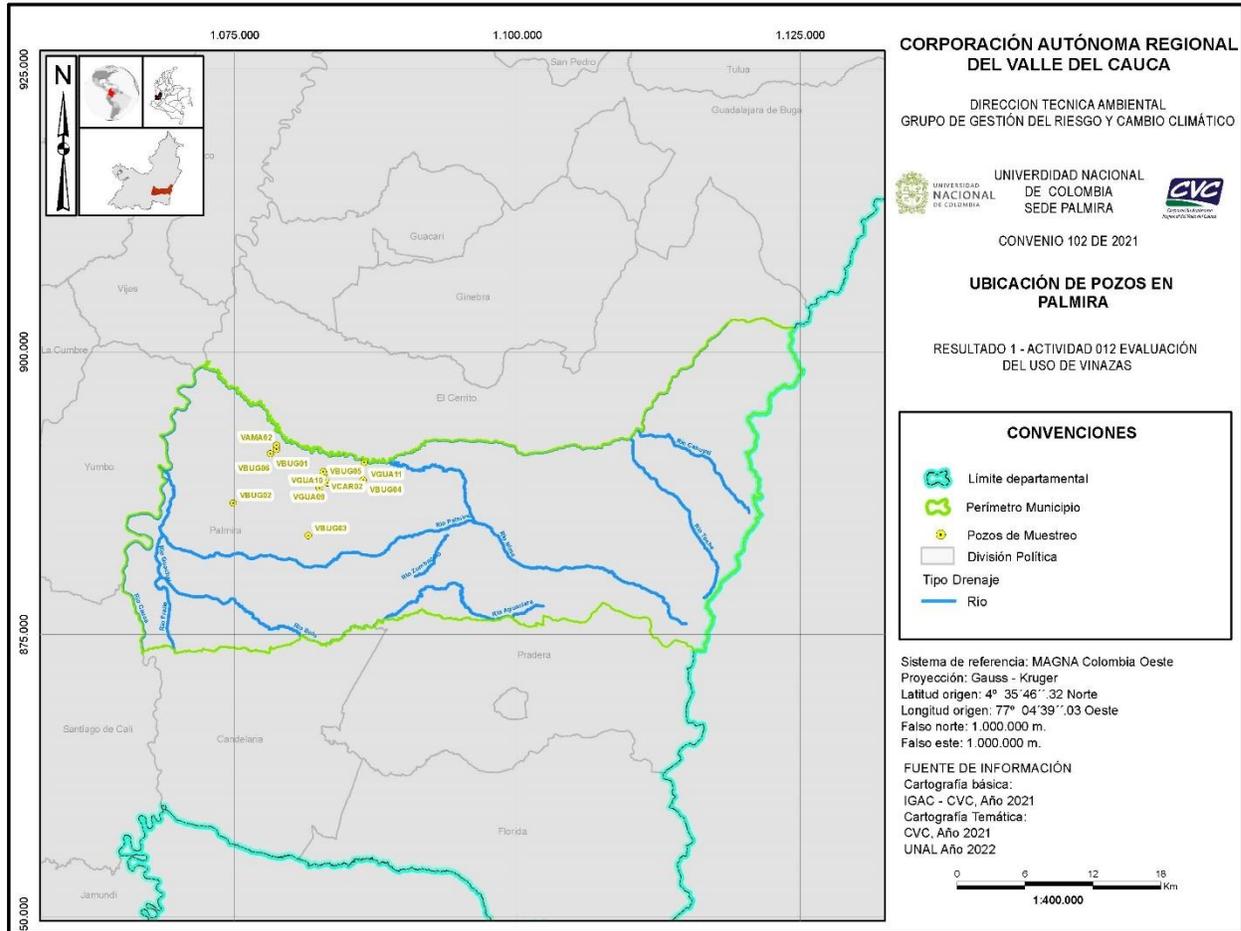


Figura 7. Sitios de muestreo pertenecientes al Municipio de Palmira.

4.4.4. Sitios priorizados de muestreo del Municipio de Candelaria.

A continuación, se presenta el registro fotográfico de los sitios priorizados en el Ingenio Mayagüez.



Fotografía 4. Sitios priorizados en el Ingenio Mayagüez.

En la Tabla 11 y Figura 8 se presenta la información relacionada con los sitios priorizados en cultivos de caña de azúcar del Ingenio Mayagüez en el municipio de Candelaria.

Tabla 11. Sitios priorizados de muestreo del municipio de Candelaria.

Código de pozo	Nombre del predio	Coordenadas Latitud				Coordenadas Longitud			
		Grad.	Min.	Seg.	Latitud	Grad.	Min.	Seg.	Longitud
vcn-pm-15	La Unión	3	24	26	3.40722222	76	19	54	-76.3316667
		3	24	29	3.40805556	76	19	54	-76.3316667
		3	24	29	3.40805556	76	19	53	-76.3313889
		3	24	32	3.40888889	76	19	55	-76.3319444
vcn-pm-18	Hacienda El Cofre	3	21	53	3.36472222	76	20	17	-76.3380556
		3	21	52	3.36444444	76	20	16	-76.3377778
		3	21	51	3.36416667	76	20	15	-76.3375
		3	21	50	3.36388889	76	20	14	-76.3372222
vcn-pm-16	La Barbarita	3	25	20	3.42222222	76	21	10	-76.3527778
		3	25	19	3.42194444	76	21	8	-76.3522222
		3	25	22	3.42277778	76	21	9	-76.3525000
		3	25	23	3.42305556	76	21	11	-76.3530556
vcn-pm-17	Casa de Teja	3	20	0	3.33333333	76	19	16	-76.3211111
		3	19	58	3.33277778	76	19	16	-76.3211111
		3	19	57	3.33250000	76	19	17	-76.3213889
		3	19	55	3.33194444	76	19	18	-76.3216667
vcn-pm-19	El Arenal	3	22	56	3.38222222	76	21	39	-76.3608333
		3	22	52	3.38111111	76	21	39	-76.3608333

Código de pozo	Nombre del predio	Coordenadas Latitud				Coordenadas Longitud			
		Grad.	Min.	Seg.	Latitud	Grad.	Min.	Seg.	Longitud
vcn-pm-27	La Zainera	3	22	53	3.38138889	76	21	36	-76.3600000
		3	22	50	3.38055556	76	21	35	-76.3597222
		3	24	51	3.41416667	76	19	0	-76.3166667
		3	24	51	3.41416667	76	19	2	-76.3172222
		3	24	49	3.41361111	76	19	1	-76.3169444
vcn-pm-29	La Zainera	3	24	50	3.41388889	76	19	3	-76.3175000
		3	24	59	3.41638889	76	18	53	-76.3147222
		3	24	58	3.41611111	76	18	53	-76.3147222
		3	24	58	3.41611111	76	18	54	-76.3150000
vcn-pm-30	La Esmeralda	3	25	0	3.41666667	76	18	51	-76.3141667
		3	20	33	3.34250000	76	20	23	-76.3397222
		3	20	33	3.34250000	76	20	21	-76.3391667
		3	20	35	3.34305556	76	20	21	-76.3391667
vcn-pm-33	La Esmeralda	3	20	34	3.34277778	76	20	20	-76.3388889
		3	20	34	3.34277778	76	20	12	-76.3366667
		3	20	34	3.34277778	76	20	14	-76.3372222
		3	20	33	3.34250000	76	20	14	-76.3372222
		3	20	33	3.34250000	76	20	15	-76.3375

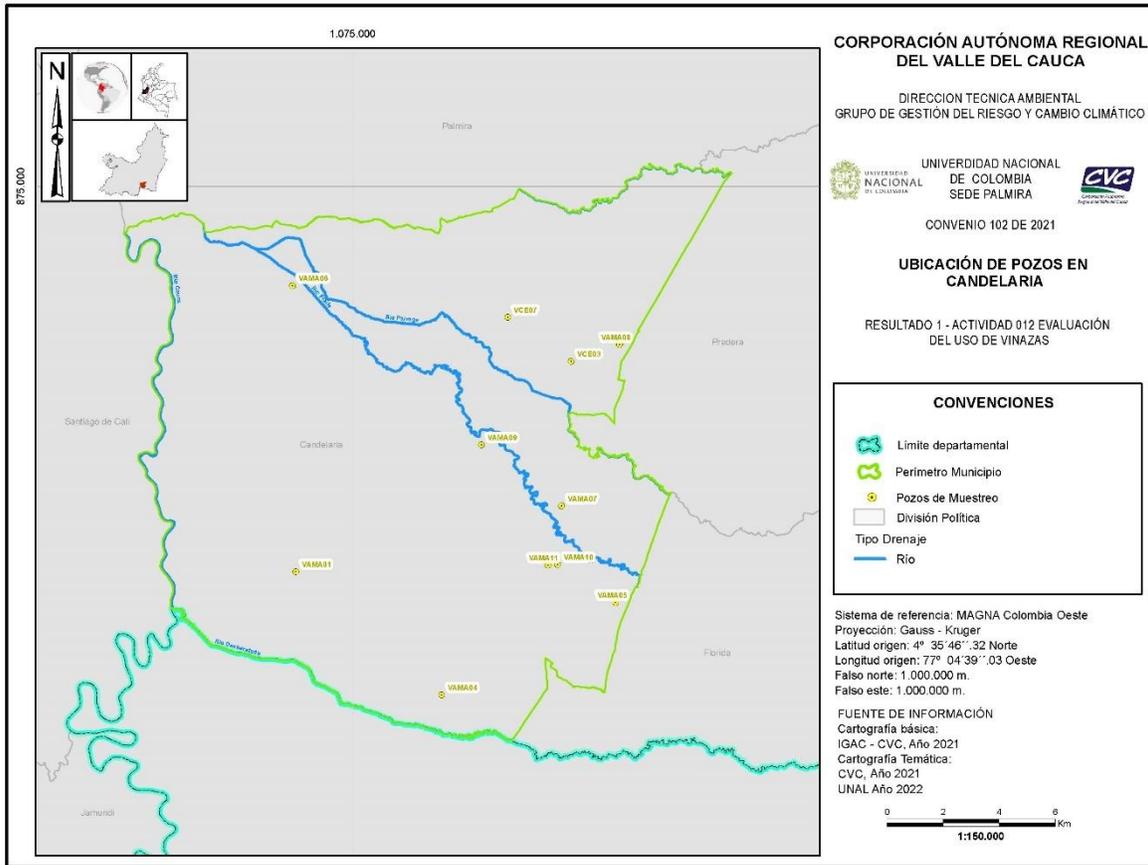


Figura 8. Sitios de muestreo pertenecientes al Municipio de Candelaria.

4.4.5. Sitios priorizados de muestreo Municipios de Jamundí.

A continuación, se presenta el registro fotográfico de los sitios priorizados en el Ingenio del Cauca.



Aranjuez



Egipto



Florencia



Las Palmas

Fotografía 5. Sitios priorizados en el Ingenio Incauca.

En la Tabla 12 y Figura 9 se presentan la información relacionada con los sitios priorizados en cultivos de caña de azúcar del Ingenio del Cauca en los municipios de Jamundí y Candelaria.

Tabla 12. Sitios priorizados de muestreo Ingenio del Cauca en el Municipio de Jamundí

Código de pozo	Nombre del predio	Coordenadas Latitud			Coordenadas Longitud				
		Grad.	Min.	Seg.	Latitud	Grad.	Min.	Seg.	Longitud
vcn-pm-63	Las Palmas	3	26	1	3.43361111	76	25	23	-76.4230556
		3	25	57	3.43250000	76	25	24	-76.4233333
		3	25	58	3.43277778	76	25	22	-76.4227778
		3	25	55	3.43194444	76	25	23	-76.4230556
vcn-pm-64	Aranjuez Cauca	3	20	26	3.34055556	76	25	16	-76.4211111
		3	20	26	3.34055556	76	25	15	-76.4208333
		3	20	25	3.34027778	76	25	14	-76.4205556
vcn-pm-65	Florencia Valle	3	20	27	3.34083333	76	25	15	-76.4208333
		3	18	3	3.30083333	76	22	26	-76.3738889
		3	18	3	3.30083333	76	22	25	-76.3736111
		3	18	2	3.30055556	76	22	24	-76.3733333
vj-pm-9	Egipto	3	18	2	3.30055556	76	22	23	-76.3730556
		3	9	38	3.16055556	76	31	28	-76.5244444
		3	9	39	3.16083333	76	31	28	-76.5244444
		3	9	41	3.16138889	76	31	28	-76.5244444
vj-pm-11	Egipto	3	9	42	3.16166667	76	31	29	-76.5247222
		3	9	38	3.16055556	76	31	32	-76.5255556
		3	9	39	3.16083333	76	31	34	-76.5261111
		3	9	42	3.16166667	76	31	33	-76.5258333
		3	9	43	3.16194444	76	31	35	-76.5263889

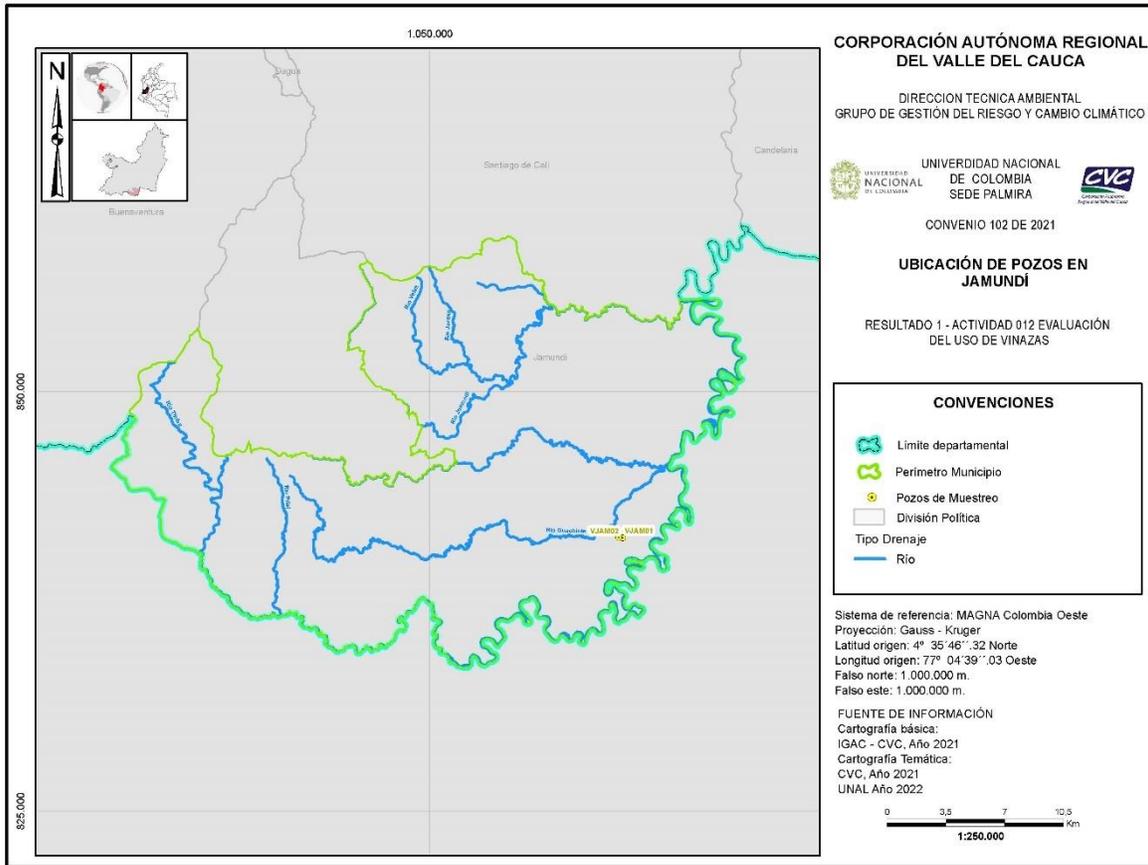


Figura 9. Sitios de muestreo pertenecientes al Municipio de Jamundí.

4.4.6. Sitios priorizados de muestreo en el Municipio de Cartago.

A continuación, se presenta el registro fotográfico de los sitios priorizados en el Ingenio Risaralda.



Fotografía 6. Sitios priorizados en el Ingenio Risaralda.

En la Tabla 13 y Figura 10 se presenta la información relacionada con los sitios priorizados en el municipio de Cartago en cultivos de caña de azúcar del Ingenio Risaralda.

Tabla 13. Sitios priorizados de muestreo Ingenio Risaralda en el Municipio de Cartago

Código de pozo	Nombre del predio	Coordenadas Latitud				Coordenadas Longitud			
		Grad.	Min.	Seg.	Latitud	Grad.	Min.	Seg.	Longitud
vcr-pm-30	Cabuyas	4	43	44	4.72888889	75	58	0	-75.9666667
		4	43	43	4.72861111	75	58	2	-75.9672222
		4	43	44	4.72888889	75	58	2	-75.9672222
		4	43	45	4.72916667	75	58	2	-75.9672222
vcr-pm-31	Cabuyas	4	43	50	4.73055556	75	58	15	-75.9708333
		4	43	50	4.73055556	75	58	14	-75.9705556
		4	43	48	4.73000000	75	58	13	-75.9702778
		4	43	48	4.73000000	75	58	11	-75.9697222

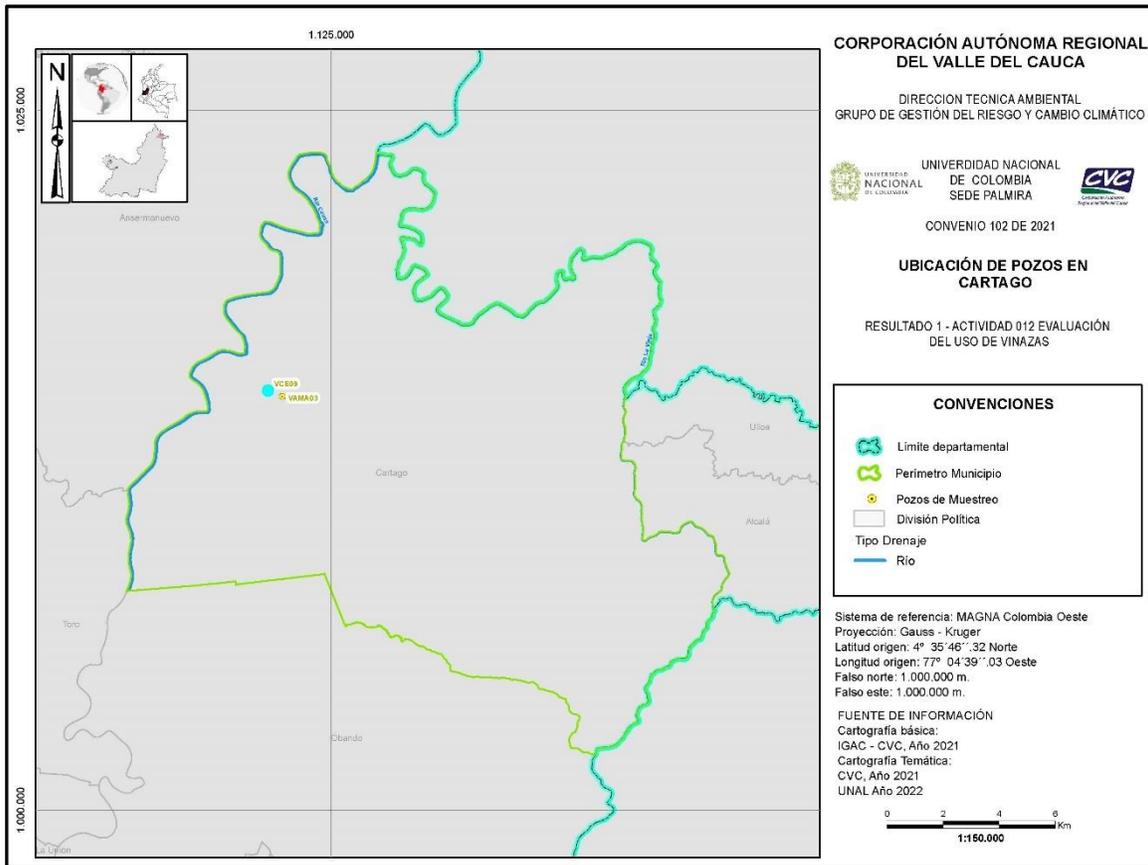


Figura 10. Sitios de muestreo pertenecientes al Municipio de Cartago.

4.5. MUESTREO DE SUELOS Y AGUAS SUBTERRÁNEAS

4.5.1 Muestreo de suelos

Para el muestreo de suelos se empleó la metodología establecida por la CVC y la Guía para toma de Muestras de Suelos para Análisis Químicos y Físicos de Agrosavia, laboratorio donde se realizaron los análisis de suelos (Figura 11) esta información se comparó con metodologías propuestas por otros autores a nivel nacional.

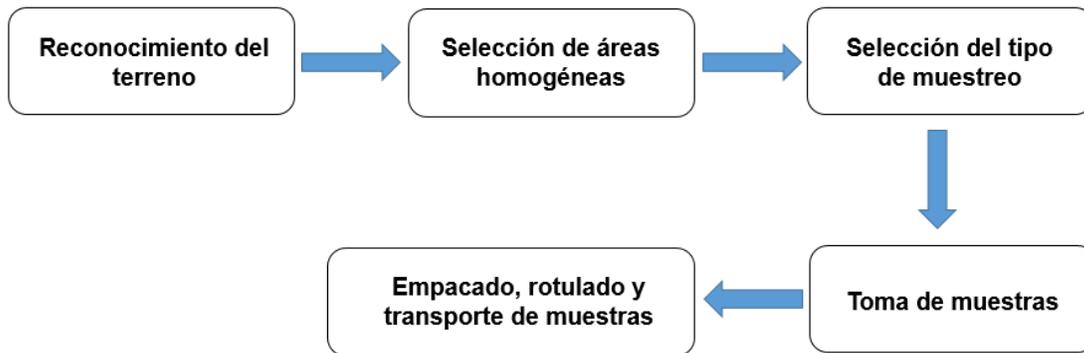


Figura 11. Esquema metodológico para la toma de muestras de suelo

Inicialmente se realiza la etapa de reconocimiento del terreno a evaluar, con el fin de obtener información que permita realizar el muestreo. Dentro de la información a recopilar se encuentran las condiciones climáticas de la zona, los mapas de vulnerabilidad de los acuíferos, las características (clasificación taxonómica) y uso del suelo. Los parámetros asociados a la caracterización de aguas subterráneas o acuíferos, la clasificación taxonómica de suelos y las prácticas de uso de suelo coinciden con los requerimientos reportados por Mendoza y Espinoza (2017).

Posteriormente se seleccionan áreas homogéneas del terreno, es decir, áreas que posean características visuales similares que permitan predecir que su comportamiento químico y físico es similar. Las características visuales a tener en cuenta son el tipo de relieve, el color del área, el drenaje y el manejo agronómico, parámetros que coinciden con los datos reportados por Mendoza y Espinoza (2017).

Con base a la selección de áreas homogéneas en el terreno a evaluar, se plantea el tipo de muestreo, siendo el muestreo estratificado o por estratos el más utilizado. Este tipo de método presenta ventajas significativas como la optimización de recursos con la obtención de mayor precisión y la reducción en el número de muestras. Paralelamente a la selección del tipo de muestreo, se debe localizar los puntos donde se llevará a cabo la toma de la muestra (georreferenciar). El modelo para utilizar es el muestreo sistemático al tresbolillo o zig zag, permitiendo cubrir toda la extensión del área a evaluar e interrelacionar la localización espacial de los puntos de muestreo con la concentración de la sustancia a estudiar. Este tipo de modelo es reportado en las metodologías propuestas por Páez *et al.* (2012), Mendoza y Espinoza (2017), Agrosavia y el Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria. Contrastando con este tipo de muestreo, Khomutinin *et al.* (2020) exponen

como alternativa de muestreo el emplear cuadrillas rectangulares con un distanciamiento de celdas: i) grandes de 2, 5 o 10 m, ii) medianas de 0.2, 2 o 2.5 m, y iii) finas de 0.07, 0.1 o 0.15 m. En adición, explican que las muestras se deben de tomar entre las intersecciones de las cuadrillas (Figura 12). El número de puntos de muestreo se calcula con la ayuda de la siguiente ecuación (1):

$$n = 5 + A \quad (1)$$

Donde n es el número de puntos de muestreo, A es el área investigada en hectáreas (ha). Adicionalmente, Mendoza y Espinoza (2017) mencionan que, en suelos de planicie, no es recomendado muestrear áreas superiores a diez hectáreas en cultivos anuales, así como para cultivos intensivos se recomienda hacer un muestreo por año.

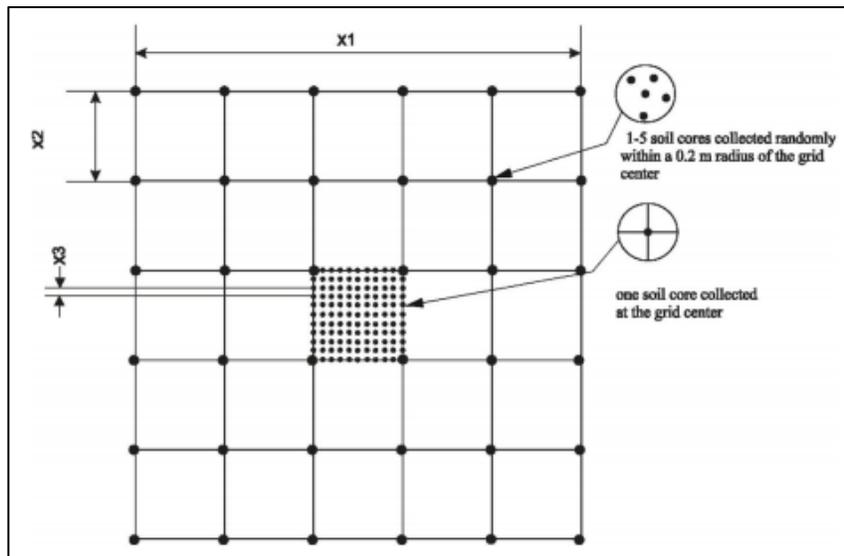


Figura 12. Muestreo por Cuadrillas reportado por Khomutinin *et al.* (2020).

La profundidad a la cual se van a tomar las muestras se definió con base al protocolo de muestreo de suelos establecido por Agrosavia, en el cual se menciona que para cultivos semestrales o transitorios la profundidad de muestreo es de 0 – 20 cm. Se debe resaltar que los elementos utilizados para la toma de muestras fueron: i) barreno de tipo holandés, útil para la toma de muestras a diferentes profundidades, ii) balde, implemento requerido para depositar y mezclar las submuestras, iii) cilindros de aluminio, empleados para la toma de muestras no disturbadas.

Para la extracción de la muestra, inicialmente se eliminó la cobertura vegetal, así como la limpieza de la superficie descartando todo tipo de elementos que puedan interferir en el muestreo. Posteriormente, para la caracterización química del suelo, se introduce un barreno tipo holandés hasta 20 cm de profundidad, eliminando la parte de suelo que haya estado en contacto con el equipo muestreador; lo anterior coincide con las observaciones reportadas por Mendoza y Espinoza (2017). Las submuestras se colocaron en un balde donde se redujo el tamaño de los terrones y se homogenizó el material, con el fin de obtener 1.5 kg de suelo. Para la caracterización física del terreno se utilizaron cilindros de aluminio de 5 cm de diámetro y 5 cm de altura, buscando mantener las mismas condiciones del suelo cuando ocupaba ese espacio en el campo. Cabe resaltar que los puntos donde se tomaron

cada una de las submuestras, fueron georreferenciados haciendo uso de un sistema GPS, con el fin de tener trazabilidad de los resultados en futuros monitoreos. Las porciones de suelo tomadas de acuerdo con el análisis se colocaron en doble bolsa plástica junto con el formato de solicitud exigido por Agrosavia y CIAT, debidamente diligenciado. Todo lo anterior se realizó con el fin de proporcionar al laboratorio el material en condiciones óptimas para su análisis y entrega efectiva de resultados para los siguientes parámetros: capacidad de intercambio catiónico, cationes solubles (Ca, Mg, K y Na) y azufre soluble, nitrógeno total, densidad aparente, textura, conductividad hidráulica, humedad a diferentes tensiones (Capacidad de campo y Punto de marchitez permanente), pH, conductividad eléctrica, acidez, carbono orgánico, materia orgánica, bases intercambiables en el suelo (Ca, Mg, K y Na), CICE, fósforo disponible, aniones solubles, sulfatos, nitratos, carbonatos, bicarbonato, amonio, nitrato (N-NH₄) y nitrito (N-NO₂).

Por último, cabe resaltar que las muestras fueron tomadas en sitios alejados de parches con escombros, sitios cercanos a canales de riego o de drenajes o parches aislados no representativos del lote. Los puntos de muestreo fueron georeferenciados y ubicados espacialmente, con el fin de tener trazabilidad de los resultados en muestreos futuros. Del mismo modo, permite establecer dinámicas de muestreo y contrastar los resultados obtenidos con las condiciones encontradas en los diferentes predios.

4.5.2 Muestreo de aguas subterráneas

El monitoreo de la calidad del agua subterránea en sitios priorizados se realizó con laboratorio acreditado, tanto para la toma de muestras, como para los análisis químicos, con la supervisión y verificación de la Universidad y la CVC. La metodología de muestreo establecida por el laboratorio incluyó la elaboración de un plan de muestreo en pozos priorizados y el tipo y cantidad de muestra a tomar. En este sentido, se obtuvo una muestra compuesta en cada uno de los pozos priorizados por la CVC, pertenecientes a la red de monitoreo de aguas subterráneas de la Corporación.

Por definición, se entiende que una muestra compuesta (integrada) se obtiene al mezclar varias muestras puntuales de una misma fuente. Estas a su vez estas pueden tener volúmenes iguales o proporcionales al caudal de muestreo y pueden ser tomadas a intervalos programados y por períodos determinados. Por otro lado, durante la elaboración del plan de muestreo se incluyeron todos los materiales y elementos necesarios requeridos para la actividad de muestreo. Entre estos se encuentran: envases, equipos para el muestreo, reactivos de preservación de muestras, neveras para el almacenamiento y transporte de muestras.

Con el plan de monitoreo elaborado, se realizó la actividad de toma de muestras. Una vez en campo, se ubicó el punto a muestrear, se delimitó y señaló de forma adecuada buscando minimizar riesgos. Posterior a esto, se procedió a realizar una limpieza del agua anómala o estancada que se acumula en los pozos no bombeados. Dicha limpieza se realizó desde el nivel del agua hasta la base del pozo, eliminando más del doble del volumen de este con el fin de garantizar un muestreo efectivo y con pocos errores. Así mismo, se debe controlar la estabilidad de parámetros como conductividad eléctrica, temperatura, pH, oxígeno disuelto y porcentaje de salinidad. Las muestras se tomaron tan cerca como sea posible de la descarga de la bomba, procurando que la tubería intervenga

mínimamente. Se utilizaron recipientes de polietileno y/o vidrio con tapa hermética para el almacenamiento y transporte de las muestras.

De forma similar, estos contenedores se enjuagaron con una porción de muestra con el fin de evitar datos erróneos o contaminación cruzada y se llenaron hasta el borde. El tiempo requerido para la toma de muestras se relacionó con el caudal y las condiciones del punto de muestreo. Una vez finalizado dicho tiempo, se procedió al mezclado de las submuestras buscando obtener una muestra compuesta para su análisis. Esta a su vez fue debidamente rotulada según lo establecido por el laboratorio encargado de la evaluación.

Finalmente, el transporte de las muestras al laboratorio se realizó en una nevera bajo condiciones de refrigeración de 4 °C., con el fin de tener un material en condiciones óptimas para el análisis de los siguientes parámetros: aluminio total, bicarbonatos, calcio total, carbonatos, carbono orgánico total, cloruros, conductividad eléctrica, fenoles, hierro total, hierro soluble, magnesio total, manganeso disuelto, nitratos, nitritos, nitrógeno amoniacal, ortofosfatos, pH, potasio total, sodio y sulfatos.

4.5.3 Rutas de muestreo de suelos y aguas subterráneas

Las jornadas de muestreo de suelos y aguas se planearon a partir de recorridos de reconocimiento de los predios a muestrear. Con el fin de optimizar los tiempos de trabajo y la gestión necesaria para la logística de las campañas de monitoreo, se incluyeron parcelas que contaran con tres etapas de cultivo: i) cultivo joven (germinación, macollamiento) menor a 3 meses, ii) rápido crecimiento entre 4 – 6 meses y, iii) cultivo avanzado (maduración) mayor a 7 meses. Para determinar la etapa del cultivo se empleó, principalmente, manifestaciones externas del mismo como la altura del cultivo, la cantidad y color de las hojas, la textura de los tallos.

Para el diseño de las rutas de muestreo de suelos y aguas subterráneas se tuvieron en cuenta las características de los cultivos de caña de azúcar en los predios, por ejemplo, para los predios del Ingenio Manuelita; Hacienda Real, Hacienda Soledad y la Hacienda Santa Anita, se analizaron las siguientes características en las parcelas: i) Hacienda Santa Anita, No. De suerte: 30, Altura del cultivo: < 50 cm, Color de las hojas: verde intenso, ii) Hacienda Soledad, No. De suerte: 128, Altura del cultivo: 0.8 – 1.2 m, color de las hojas: verde intenso y, iii) Hacienda Real, No. De suerte: 20, Altura del cultivo: > 2 m, Color de las hojas: transición entre verde – amarillo pálido, por lo cual los cultivos asociados fueron clasificados como joven (< 3 meses), rápido crecimiento (4 – 6 meses) y avanzado (> 7 meses), respectivamente.

Para la duración de los muestreos en sitios priorizados, se estimó un tiempo de 30, 45 y 75 minutos para las Haciendas Santa Anita, Soledad y Real, respectivamente. De esta forma se logró relacionar la etapa del cultivo con el tiempo de duración del monitoreo de suelos. Adicionalmente, se agregó como parámetro variable el tiempo de desplazamiento entre puntos, para lo cual se empleó un valor promedio de 30 minutos. Es así como se obtuvo un tiempo total por punto de monitoreo de 60 – 105 minutos. Para efectos del diseño del cronograma de trabajo, se tomó como base de cálculo y/o punto crítico el valor asociado a 105 minutos. Con base a esta información de campo, se estableció un cronograma de muestreo de suelos con un mínimo de tres puntos por día (5 horas/día). Cabe resaltar que en el diseño del cronograma no se tienen en cuenta condiciones adversas como los

permisos requeridos para el acceso a los predios, cerramiento o barreras físicas presentes en las parcelas.

Para definir las rutas de acceso a los puntos de monitoreo fue necesario utilizar Google Earth como herramienta guía. Esta aplicación permitió no solamente espacializar los sitios priorizados, sino también, trazar rutas que permitieran gestionar de forma eficiente el tiempo y los recursos empleados durante la actividad de muestreo de suelos. En las Figuras 13 a 18 se muestran las rutas empleadas para acceder a los puntos de monitoreo establecidos por CVC en cada uno de los 42 sitios priorizados.

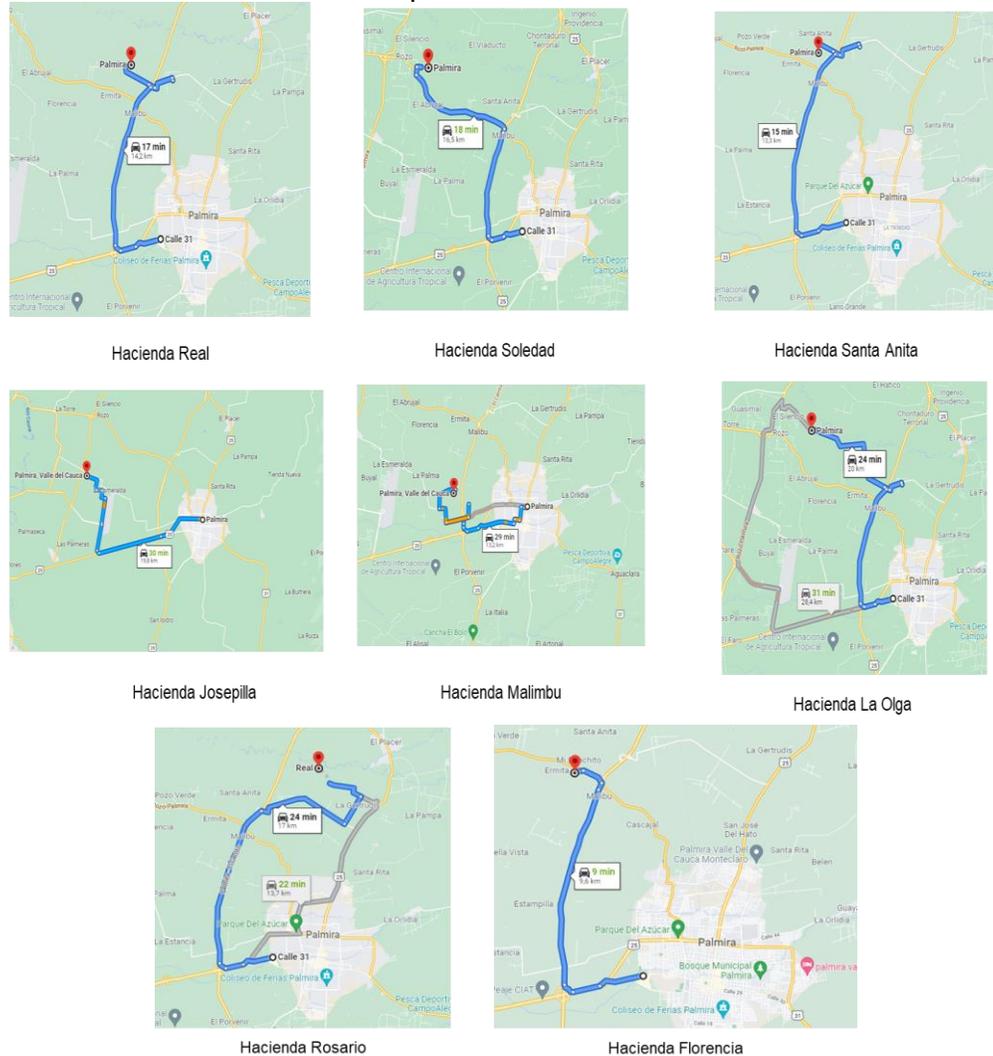
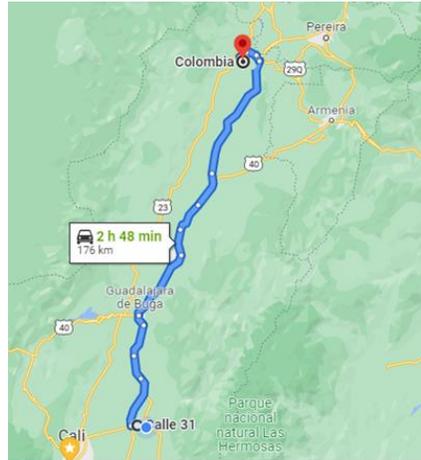
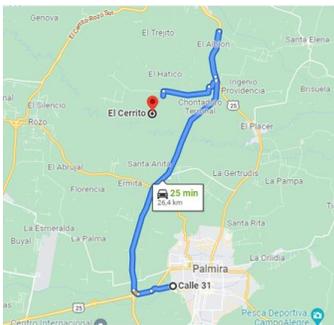


Figura 13. Ruta de acceso a los sitios de muestreo asociados al Ingenio Manuelita.

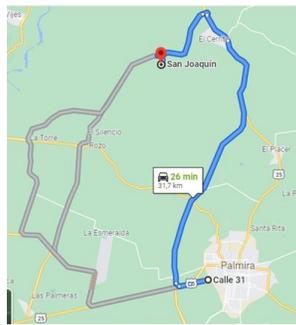


Hacienda Cabuyas

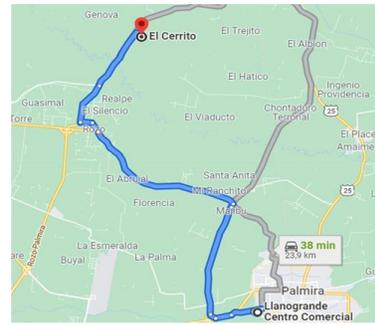
Figura 14. Ruta de acceso a los sitios de muestreo asociados al Ingenio Risaralda.



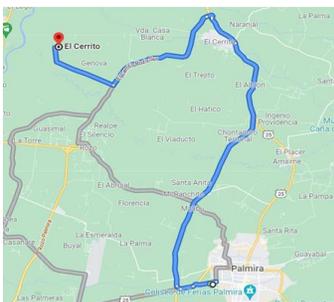
Hacienda Alizal



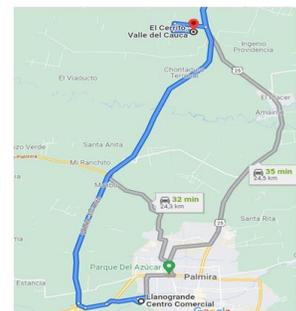
Hacienda La Ceiba



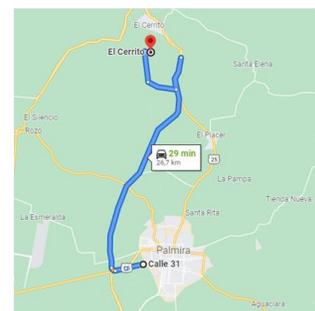
Hacienda Unión Molina



Hacienda Marsella



Hacienda Santa Lucia



Hacienda La Aurora

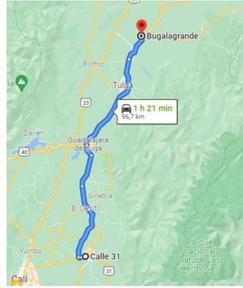
Figura 15. Ruta de acceso a los sitios de muestreo asociados al Ingenio Providencia.



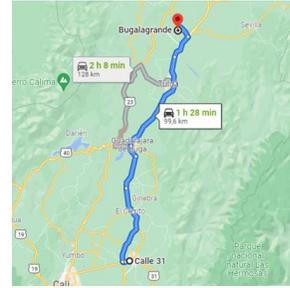
Figura 16. Ruta de acceso a los sitios de muestreo asociados al Ingenio Mayagüez.



Hacienda Cecilia



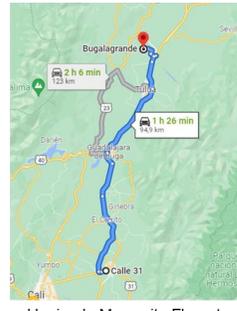
Hacienda Gertrudis



Hacienda Samaria

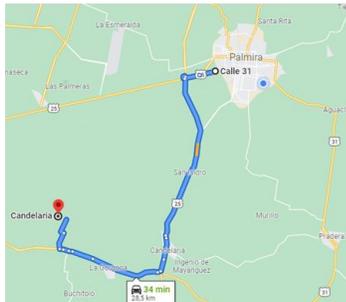


Hacienda El Golfo

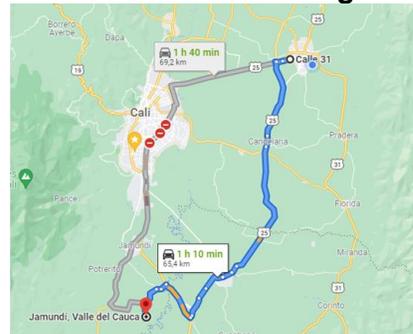


Hacienda Margarita Floresta

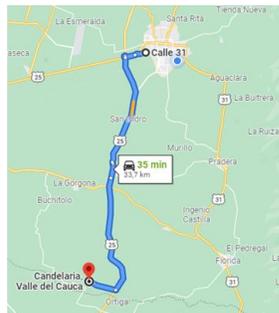
Figura 17. Ruta de acceso a los sitios de muestreo asociados al Ingenio Rio Paila.



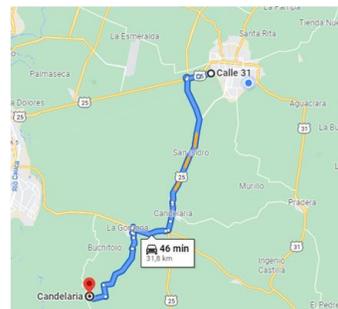
Hacienda Las Palmas



Hacienda Egipto



Hacienda Florencia



Hacienda Aranjuez

Figura 18. Ruta de acceso a los sitios de muestreo asociados al Ingenio Incauca.

5. CAMPAÑAS DE MUESTREO DE SUELOS Y AGUA SUBTERRÁNEA

5.1. CAMPAÑAS DE MUESTREO DE SUELOS

Se realizó el muestreo de suelo en cuarenta y dos (42) puntos priorizados por la autoridad ambiental. Los muestreos, para la primera vigencia, se realizaron en los meses de noviembre, diciembre de 2021 y enero de 2022, mientras los monitoreos asociados a la segunda vigencia fueron efectuados entre los meses de junio y agosto del 2022. Cabe mencionar que esta actividad fue realizada atendiendo las pautas y recomendaciones establecidas por la metodología para el muestreo de suelos reportada en el numeral 4.5.1. Monitoreo de suelos.



Fotografía 7. Toma de muestras en diferentes cultivos de caña de azúcar.

Durante el monitoreo de suelos se llevaron a cabo cuatro procesos principales (Figura 19): 1) Reconocimiento del terreno, donde se identificó la accesibilidad al predio (acceso fácil, si las vías se encuentran en buenas condiciones y no se presenta restricción alguna para ingresar al predio (barreras físicas); acceso moderado, si las vías se encuentran en condiciones no tan buenas o si se presenta alguna restricción para ingresar al predio; y acceso difícil, si las vías se encuentran en mal estado y se evidencia alguna barrera física que impida el libre acceso al predio), la edad del cultivo teniendo en cuenta los parámetros reportados en el numeral 4.5. Diseño de campañas de muestreo de suelo y agua subterránea, y los riesgos asociados al ingreso en el cultivo, 2) Determinación y ubicación

de sitios de muestreo, siendo este un ejercicio previo realizado con apoyo de Google Earth y validado en campo con base a las condiciones de accesibilidad del cultivo, 3) Toma de muestras de suelo, teniendo en cuenta lo descrito en el numeral 4.5.1. Monitoreo de suelos obteniéndose tanto muestras disturbadas como no disturbadas, con el fin de entregar el material necesario para la caracterización química y física del terreno evaluado (cantidad de muestra entregada: 1.5 kg aproximadamente) y, 4) Adecuación y rotulado de muestras, utilizando los formatos entregados por el laboratorio encargado del análisis (Agrosavia y CIAT) y siguiendo las recomendaciones de presentación, empaque, embalaje e identificación de las muestras.



Figura 19. Proceso de muestreo de suelo en puntos priorizados.

Entre las condiciones de muestreo se puede resaltar:

- La actividad se realizó: i) para la primera vigencia (2021), en época de transición lluvia – sequía (clima templado), presentándose un suelo con alta humedad y una precipitación promedio mensual entre 100 – 200 mm, mientras ii) la segunda vigencia (2022), en época de transición sequía - lluvia (clima templado), presentándose un suelo con humedad media y una precipitación promedio mensual entre 50 – 100 mm
- La toma de muestras de suelos se realizó a una profundidad de 0 – 20 cm
- Las etapas del cultivo de caña de azúcar en los puntos de monitoreo fueron diferentes siendo estas i) durante la primera vigencia < 3 meses para 7 haciendas, 4 – 6 meses (etapa de rápido crecimiento) para 4 haciendas, y > 7 meses (etapa de maduración) para 31 haciendas, por su parte ii) durante la segunda vigencia se presentaron 16 haciendas con cultivos en una edad < 3 meses, 16 haciendas con cultivos entre 4 – 6 meses y 10 haciendas con cultivos en una etapa de desarrollo superior a los 7 meses.
- El tipo de riego predominante en los predios evaluados es el riego por gravedad (76.19%).

En las Tabla 14 y 15 se presentan las fechas de monitoreo de suelos para los puntos priorizados durante las dos vigencias (2021 y 2022). Se destaca que el número de puntos de monitoreo realizados por día varió según las condiciones climáticas presentes en el momento de la actividad y el estado del cultivo.

Tabla 14. Cronograma de muestreo de suelos en puntos priorizados, Vigencia 2021

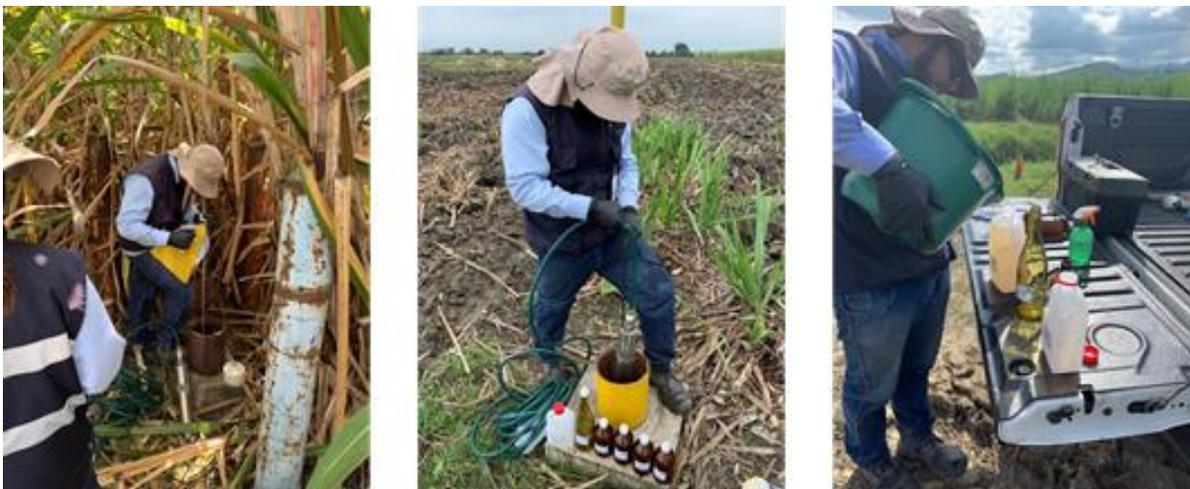
No.	Cód. de pozo	Municipio	Nombre de Hacienda	Suerte	Fecha muestreo
1	vp-pm-39	PALMIRA	REAL	20	15/10/2021
2	vp-pm-39	PALMIRA	REAL	20	15/10/2021
3	vp-pm-76	PALMIRA	LA OLGA	128	05/11/2021
4	vp-pm-13	PALMIRA	SANTA ANITA	30	05/11/2021
5	vp-pm-35	PALMIRA	SOLEDAD	128	01/12/2021
6	vp-pm-14	PALMIRA	FLORENCIA-14	201	05/11/2021
7	vce-pm-11	EL CERRITO	AURORA	120	25/11/2021
8	vce-pm-22	EL CERRITO	ALIZAL-22	208	01/12/2021
9	vce-pm-23	EL CERRITO	ALIZAL-23	208	01/12/2021
10	vce-pm-10	EL CERRITO	LA CEIBA	1	01/12/2021
11	vce-pm-08	EL CERRITO	LA UNION MOLINA	2	02/12/2021
12	vce-pm-09	EL CERRITO	MARSELLA	604	02/12/2021
13	vce-pm-30	EL CERRITO	SANTA LUCIA-30	14	25/11/2021
14	vce-pm-19	EL CERRITO	SANTA LUCIA-19	6	25/11/2021
15	vce-pm-25	EL CERRITO	EL PORVENIR	508	09/12/2021
16	vcn-pm-16	CANDELARIA	LA BARBARITA	1-a	02/12/2021
17	vcn-pm-15	CANDELARIA	LA UNION	22	06/12/2021
18	vcn-pm-27	CANDELARIA	LA ZAINERA-27	80-b	06/12/2021
19	vcn-pm-29	CANDELARIA	LA ZAINERA-29	80-e	06/12/2021
20	vcn-pm-17	CANDELARIA	CASA DE TEJA	9	07/12/2021
21	vcn-pm-19	CANDELARIA	ARENAL	2	07/12/2021
22	vcn-pm-30	CANDELARIA	LA ESMERALDA-30	12	07/12/2021
23	vcn-pm-33	CANDELARIA	LA ESMERALDA-33	9	07/12/2021
24	vcr-pm-31	CARTAGO	CABUYAS-31	52	10/12/2021
25	vcr-pm-30	CARTAGO	CABUYAS-30	53	10/12/2021
26	vp-pm-28	PALMIRA	ROSARIO-28	92	15/12/2021
27	vp-pm-27	PALMIRA	ROSARIO-27	149-B	15/12/2021
28	vbg-pm-05	BUGALAGRANDE	CECILIA	1686-010	09/12/2021
29	vbg-pm-06	BUGALAGRANDE	MARGARITA FLORESTA	1342-070	09/12/2021
30	vbg-pm-07	BUGALAGRANDE	GERTRUDIS	3102-020	16/12/2021
31	vbg-pm-09	BUGALAGRANDE	EL GOLFO-09	1664-240	16/12/2021
32	vbg-pm-10	BUGALAGRANDE	ELGOLFO-10	1664-240	16/12/2021
33	vbg-pm-08	BUGALAGRANDE	SAMARIA	1473-010	16/12/2021
34	vj-pm-09	JAMUNDÍ	EGIPTO-09	028-B	17/12/2021
35	vj-pm-11	JAMUNDÍ	EGIPTO-11	029-B	17/12/2021
36	vcn-pm-63	CANDELARIA	LAS PALMAS	15	17/12/2021
37	vcn-pm-65	CANDELARIA	FLORENCIA-65	54	21/12/2021
38	vcn-pm-64	CANDELARIA	ARANJUEZ	023-T	21/12/2021
39	vp-pm-46	PALMIRA	LA OLGA-46	133	05/11/2021
40	vp-pm-33	PALMIRA	JOSEPILLA	9	14/01/2022
41	vp-pm-32	PALMIRA	MALIMBU	433	14/01/2022
42	vcn-pm-18	CANDELARIA	COFRE	6-B	14/01/2022

Tabla 15. Cronograma de muestreo de suelos en puntos priorizados – Vigencia 2022

No.	Cód. de pozo	Municipio	Nombre de Hacienda	Suerte	Fecha muestreo
1	vp-pm-39	PALMIRA	REAL	20	15/07/2022
2	vp-pm-31	PALMIRA	REAL	20	15/07/2022
3	vp-pm-76	PALMIRA	LA OLGA	128	15/07/2022
4	vp-pm-13	PALMIRA	SANTA ANITA	30	15/07/2022
5	vp-pm-35	PALMIRA	SOLEDAD	128	15/07/2022
6	vp-pm-14	PALMIRA	FLORENCIA-14	201	15/07/2022
7	vce-pm-11	EL CERRITO	AURORA	120	02/08/2022
8	vce-pm-22	EL CERRITO	ALIZAL-22	208	02/08/2022
9	vce-pm-23	EL CERRITO	ALIZAL-23	208	02/08/2022
10	vce-pm-10	EL CERRITO	LA CEIBA	1	02/08/2022
11	vce-pm-08	EL CERRITO	LA UNION MOLINA	2	02/08/2022
12	vce-pm-09	EL CERRITO	MARSELLA	604	02/08/2022
13	vce-pm-30	EL CERRITO	SANTA LUCIA-30	14	02/08/2022
14	vce-pm-19	EL CERRITO	SANTA LUCIA-19	6	02/08/2022
15	vce-pm-28	EL CERRITO	SANTA LUCIA-28		02/08/2022
16	vcn-pm-16	CANDELARIA	LA BARBARITA	1-a	22/07/2022
17	vcn-pm-15	CANDELARIA	LA UNIÓN	22	22/07/2022
18	vcn-pm-27	CANDELARIA	LA ZAINERA-27	80-b	22/07/2022
19	vcn-pm-29	CANDELARIA	LA ZAINERA-29	80-e	22/07/2022
20	vcn-pm-17	CANDELARIA	CASA DE TEJA	9	22/07/2022
21	vcn-pm-19	CANDELARIA	ARENAL	2	22/07/2022
22	vcn-pm-30	CANDELARIA	LA ESMERALDA-30	12	22/07/2022
23	vcn-pm-33	CANDELARIA	LA ESMERALDA-33	9	22/07/2022
24	vp-pm-28	PALMIRA	ROSARIO-28	92	15/07/2022
25	vp-pm-27	PALMIRA	ROSARIO-27	149-B	15/07/2022
26	vbg-pm-05	BUGALAGRANDE	CECILIA	1686-010	28/07/2022
27	vbg-pm-06	BUGALAGRANDE	MARGARITA FLORESTA	1342-070	28/07/2022
28	vbg-pm-07	BUGALAGRANDE	GERTRUDIS	3102-020	28/07/2022
29	vbg-pm-09	BUGALAGRANDE	EL GOLFO-09	1664-240	28/07/2022
30	vbg-pm-10	BUGALAGRANDE	EL GOLFO-10	1664-240	28/07/2022
31	vbg-pm-08	BUGALAGRANDE	SAMARIA	1473-010	28/07/2022
32	vj-pm-09	JAMUNDÍ	EGIPTO-09	028-B	27/07/2022
33	vj-pm-11	JAMUNDÍ	EGIPTO-11	029-B	27/07/2022
34	vcn-pm-63	CANDELARIA	LAS PALMAS	15	04/08/2022
35	vcn-pm-65	CANDELARIA	FLORENCIA-65	54	27/07/2022
36	vcn-pm-64	CANDELARIA	ARANJUEZ	023-T	27/07/2022
37	vp-pm-46	PALMIRA	LA OLGA-46	133	15/07/2022
38	vp-pm-33	PALMIRA	JOSEPILLA	9	15/07/2022
39	vp-pm-32	PALMIRA	MALIMBU	433	15/07/2022
40	vcn-pm-18	CANDELARIA	COFRE	6-B	22/07/2022
41	vcr-pm-30	CARTAGO	CABUYAS	53	22/08/2022
42	vcr-pm-31	CARTAGO	CABUYAS	52	22/08/2022

5.2. CAMPAÑA DE MUESTREO DE AGUA SUBTERRÁNEA

Se realizó el muestreo de aguas subterráneas en cuarenta y dos (42) pozos priorizados por la autoridad ambiental, para la primera vigencia entre los meses de diciembre del 2021 y enero del 2022, mientras los monitoreos asociados a la segunda vigencia fueron efectuados entre los meses de julio y agosto del 2022. La actividad de muestreo estuvo a cargo del laboratorio Chemilab, utilizando las pautas y recomendaciones descritas en el numeral 4.5.2. Monitoreo de agua subterránea.



Fotografía 8. Toma de muestra de agua en campo.

Durante el monitoreo de pozos, se adelantaron cinco procesos (Figura 20): 1) identificación del pozo, lo cual permitió valorar la posibilidad de acceder con los equipos mecánicos de bombeo (bomba sumergible) según las condiciones del terreno, 2) elección del instrumento de muestreo, siendo el diámetro del tubo del pozo el factor determinante al momento de elegir entre bomba sumergible o bailer para un tubo con diámetro mayor o menor a tres 3 pulgadas, respectivamente, 3) medida de parámetros *in-situ* (profundidad del pozo, nivel estático, pH, conductividad eléctrica, temperatura), para lo cual el pH y la conductividad eléctrica son considerados como parámetros de referencia para definir la estabilidad de las propiedades del agua evaluada para su posterior recolección, 4) toma de muestra de agua, teniendo en cuenta el procedimiento reportado en el numeral 4.5.2. Monitoreo de agua subterránea, y 5) rotulado y cadena de custodia, utilizando los formatos, los recipientes y las cantidades de muestra requeridos por el laboratorio (parámetros de rutina, metales: recipiente plástico de galón; metales: recipiente plástico x 1 galón preservado con HNO_3 metales disueltos, nitrógeno total, fosfatos: envase de vidrio ámbar x 500 ml; nitrógeno total, carbono orgánico total: envase de vidrio ámbar x 500 ml preservado con H_2SO_4 ; fenoles, DQO, nitritos, nitratos, fósforo: envase de vidrio ámbar x 1 Lt preservado con H_2SO_4).

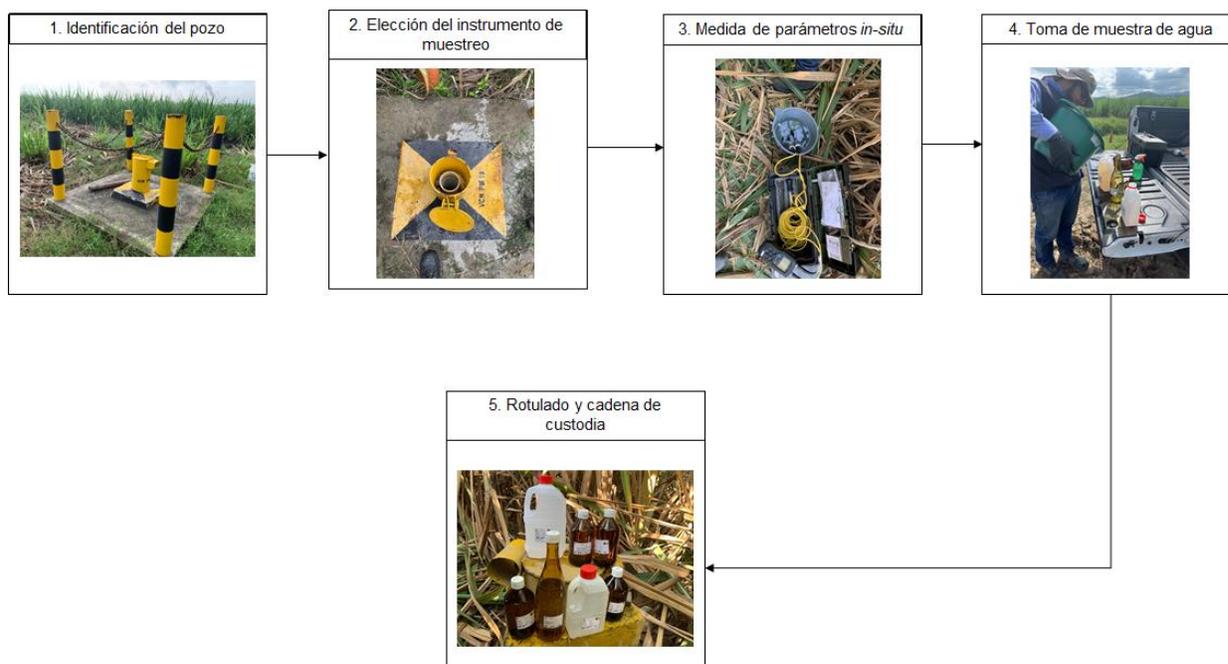


Figura 20. Proceso de muestreo de agua en puntos priorizados.

En las Tabla 16 y 17 se presentan las fechas de monitoreo de pozos para los sitios priorizados. Cabe mencionar que el número de sitios de monitoreo realizados por día varió de acuerdo con los desplazamientos requeridos, las condiciones del terreno y de los pozos.

Tabla 16. Cronograma de muestreo de agua subterránea en puntos priorizados – Vigencia 2021

No.	Cód. de pozo	Municipio	Nombre de Hacienda	Fecha de muestreo
1	vp-pm-39	PALMIRA	REAL	30/12/2021
2	vp-pm-31	PALMIRA	REAL	30/12/2021
3	vp-pm-33	PALMIRA	JOSEPILLA	30/12/2021
4	vp-pm-32	PALMIRA	MALIMBU	30/12/2021
5	vce-pm-30	EL CERRITO	SANTA LUCIA	30/12/2021
6	vce-pm-19	EL CERRITO	SANTA LUCIA	30/12/2021
7	vj-pm-09	JAMUNDÍ	EGIPTO	30/12/2021
8	vj-pm-11	JAMUNDÍ	EGIPTO	30/12/2021
9	vbg-pm-05	BUGALAGRANDE	CECILIA	04/01/2022
10	vbg-pm-07	BUGALAGRANDE	GERTRUDIS	04/01/2022
11	vbg-pm-09	BUGALAGRANDE	EL GOLFO	04/01/2022
12	vbg-pm-10	BUGALAGRANDE	EL GOLFO	04/01/2022
13	vbg-pm-08	BUGALAGRANDE	SAMARIA MARGARITA	04/01/2022
14	vbg-pm-06	BUGALAGRANDE	FLORESTA	05/01/2022
15	vcr-pm-31	CARTAGO	CABUYAS	05/01/2022
16	vcr-pm-30	CARTAGO	CABUYAS	05/01/2022

No.	Cód. de pozo	Municipio	Nombre de Hacienda	Fecha de muestreo
17	vcn-pm-16	CANDELARIA	LA BARBARITA	06/01/2022
18	vcn-pm-19	CANDELARIA	ARENAL	06/01/2022
19	vcn-pm-17	CANDELARIA	CASA DE TEJA	06/01/2022
20	vcn-pm-18	CANDELARIA	COFRE	06/01/2022
21	vcn-pm-65	CANDELARIA	FLORENCIA	06/01/2022
22	vcn-pm-64	CANDELARIA	ARANJUEZ	06/01/2022
23	vcn-pm-15	CANDELARIA	LA UNIÓN	07/01/2022
24	vcn-pm-27	CANDELARIA	LA ZAINERA	07/01/2022
25	vcn-pm-29	CANDELARIA	LA ZAINERA	07/01/2022
26	vcn-pm-30	CANDELARIA	LA ESMERALDA	07/01/2022
27	vcn-pm-33	CANDELARIA	LA ESMERALDA	07/01/2022
28	vcn-pm-63	CANDELARIA	LAS PALMAS	07/01/2022
29	vce-pm-11	EL CERRITO	AURORA	19/01/2022
30	vce-pm-22	EL CERRITO	ALIZAL	19/01/2022
31	vce-pm-23	EL CERRITO	ALIZAL	19/01/2022
32	vce-pm-10	EL CERRITO	LA CEIBA	19/01/2022
33	vce-pm-08	EL CERRITO	LA UNION MOLINA	19/01/2022
34	vce-pm-09	EL CERRITO	MARSELLA	19/01/2022
35	vp-pm-76	PALMIRA	LA OLGA	20/01/2022
36	vp-pm-13	PALMIRA	SANTA ANITA	20/01/2022
37	vp-pm-35	PALMIRA	SOLEDAD	20/01/2022
38	vp-pm-14	PALMIRA	FLORENCIA	20/01/2022
39	vce-pm-25	EL CERRITO	EL PORVENIR	20/01/2022
40	vp-pm-28	PALMIRA	ROSARIO	20/01/2022
41	vp-pm-27	PALMIRA	ROSARIO	20/01/2022
42	vp-pm-46	PALMIRA	LA OLGA	20/01/2022

Tabla 17. Cronograma de muestreo de agua subterránea en puntos priorizados – Vigencia 2022

No.	Cód. de pozo	Municipio	Nombre de Hacienda	Fecha de muestreo
1	vp-pm-39	PALMIRA	REAL	29/07/2022
2	vp-pm-31	PALMIRA	REAL	29/07/2022
3	vp-pm-33	PALMIRA	JOSEPILLA	29/07/2022
4	vp-pm-32	PALMIRA	MALIMBU	29/07/2022
5	vce-pm-30	EL CERRITO	SANTA LUCIA	02/08/2022
6	vce-pm-19	EL CERRITO	SANTA LUCIA	02/08/2022
7	vj-pm-09	JAMUNDÍ	EGIPTO	01/08/2022
8	vj-pm-11	JAMUNDÍ	EGIPTO	01/08/2022
9	vbg-pm-05	BUGALAGRANDE	CECILIA	28/07/2022
10	vbg-pm-07	BUGALAGRANDE	GERTRUDIS	28/07/2022
11	vbg-pm-09	BUGALAGRANDE	EL GOLFO	28/07/2022
12	vbg-pm-10	BUGALAGRANDE	EL GOLFO	28/07/2022
13	vbg-pm-08	BUGALAGRANDE	SAMARIA	28/07/2022
14	vbg-pm-06	BUGALAGRANDE	MARGARITA FLORESTA	28/07/2022
15	vcr-pm-30	CARTAGO	CABUYAS	28/07/2022
16	vcn-pm-16	CANDELARIA	LA BARBARITA	01/08/2022
17	vcn-pm-19	CANDELARIA	ARENAL	01/08/2022
18	vcn-pm-17	CANDELARIA	CASA DE TEJA	01/08/2022
19	vcn-pm-18	CANDELARIA	COFRE	01/08/2022
20	vcn-pm-65	CANDELARIA	FLORENCIA	01/08/2022
21	vcn-pm-64	CANDELARIA	ARANJUEZ	01/08/2022
22	vcn-pm-15	CANDELARIA	LA UNIÓN	01/08/2022
23	vcn-pm-27	CANDELARIA	LA ZAINERA	01/08/2022
24	vcn-pm-29	CANDELARIA	LA ZAINERA	01/08/2022
25	vcn-pm-30	CANDELARIA	LA ESMERALDA	01/08/2022
26	vcn-pm-33	CANDELARIA	LA ESMERALDA	01/08/2022
27	vcn-pm-63	CANDELARIA	LAS PALMAS	07/01/2022
28	vce-pm-11	EL CERRITO	AURORA	02/08/2022
29	vce-pm-22	EL CERRITO	ALIZAL	02/08/2022
30	vce-pm-23	EL CERRITO	ALIZAL	02/08/2022
31	vce-pm-10	EL CERRITO	LA CEIBA	02/08/2022
32	vce-pm-08	EL CERRITO	LA UNION MOLINA	02/08/2022
33	vce-pm-09	EL CERRITO	MARSELLA	02/08/2022
34	vp-pm-76	PALMIRA	LA OLGA	29/07/2022
35	vp-pm-13	PALMIRA	SANTA ANITA	29/07/2022
36	vp-pm-35	PALMIRA	SOLEDAD	29/07/2022
37	vp-pm-14	PALMIRA	FLORENCIA	29/07/2022
38	vce-pm-28	EL CERRITO	SANTA LUCIA	29/07/2022
39	vp-pm-28	PALMIRA	ROSARIO	29/07/2022
40	vp-pm-27	PALMIRA	ROSARIO	29/07/2022
41	vp-pm-46	PALMIRA	LA OLGA	29/07/2022
42	vcr-pm-31	CARTAGO	CABUYAS	22/08/2022

6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

6.1. ANÁLISIS DE LAS PROPIEDADES DE SUELOS EN CULTIVOS DE CAÑA DE AZÚCAR

Para la evaluación del impacto de las prácticas agronómicas en las propiedades del suelo en cultivos de caña de azúcar, se agruparon los resultados por zona de influencia o actividad para cada uno de los seis (6) ingenios azucareros. El análisis incluye la determinación de las siguientes variables: pH, conductividad eléctrica, capacidad de intercambio catiónico, fósforo, potasio, materia orgánica, calcio, magnesio, sodio, carbono orgánico, nitrógeno total, densidad aparente, conductividad hidráulica (Tabla 18, 19, 21, 22, 24, 26, 28, 29, 31, 32).

El análisis se orientó a ensayos estadísticos de normalidad y estadística descriptiva. Para el análisis de normalidad se empleó la prueba de Shapiro Wilk, en la cual se planteó como hipótesis nula que la muestra o el conjunto de datos provenía de una distribución normal, teniendo como factor de significancia 0.05 ($p > 0.05$). Los resultados permiten establecer que algunos parámetros no presentaron una distribución normal ($p < 0.05$) en los municipios evaluados, específicamente: i) en Bugalagrande, el P, Na, DA y la CH, ii) en Candelaria, P, CE, CH y K, iii) en Cartago, RH al 0.3%, pH, Ca y CIC, iv) en Cerrito, pH, CIC, K, Ca, Mg, el NT, RH al 0.3% y CH, v) en Jamundí, CE, Ca, NT, DA y RH al 15% en Jamundí, y vi) en Palmira, RH al 15%, pH, CE, CIC, K, P y Na. En general para este conjunto de parámetros, en estos municipios, no sería posible calcular la probabilidad que mediciones futuras se encuentren dentro ciertos intervalos o rangos de datos. El resto de los parámetros presentaron una distribución normal en cada uno de los municipios.

En las Tablas 20, 23, 25, 27, 30 y 33 se presenta la estadística descriptiva de los resultados asociados a parámetros fisicoquímicos de suelos en cultivos de caña de azúcar priorizados por la CVC. Se presenta el resumen del conjunto de los datos en un valor que los represente, así como el comportamiento y dispersión de estos.

6.1.1. Resultados propiedades suelos en sitios priorizados del Ingenio Rio Paila

Las tablas 18 y 19 presentan los resultados para las vigencias 2021 y 2022, de las propiedades de suelos cultivados con caña de azúcar en sitios priorizados del Ingenio Rio Paila. La Tabla 20 incluye la estadística descriptiva para los sitios evaluados.

Tabla 18. Resultados de las propiedades físico-químicas de suelos en puntos priorizados para el ingenio Rio Paila.

Parámetro	Cecilia		Margarita Floresta		Gertrudis	
	vbg-pm-05		vbg-pm-06		vbg-pm-07	
	2021	2022	2021	2022	2021	2022
pH	7.66	7.59	7.36	7.84	6.97	7.07
CE [dS/m]	0.45	0.793	0.21	0.127	0.17	0.117
MO [gr/100 gr]	2.52	2.84	2.97	2.69	2.17	3.29
Ca [meq/100 gr]	18.74	14.47	19.23	13.75	17.25	15.14
Mg [meq/100 gr]	17.53	11.49	16.21	11.23	12.29	9.81
K [meq/100 gr]	0.54	0.64	0.45	0.38	0.58	0.46
Na [meq/100 gr]	0.24	0.34	0.18	0.51	0.21	0.49
CICE [cmol (+)/kg]	37.05	26.95	36.07	25.87	30.33	25.89
CO [gr/100 gr]	1.46	-	1.72	-	1.26	-
P [mg/kg]	73.06	11.28	15.68	10.09	13.63	5.18
CICA [cmol (+)/kg]	33.92	28.23	33.11	27.31	29.76	26.62
NT [mg/kg]	1000.1	1576.9	1254.6	1023.95	1051.2	279.24
PA [%]	53.6	32.2	35.07	30.8	43.47	41.1
PAr [%]	9.05	37.8	35.94	35.1	19.34	32.3
PL [%]	37.35	30	28.99	34.1	37.19	26.6
Clase textural	F-A	F.Ar	F.Ar	F.Ar	F	F.Ar
DA [g/cm ³]	1.00	1.33	1.46	1.37	1.03	1.38
RH 0.3 [%]	41.84	35.40	45.69	32.97	50.26	32.78
RH 15 [%]	35.77	16.37	41.89	15.18	44.62	15.44
CH [cm/h]	1.01	0.78	0.02	1.05	0.02	0.24
SO ₄ [mg/l]	51.12	3.08	31.77	0.91	23.83	3.28
CO ₃ [mg/l]	0	<2,5	0	<2,5	0	<2,5
NO ₃ [mg/l]	0.6	37.95	0	91.05	0	47.7
HCO ₃ [mg/l]	50	255.20	100	183.60	50	173.40
N-NH ₄ [mg/kg]	9.88	-	6.439	-	9.883	-
N-NO ₂ [mg/kg]	0.024	-	0.023	-	0.024	-

Donde, CE: conductividad eléctrica, CIC: capacidad de intercambio catiónico, P: fósforo, K: potasio, MO: materia orgánica, Ca: calcio, Mg: magnesio, Na: sodio, CO: carbono orgánico, NT: nitrógeno total. DA: densidad aparente, NT: nitrógeno total, CH: conductividad hidráulica, PA: porcentaje de arena, PAr: porcentaje arcilla, PL: porcentaje de limos, SO₄: sulfatos, NO₃: nitratos, CO₃: carbonatos, HCO₃: bicarbonatos, NH₄: amonio, NO₂: nitritos, RH: retención de humedad.

Tabla 19. Resultados de las propiedades físico-químicas de suelos en puntos priorizados para el ingenio Rio Paila.

Parámetro	Golfo-09			Golfo-10		Samaria	
	vbg-pm-09			vbg-pm-10		vbg-pm-08	
	2021	2022-I	2022	2021	2022	2021	2022
pH	7.92	7.89	8.38	8.09	8.32	7.95	8.14
CE [dS/m]	0.54	0.54	0.259	0.53	0.154	0.39	0.322
MO [gr/100 gr]	2.91	4.03	2.69	2.84	2.55	1.81	3.54
Ca [meq/100 gr]	20.44	3.44	16.66	21.5	16.19	16.07	16.51
Mg [meq/100 gr]	17.95	4	12.10	18.96	10.86	10.78	9.16
K [meq/100 gr]	0.48	0.22	0.40	0.42	0.38	0.25	0.35
Na [meq/100 gr]	1.3	4.58	0.66	1.22	0.61	0.39	0.66
CICE [cmol (+)/kg]	40.17	40.85	29.82	42.1	28.03	27.49	26.68
CO [gr/100 gr]	1.69	2.34	-	1.65	-	1.05	-
P [mg/kg]	19.45	22.64	19.12	19.41	16.84	9.44	12.81
CICA [cmol (+)/kg]	31.11	41.36	35.50	33.59	34.28	24.81	34.00
NT [mg/kg]	1192	1198	361.2	1120.2	404.6	874.1	1191.7
PA [%]	43.09	0.77	32.8	26.12	38.9	38.02	34.6
PAr [%]	21.55	63.84	34.1	42.54	35.7	27.28	30.6
PL [%]	35.36	35.39	33.1	31.34	25.4	34.7	34.8
Clase textural	F	Ar	F.Ar	Ar	F.Ar	F.Ar	F.Ar
DA [g/cm ³]	1.01	1.10	1.39	1.13	1.40	1.07	1.34
RH 0.3 [%]	42.93	45.60	31.45	52.76	33.44	51.43	32.18
RH 15 [%]	36.73	39.00	16.71	48.31	14.51	38.72	14.82
CH [cm/h]	0.50	1.71	0.72	0.07	0.18	0.12	1.03
SO ₄ [mg/l]	96.6	45.79	0.51	69.23	0.29	24.27	1.16
CO ₃ [mg/l]	0	0	<2,5	0	<2,5	0	<2,5
NO ₃ [mg/l]	0.017	0.196	31.95	0	49.8	0.626	170.4
HCO ₃ [mg/l]	150	155	204.00	150	244.80	175	214.20
N-NH ₄ [mg/kg]	5.401	5.229	-	13.08	-	5.983	-
N-NO ₂ [mg/kg]	0.025	0.049	-	0.022	-	0.021	-

Donde, CE: conductividad eléctrica, CIC: capacidad de intercambio catiónico, P: fósforo, K: potasio, MO: materia orgánica, Ca: calcio, Mg: magnesio, Na: sodio, CO: carbono orgánico, NT: nitrógeno total. DA: densidad aparente, NT: nitrógeno total, CH: conductividad hidráulica, PA: porcentaje de arena, PAr: porcentaje arcilla, PL: porcentaje de limos, SO₄: sulfatos, NO₃: nitratos, CO₃: carbonatos, HCO₃: bicarbonatos, NH₄: amonio, NO₂: nitritos, RH: retención de humedad.

Tabla 20. Estadística descriptiva de propiedades del suelo en cultivos de caña de azúcar, Ingenio Rio Paila.

Parámetro	Media	DE	Var	Min	Max
pH [Unidades]	7.78	0.44	0.18	6.97	8.38
CE [dS/m]	0.35	0.21	0.04	0.12	0.79
MO [%]	2.83	0.57	0.30	1.81	4.03
Ca [meq/100gr]	16.11	4.43	18.15	3.44	21.50
Mg [meq/100gr]	12.49	4.18	16.12	4.00	18.96
K [meq/100gr]	0.43	0.12	0.01	0.22	0.64
Na [meq/100gr]	0.88	1.17	1.26	0.18	4.58
P [mg/kg]	19.13	16.93	264.63	5.18	73.06
CIC [cmol (+)/kg]	31.82	4.46	18.36	24.81	41.36
NT [mg/kg]	963.68	388.25	139141.67	279.24	1576.90
DA [g/cm ³]	1.23	0.17	0.03	1.00	1.46
CH [cm/h]	0.57	0.53	0.26	0.02	1.71
SO ₄ [mg/L]	94.56	97.81	8831.49	23.83	315.08
HCO ₃ [mg/L]	161.94	64.59	3851.18	50.00	255.20

Donde, DE: desviación estándar, Var: varianza, CE: conductividad eléctrica, CIC: capacidad de intercambio catiónico, P: fósforo, K: potasio, MO: materia orgánica, Ca: calcio, Mg: magnesio, Na: sodio, NT: nitrógeno total. DA: densidad aparente, NT: nitrógeno total, CH: conductividad hidráulica, SO₄: sulfatos, HCO₃: bicarbonatos.

Teniendo en cuenta lo anterior, se destaca que parámetros como la varianza presenta una relación directa con la dispersión de los datos. Con base a los resultados obtenidos, en la Tabla 20 se observa la mayor y la menor variabilidad en los parámetros nitrógeno total y potasio, respectivamente. La variación en la presencia de nitrógeno total en el suelo se puede atribuir a diferentes factores tales como la aplicación, tipo y manejo del agua de riego, el uso de fertilizantes nitrogenados así como a la etapa de desarrollo del cultivo (Castellon *et al.*, 2014, Leghari *et al.*, 2016).

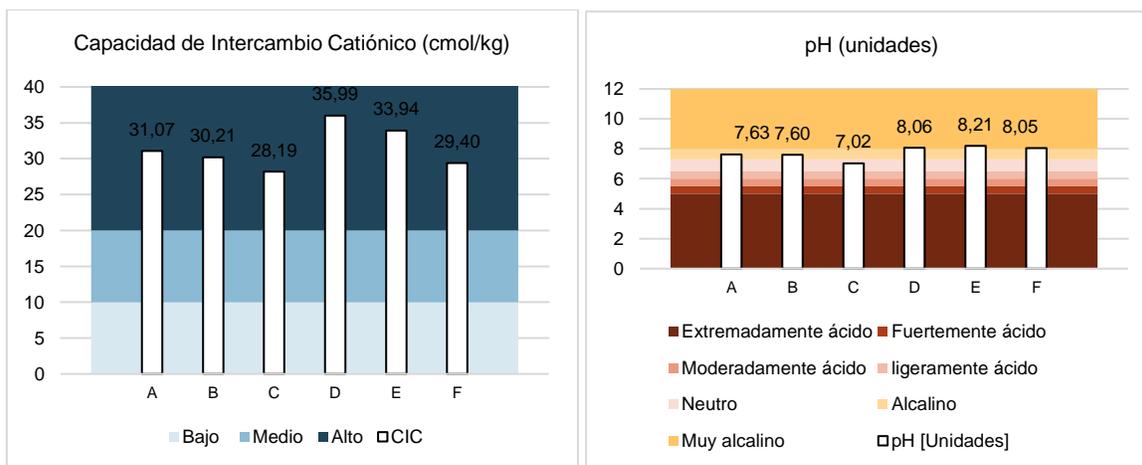
Así mismo, en los predios asociados al ingenio Rio Paila se presentó una mayor CIC si se compara con los demás puntos priorizados. Esta propiedad suministra una idea de la capacidad de retención de nutrientes y de la fertilidad del suelo. La dispersión de los resultados para la CIC se puede relacionar de forma directa con la presencia de iones cargados positivamente (Na⁺, K⁺, Ca²⁺). Cuantitativamente, la CIC se define como una medida de la carga superficial negativa del suelo, lo cual incide en la retención de iones cargados positivamente según el tipo de suelo (suelos ácidos, alcalinos o neutros) (Razzaghi *et al.*, 2021). Este comportamiento se ve reflejado en los resultados obtenidos para los puntos priorizados en estos suelos con cultivos de caña de azúcar, donde se reporta una mayor presencia de iones positivos como Na⁺, K⁺, Ca²⁺, en comparación con los otros predios analizados.

De igual forma, se observa que el conjunto de datos relacionados con la CIC presentó un valor promedio alto (31.82 cmol/kg) según los rangos establecidos por ICA (1992). Es deseable que todo suelo reporte una CIC alta, condición que podría ser asociada a una elevada saturación de bases indicando una capacidad potencial para suministrar Ca, Mg y

K a las plantas (ICA, 1992). Lo anterior coincide con los resultados obtenidos para los macronutrientes mencionados (Figura 20). Así mismo, se puede mencionar que estos valores son deseables para el suelo, una vez son contrastados con los rangos propuestos por ICA (1992) ($\text{Ca} > 6 \text{ meq}/100 \text{ gr}$, $\text{Mg} > 2.5 \text{ meq}/100 \text{ gr}$, $\text{K} > 0.4 \text{ meq}/100 \text{ gr}$, alta disponibilidad de macronutrientes). Por otro lado, con los datos de disponibilidad de Na se logró estimar el porcentaje de Na intercambiable (PSI). Comparando con los rangos reportados por Massoud (1971), se menciona que los puntos priorizados, en general, pueden ser valorados como suelos no sódicos ($\text{PSI} < 7\%$) al presentar un valor promedio de 2.77%.

Al analizar los resultados obtenidos de pH se logró clasificar, en promedio, los suelos como alcalinos, con una baja solubilidad del P y de micronutrientes (ICA, 1992). Similarmente, los suelos se clasificaron como no salinos ($< 2 \text{ dS}/\text{m}$) con base a los resultados de CE ($0.35 \text{ dS}/\text{m}$). A pesar de presentarse altos contenidos de Ca, Mg y K, se atribuye una mayor interacción de estos cationes con la presencia de cargas electronegativas en la superficie de las arcillas que componen la estructura de los suelos (Lopez, 2002). Por su parte, el contenido de MO promedio presente en los suelos fue de 2.83%, siendo catalogada como una disponibilidad media (ICA, 1992). Estos suelos tienden a presentar reducciones en sus propiedades físicas, una baja capacidad amortiguadora (Buffer) así como un mayor requerimiento de nitrógeno (ICA, 1992; Cenicaña, 1995).

En cuanto a los resultados de las propiedades físicas, la densidad aparente (DA) permite clasificar los predios como suelos de textura media ($\text{DA}: 1.2 - 1.6 \text{ gr}/\text{cm}^3$) (Salamanca y Sadeghian, 2005) (Figura 21). Se resalta que a medida que la DA del suelo aumenta, se incrementa la tendencia a la compactación, disminuye la capacidad de retención de humedad y limita el crecimiento de raíces (Salamanca y Sadeghian, 2005).



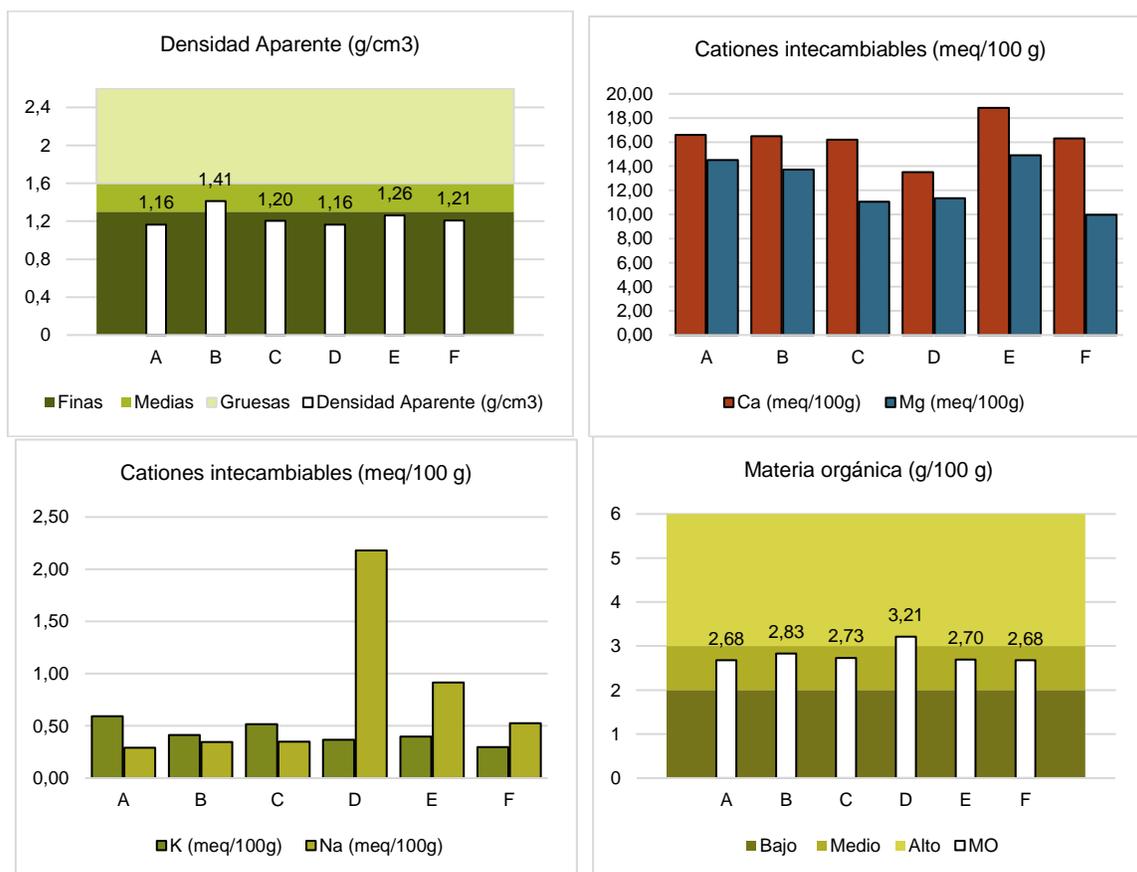


Figura 21. Resultados de propiedades fisicoquímicas del suelo en puntos priorizados asociados al Ingenio Rio Paila.

Donde; A: Cecilia, B: Margarita Floresta, C: Gertrudis, D: Golfo-09, E: Golfo-10, F: Samaria.

6.1.2. Resultados propiedades suelos en sitios priorizados del Ingenio Rio Mayagüez

Las tablas 21 y 22 presentan los resultados para las vigencias 2021 y 2022, de las propiedades de suelos cultivados con caña de azúcar en sitios priorizados del Ingenio Mayagüez. La Tabla 23 incluye la estadística descriptiva para los sitios evaluados.

Tabla 21. Resultados de las propiedades fisicoquímicas de suelos en puntos priorizados para el Ingenio Mayagüez.

Parámetro	Cofre		Barbarita		Unión		Zainera		
	vcn-pm-18 2021	2022	vcn-pm-16 2021	2022	vcn-pm-15 2021	2022	2021	2022-I	2022
pH	7.44	7.64	7.9	7.85	7.26	7.29	7.63	7.55	7.34
CE [dS/m]	0.21	0.101	0.42	0.291	0.52	0.203	0.39	0.54	0.753
MO [gr/100 gr]	3.28	2.49	2.52	3.27	3.48	3.31	3.43	2.57	3.42
Ca [meq/100 gr]	16.57	17.64	5.69	12.06	6.77	11.56	5.55	5.68	7.84
Mg [meq/100 gr]	9.09	7.94	2.81	4.58	4.12	4.91	3.2	3.42	2.48
K [meq/100 gr]	0.36	0.62	0.26	0.62	0.29	0.59	0.24	0.32	0.41
Na [meq/100 gr]	0.26	0.49	1.1	0.56	1.48	0.56	1.33	1.35	0.69
CICE [cmol (+)/kg]	26.28	26.69	9.86	17.82	12.66	17.62	10.32	10.77	11.42
CO [gr/100 gr]	1.9	-	1.46	-	2.02	-	1.99	1.49	-

P [mg/kg]	27.06	16.28	305.95	65.85	109.43	23.08	57.98	25.49	14.08
CICA [cmol (+)/kg]	27.94	28.13	16.86	20.09	18.25	21.87	21.51	20.51	16.28
NT [mg/kg]	1030	875.4	153.8	198.2	1047.8	303.94	1065.9	1060	194.43
PA [%]	25.3	40.1	41.62	52.1	22.78	38.10	14.58	25.47	32.90
PAr [%]	34.75	33.6	21.72	19.8	28.01	32.50	30.06	27.77	43.60
PL [%]	39.95	26.3	36.66	28.1	49.21	29.40	55.36	46.76	23.50
Clase textural	F.Ar	F.Ar	F	F.A	F.Ar	F.Ar	F.Ar-L	F.Ar	Ar
DA [g/cm ³]	1.23	1.38	1.26	1.42	1.19	1.27	1.04	1.44	1.22
RH 0.3 [%]	36.80	32.41	32.52	31.17	28.48	37.30	43.66	36.58	38.68
RH 15 [%]	34.57	15.88	29.03	14.65	21.08	15.02	37.96	32.87	16.35
CH [cm/h]	5.18	0.98	1.40	0.94	0.18	0.68	0.04	0.62	1.17
SO ₄ [mg/l]	22.13	1.9184	56.25	1.54	86.17	2.38	75.95	166.80	4.18
CO ₃ [mg/l]	0	<2,5	0	<2,5	0.00	<2,5	0.00	0.00	<2,5
NO ₃ [mg/l]	0.04	105.75	0.017	142.74	0.02	122.40	0.00	0.43	89.45
HCO ₃ [mg/l]	123	173.40	175	224.40	150.00	204.00	150.00	170.00	183.60
N-NH ₄ [mg/kg]	7.38	-	6.965	-	5.24	-	5.57	5.52	-
N-NO ₂ [mg/kg]	0	-	0.029	-	0.03	-	0.02	0.05	-

Donde, CE: conductividad eléctrica, CIC: capacidad de intercambio catiónico, P: fósforo, K: potasio, MO: materia orgánica, Ca: calcio, Mg: magnesio, Na: sodio, CO: carbono orgánico, NT: nitrógeno total. DA: densidad aparente, NT: nitrógeno total, CH: conductividad hidráulica, PA: porcentaje de arena, PAr: porcentaje arcilla, PL: porcentaje de limos, SO₄: sulfatos, NO₃: nitratos, CO₃: carbonatos, HCO₃: bicarbonatos, NH₄: amonio, NO₂: nitritos, RH: retención de humedad.

Tabla 22. Resultados de las propiedades fisicoquímicas de suelos en puntos priorizados para el Ingenio Mayagüez.

Parámetro	Zainera vcn-pm-29		Casa de Teja vcn-pm-17		Arenal vcn-pm-19		Esmeralda vcn-pm-30		Esmeralda vcn-pm-33	
	2021	2022	2021	2022	2021	2022	2021	2022	2021	2022
pH	7.49	7.58	6.87	6.3	7.34	7.79	6.9	6.5	6.79	6.56
CE [dS/m]	0.21	0.113	0.18	0.467	0.28	0.082	0.39	0.165	0.21	0.125
MO [gr/100 gr]	2.65	3.1	2.45	3.32	1.52	3.37	2.79	3.44	2.31	3.31
Ca [meq/100 gr]	2.93	14.83	3.28	10.05	6.28	7.28	5.72	8.90	2.99	9.22
Mg [meq/100 gr]	1.67	7.22	1.26	4.47	2.26	3.16	2.66	4.46	1.34	4.68
K [meq/100 gr]	0.09	0.29	0.15	0.48	1.01	0.54	0.42	0.36	0.17	0.31
Na [meq/100 gr]	1.21	0.34	0.74	0.62	0.71	0.51	0.41	0.41	0.64	0.46
CICE [cmol (+)/kg]	5.9	22.68	5.43	15.62	10.26	11.49	9.21	14.13	5.14	14.67
CO [gr/100 gr]	1.54		1.42		0.88		1.62		1.34	
P [mg/kg]	28.05	18.73	21.3	20.28	129.35	47.78	118.41	13.46	71.54	10.5
CICA [cmol (+)/kg]	20.27	23.71	14.12	18.34	9.54	17.79	15.98	19.27	13.88	18.74
NT [mg/kg]	937.3	161.05	680.9	1219.8	540.8	1055.6	1092.9	871.2	833.6	498.1
PA [%]	16.18	30.70	47.66	55.6	54.22	36.2	45.86	35.2	43.83	33.1
PAr [%]	36.4	33.90	25.82	17.5	13.45	41.2	19.62	41.6	21.65	34.8
PL [%]	47.42	35.40	26.52	26.9	32.33	22.6	34.52	23.2	34.52	32.1
Clase textural	F.Ar-L	F.Ac	F.Ar-A	FAR	F-A	Ac	F	Ac	F	F.Ac
DA [g/cm ³]	1.42	1.27	1.91	1.46	1.50	1.40	1.21	1.37	1.47	1.13
RH 0.3 [%]	41.70	35.06	29.89	29.49	35.86	32.71	34.68	31.10	35.58	41.80
RH 15 [%]	36.46	17.79	24.71	15.29	32.57	15.80	29.74	15.91	31.97	18.89
CH [cm/h]	0.71	1.51	0.02	0.56	0.13	0.44	2.79	1.27	0.23	1.59
SO ₄ [mg/l]	30.19	2.04	38.55	4.61	127.35	0.95	85.06	5.19	36.35	4.33
CO ₃ [mg/l]	0.00	<2,5	0	<2,5	0	<2,5	0	<2,5	0	<2,5
NO ₃ [mg/l]	0.27	56.25	1.048	138.15	3.426	91.95	1.374	115.35	0.065	85.65
HCO ₃ [mg/l]	85.00	204.00	70	163.20	130	214.20	410	214.20	75	183.60
N-NH ₄ [mg/kg]	6.76		4.474		2.849		3.431		7.379	
N-NO ₂ [mg/kg]	0.03		0.028		0.028		0.02		0.027	

Donde, CE: conductividad eléctrica, CIC: capacidad de intercambio catiónico, P: fósforo, K: potasio, MO: materia orgánica, Ca: calcio, Mg: magnesio, Na: sodio, CO: carbono orgánico, NT: nitrógeno total. DA: densidad aparente, NT: nitrógeno total, CH: conductividad hidráulica, PA: porcentaje de arena, PAr: porcentaje arcilla, PL: porcentaje de limos, SO₄: sulfatos, NO₃: nitratos, CO₃: carbonatos, HCO₃: bicarbonatos, NH₄: amonio, NO₂: nitritos, RH: retención de humedad.

Tabla 23. Estadística descriptiva de propiedades del suelo en cultivos de caña de azúcar, Ingenio Mayagüez.

Parámetro	Media	DE	Var	Min	Max
pH [Unidades]	7.26	0.48	0.22	6.30	7.90
CE [dS/m]	0.30	0.18	0.03	0.08	0.75
MO [%]	2.95	0.53	0.27	1.52	3.48
Ca [meq/100gr]	8.47	4.38	18.14	2.93	17.64
Mg [meq/100gr]	3.99	2.16	4.43	1.26	9.09
K [meq/100gr]	0.40	0.21	0.04	0.09	1.01
Na [meq/100gr]	0.73	0.37	0.13	0.26	1.48
P [mg/kg]	59.19	70.53	4712.58	10.50	305.95
CIC [cmol (+)/kg]	19.11	4.52	19.37	9.54	28.13
NT [mg/kg]	727.41	371.47	130729.88	153.80	1219.80
DA [g/cm ³]	1.35	0.19	0.03	1.04	1.91
CH [cm/h]	1.08	1.21	1.38	0.02	5.18
SO ₄ [mg/L]	175.35	153.00	22176.10	22.13	498.55
HCO ₃ [mg/L]	173.82	73.72	5148.05	70.00	410.00

Donde, DE: desviación estándar, Var: varianza, CE: conductividad eléctrica, CIC: capacidad de intercambio catiónico, P: fósforo, K: potasio, MO: materia orgánica, Ca: calcio, Mg: magnesio, Na: sodio, NT: nitrógeno total. DA: densidad aparente, NT: nitrógeno total, CH: conductividad hidráulica, SO₄: sulfatos, HCO₃: bicarbonatos

Con base a los resultados obtenidos, en la Tabla 23 se observa la mayor y la menor variabilidad en los parámetros NT y CE, respectivamente. La variación en la presencia de nitrógeno total en el suelo se puede atribuir a diferentes factores explicados con antelación. Similarmente, se observó una alta variación en los resultados de P entre los predios, comportamiento atribuido a la aplicación y manejo de dosis de fertilizantes fosfatados, así como a la descomposición de material orgánico adicionado o incorporado al suelo por medio de residuos descomponibles (residuos del corte de la caña de azúcar).

Al analizar otro tipo de parámetros como la CIC, se observa que los puntos priorizados presentaron un valor promedio medio (19.11 cmol/kg) según los rangos establecidos por ICA (1992). Es deseable que todo suelo reporte una CIC alta, de lo contrario se puede ver asociado a una saturación media de bases indicando, a su vez, una capacidad potencial moderada para suministrar Ca, Mg y K a las plantas (ICA, 1992). En concordancia con esta condición, la disponibilidad de macronutrientes (Ca, Mg y K) presentó variaciones entre los terrenos estudiados (Figura 22).

En general, los puntos presentaron condiciones deseables para el suelo, según los rangos propuestos por ICA (1992) (Ca > 6 meq/100 gr, Mg > 2.5 meq/100 gr, K > 0.4 meq/100 gr, alta disponibilidad de macronutrientes). Por otro lado, comparando el cálculo de PSI con los rangos reportados por Massoud (1971), se estableció que, en promedio, los puntos priorizados pueden ser valorados como suelos no sódicos (PSI < 7%) al presentar un valor aproximado de 3.82%. Al analizar el pH (7.26) y la CE (0.3 dS/m) promedio, se logró clasificar los suelos como neutros y no salinos (< 2 dS/m), respectivamente.

A pesar de presentarse altos contenidos de Ca, Mg y K en algunos puntos, se atribuye una mayor interacción de estos cationes con la presencia de cargas electronegativas en la superficie de las arcillas que componen la estructura de los suelos (Lopez, 2002). Por su parte, el contenido de MO promedio presente en los suelos fue de 2.95%, catalogando los

suelos con contenido medio de MO (ICA, 1992). Esta condición permite establecer tendencias de los suelos a presentar una moderada capacidad amortiguadora (Buffer) así como posibles requerimientos de nitrógeno (ICA, 1992; Cenicaña, 1995).

En cuanto a las propiedades físicas de los suelos, los resultados promedio reportados de DA permiten clasificar los predios como suelo de textura media (DA: 1.2 – 1.6 gr/cm³) (Salamanca y Sadeghian, 2005).

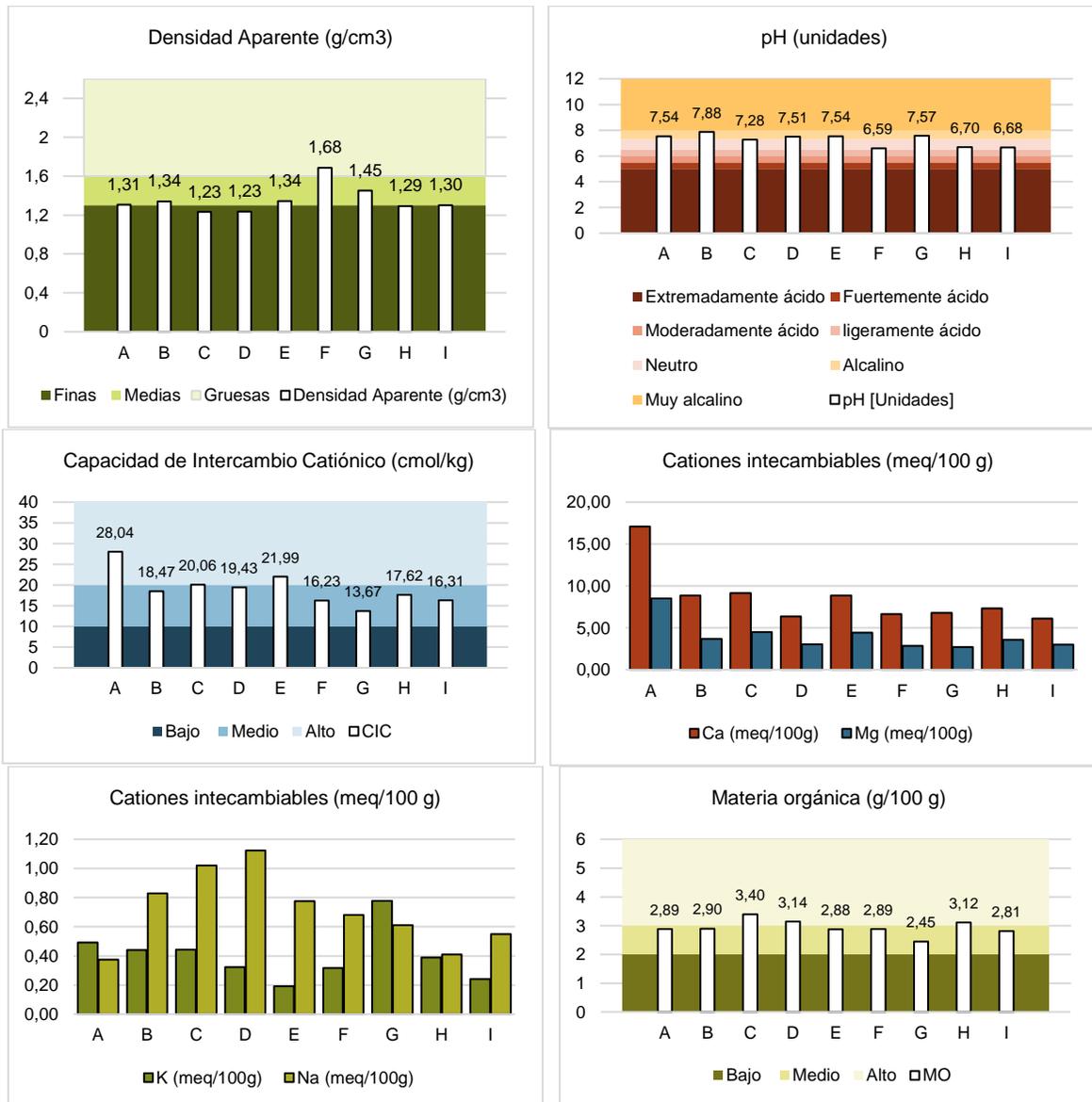


Figura 22. Resultados de propiedades fisicoquímicas del suelo en puntos priorizados asociados al Ingenio Mayaguez.

Donde, A: Cofre, B: Barbarita, C: Unión, D: Zainera-27, E: Zainera, F: Casa de Teja, G: Arenal, H: Esmeralda-30, I: Esmeralda-33.

6.1.3. Resultados propiedades suelos en sitios priorizados del Ingenio Risaralda

La tabla 24 presenta los resultados para las vigencias 2021 y 2022, de las propiedades de suelos cultivados con caña de azúcar en sitios priorizados del Ingenio Risaralda. La Tabla 25 incluye la estadística descriptiva para los sitios evaluados.

Tabla 24. Resultados de las propiedades fisicoquímicas de suelos en puntos priorizados para el Ingenio Risaralda.

Parámetro	Cabuyas-31 vcr-pm-31		Cabuyas-30 vcr-pm-30		
	2021	2022	2021	2022-I	2022
pH	6.46	6.65	5.96	6.1	6.05
CE [dS/m]	0.25	0.19	0.36	0.31	0.196
MO [gr/100 gr]	3.21	3.74	4.38	3.9	3.81
Ca [meq/100 gr]	2.87	12.12	2.84	1.8	11.35
Mg [meq/100 gr]	2.83	8.05	2.61	1.43	5.68
K [meq/100 gr]	0.11	0.37	0.21	0.1	0.57
Na [meq/100 gr]	2.33	0.35	1.53	0.84	0.42
CICE [cmol (+)/kg]	8.14	20.89	7.19	4.17	18.02
CO [gr/100 gr]	1.86	-	2.54	2.26	-
P [mg/kg]	36.25	16.35	59.29	10.01	28.20
CICA [cmol (+)/kg]	29.81	26.73	31.43	35.96	24.61
NT [mg/kg]	1507.8	649.1	2287.4	1995	978.5
PA [%]	22.33		19.44	15.54	
Par [%]	54.36		63.44	61.61	
PL [%]	23.31		17.12	22.85	
Clase textural	Ar		Ar	Ar	
DA [g/cm3]	1.05		1.00	1.11	
RH 0.3 [%]	45.50		41.94	51.70	
RH 15 [%]	40.32		36.27	47.01	
CH [cm/h]	3.84		0.51	0.04	
SO ₄ [mg/l]	60.34	4.23	60.63	124.9	5.11
CO ₃ [mg/l]	0	<2,5	0	0	<2,5
NO ₃ [mg/l]	0	124.1	0	0.126	158.6
HCO ₃ [mg/l]	50	159.43	140	35	138.10
N-NH ₄ [mg/kg]	5.457	-	6.245	5.659	-
N-NO ₂ [mg/kg]	0.024	-	0.028	0.045	-

Donde, CE: conductividad eléctrica, CIC: capacidad de intercambio catiónico, P: fósforo, K: potasio, MO: materia orgánica, Ca: calcio, Mg: magnesio, Na: sodio, CO: carbono orgánico, NT: nitrógeno total. DA: densidad aparente, NT: nitrógeno total, CH: conductividad hidráulica, PA: porcentaje de arena, PAR: porcentaje arcilla, PL: porcentaje de limos, SO₄: sulfatos, NO₃: nitratos, CO₃: carbonatos, HCO₃: bicarbonatos, NH₄: amonio, NO₂: nitritos, RH: retención de humedad.

Tabla 25. Estadística descriptiva de propiedades del suelo en cultivos de caña de azúcar, Ingenio Risaralda.

Parámetro	Media	DE	Var	Min	Max
pH [Unidades]	6.24	0.30	0.07	5.96	6.65
CE [dS/m]	0.26	0.07	0.00	0.19	0.36
MO [%]	3.81	0.42	0.14	3.21	4.38
Ca [meq/100gr]	6.20	5.08	20.66	1.80	12.12
Mg [meq/100gr]	4.12	2.70	5.81	1.43	8.05
K [meq/100gr]	0.27	0.20	0.03	0.10	0.57
Na [meq/100gr]	1.09	0.84	0.56	0.35	2.33

P [mg/kg]	30.02	19.28	297.24	10.01	59.29
CIC [cmol (+)/kg]	29.71	4.39	15.38	24.61	35.96
NT [mg/kg]	1483.56	681.86	371945.26	649.10	2287.40
DA [g/cm ³]	1.15	0.14	0.01	1.00	1.33
CH [cm/h]	1.31	1.49	1.77	0.04	3.84
SO ₄ [mg/L]	51.04	49.84	1986.90	4.23	124.90
HCO ₃ [mg/L]	104.51	57.46	2641.40	35.00	159.43

Donde, DE: desviación estándar, Var: varianza, CE: conductividad eléctrica, CIC: capacidad de intercambio catiónico, P: fósforo, K: potasio, MO: materia orgánica, Ca: calcio, Mg: magnesio, Na: sodio, NT: nitrógeno total. DA: densidad aparente, NT: nitrógeno total, CH: conductividad hidráulica, SO₄: sulfatos, HCO₃: bicarbonatos

Con base a los resultados reportados en la Tabla 25 se observa la mayor y la menor variabilidad en los parámetros NT y CE respectivamente. La variación en la presencia de nitrógeno total en el suelo se puede atribuir a diferentes factores tales como la aplicación, tipo y manejo del agua de riego, el uso de fertilizantes nitrogenados, así como a la etapa de desarrollo del cultivo (Castellon *et al.*, 2014, Leghari *et al.*, 2016).

Analizando otro tipo de parámetros, se observa que los predios presentaron una CIC promedio alta o deseable (29.71 cmol/kg) según los rangos establecidos por ICA (1992). Por el contrario, la disponibilidad de macronutrientes (Ca, Mg y K) (Figura 23) varió entre los predios evaluados. Los predios presentaron, en promedio, condiciones deseables de Ca y Mg para el suelo, según los rangos propuestos por ICA (1992) (Ca > 6 meq/100 gr Mg > 2.5 meq/100 gr, alta disponibilidad), pero condiciones moderadas en cuanto al contenido de K (K < 0.4 meq/100 gr).

Por otro lado, al comparar los resultados del cálculo de PSI (3.67%) con los rangos reportados por Massoud (1971), se determinó que los puntos priorizados, en general, pueden ser valorados como suelos no sódicos (PSI < 7%). Otro de los parámetros de importancia agronómica es la disponibilidad de azufre (S) en el suelo, reflejándose en promedio una alta disponibilidad en los predios valorados (30.02 ppm). Por otra parte, analizando el pH (6.24) se logró caracterizar los suelos como ligeramente ácidos siendo una condición adecuada para el crecimiento de cultivos asociados a caña de azúcar (ICA, 1992). De igual forma, los suelos se clasificaron como no salinos (< 2 dS/m) con base a los resultados de CE (0.26 dS/m). Por su parte, el contenido de MO de los suelos fue en promedio alto (3.81%) condición que permite inferir mejoras en sus propiedades físicas, una mayor capacidad amortiguadora (Buffer) así como un menor requerimiento de nitrógeno (ICA, 1992; Cenicaña, 1995). Los valores de DA permiten clasificar las haciendas como suelos de textura fina (DA: 1.0 – 1.2 gr/cm³) (Salamanca y Sadeghian, 2005).

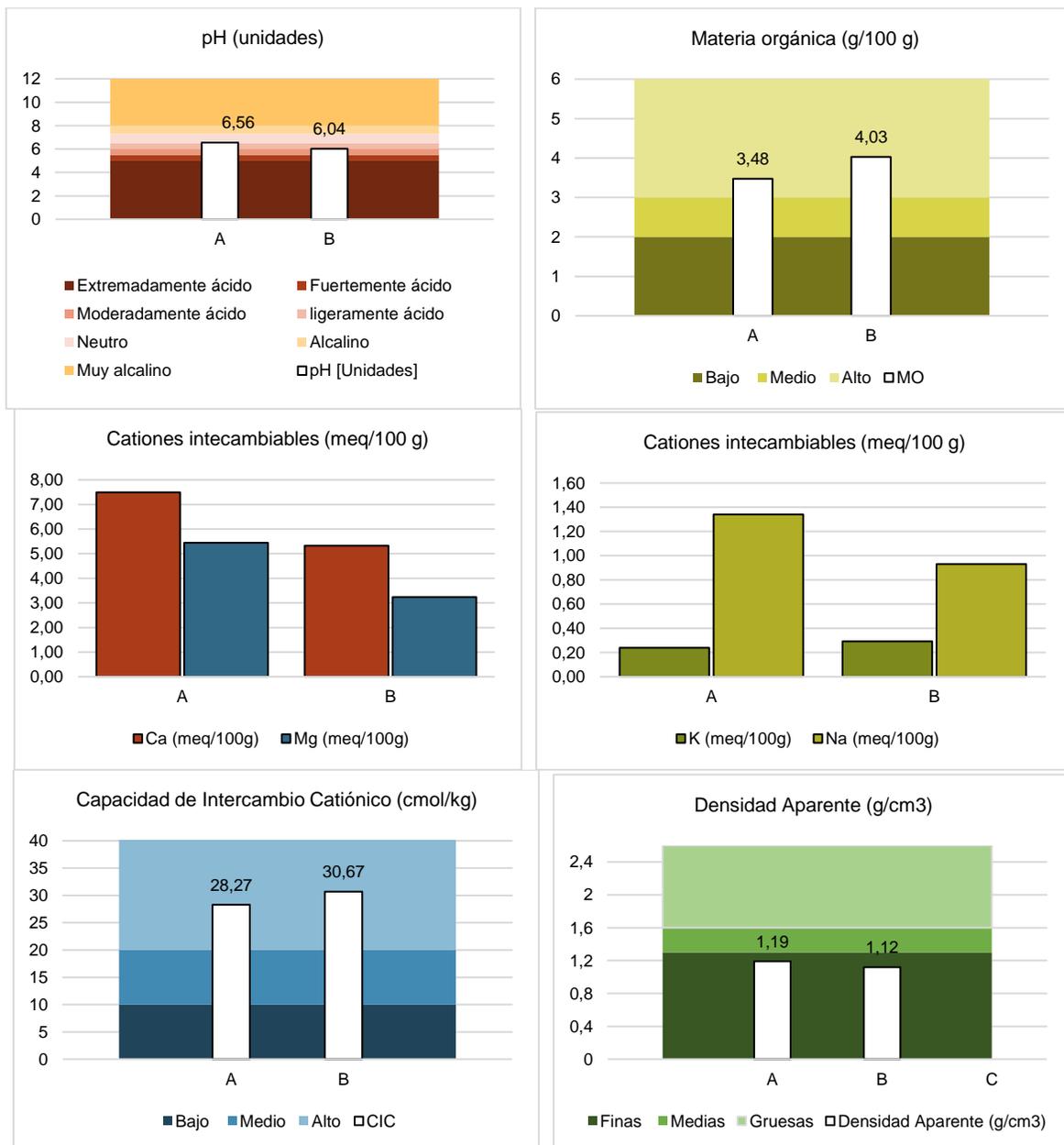


Figura 23. Resultados de propiedades fisicoquímicas del suelo en puntos priorizados asociados al Ingenio Risaralda.

Donde, A: Cabuyas-31, B: Cabuyas-30.

6.1.4. Resultados propiedades suelos en sitios priorizados del Ingenio del Cauca

La tabla 26 presenta los resultados para las vigencias 2021 y 2022, de las propiedades de suelos cultivados con caña de azúcar en sitios priorizados del Ingenio del Cauca. La Tabla 27 incluye la estadística descriptiva para los sitios evaluados.

Tabla 26. Resultados de las propiedades fisicoquímicas de suelos en puntos priorizados, Ingenio Incauca.

Parámetro	Las Palmas		Florencia		Aranjuez		Egipto			Egipto	
	vcn-pm-63		vcn-pm-65		vcn-pm-64		vj-pm-09			vj-pm-11	
	2021	2022	2021	2022	2021	2022	2021	2022-I	2022	2021	2022
pH	6.66	6.84	7.47	7.95	7.48	7.58	6.26	5.95	6.25	5.88	6.16
CE [dS/m]	0.22	0.215	1.01	0.093	0.38	0.102	0.21	0.15	0.064	0.16	0.055
MO [gr/100 gr]	2.02	3.37	2.81	3.65	1.71	3.01	1.79	2.17	3.72	2.07	3.81
Ca [meq/100 gr]	10.36	10.90	1.46	16.13	13.64	9.19	6.28	1.23	4.55	4.97	4.84
Mg [meq/100 gr]	4.24	5.51	0.85	6.06	5.25	4.23	3.78	0.82	3.45	2.66	3.19
K [meq/100 gr]	0.23	0.75	0.14	0.62	0.35	0.31	0.22	0.09	0.26	0.21	0.29
Na [meq/100 gr]	0.24	0.53	0.4	0.58	0.22	0.58	0.15	0.5	0.43	<0.14	0.59
CICE [cmol (+)/kg]	15.07	17.68	23.38	23.39	19.46	14.30	10.43	2.64	8.69	7.93	8.91
CO [gr/100 gr]	1.17	-	1.63	-	0.99	-	1.04	1.26	-	1.2	-
P [mg/kg]	6.81	58.63	109.64	18.12	59.72	11.23	2.98	4.25	6.8	4.22	6.38
CICA [cmol (+)/kg]	16.3	20.17	20.66	26.33	18.79	17.44	13.36	17.29	11.05	13.41	13.75
NT [mg/kg]	993.9	201.6	1444.5	604.7	951.1	1037.18	762.2	1010	1282.7	887.1	920.39
PA [%]	46.36	30.2	27.81	35.7	44.2	55.6	34.08	38.63	39.4	44.38	42.5
Par [%]	27.19	41.4	27.28	42.6	25.21	18.4	33.33	35.67	31.9	27.16	30.8
PL [%]	26.45	28.4	44.91	21.7	30.59	26	32.59	25.7	28.7	28.46	26.7
Clase textural	F.Ar-A	Ar	F.Ar	Ar	F	F.Ar	F.Ar	F.Ar	F.Ar	F.Ar	F.Ar
DA [g/cm ³]	1.29	1.26	1.24	1.17	1.11	1.42	1.35	1.49	1.32	1.23	1.33
RH 0.3 [%]	47.44	38.56	48.42	42.77	44.18	31.64	43.32	36.89	34.39	36.07	33.10
RH 15 [%]	42.35	16.70	44.56	17.64	33.51	15.71	38.51	33.39	15.76	31.63	16.71
CH [cm/h]	0.02	1.15	0.04	1.00	0.02	0.54	1.23	0.96	0.62	3.16	1.03
SO ₄ [mg/l]	32.62	4.73	67.06	1.22	46.52	1.75	46.96	11.44	3.19	31.73	3.71
CO ₃ [mg/l]	0	< 2.5	0	< 2.5	0	< 2.5	0	0	< 2.5	0	< 2.5
NO ₃ [mg/l]	0.174	114.15	0	74.55	0	52.2	0.33	0.143	103.8	0.196	47.25
HCO ₃ [mg/l]	75	244.80	220	214.20	145	214.20	45	40	142.80	45	193.80
N-NH ₄ [mg/kg]	4.845	-	4.908	-	7.827	-	6.202	5.157	-	5.339	-
N-NO ₂ [mg/kg]	0.021	-	0.022	-	0.021	-	0.023	0.05	-	0.021	-

Donde, CE: conductividad eléctrica, CIC: capacidad de intercambio catiónico, P: fósforo, K: potasio, MO: materia orgánica, Ca: calcio, Mg: magnesio, Na: sodio, CO: carbono orgánico, NT: nitrógeno total. DA: densidad aparente, NT: nitrógeno total, CH: conductividad hidráulica, PA: porcentaje de arena, PAR: porcentaje arcilla, PL: porcentaje de limos, SO₄: sulfatos, NO₃: nitratos, CO₃: carbonatos, HCO₃: bicarbonatos, NH₄: amonio, NO₂: nitritos, RH: retención de humedad.

Tabla 27. Estadística descriptiva de propiedades del suelo en cultivos de caña de azúcar, Ingenio Incauca.

Parámetro	Media	DE	Var	Min	Max
pH [Unidades]	6.77	0.74	0.49	5.88	7.95
CE [dS/m]	0.24	0.27	0.07	0.06	1.01
MO [%]	2.74	0.82	0.61	1.71	3.81
Ca [meq/100gr]	7.60	4.84	21.28	1.23	16.13
Mg [meq/100gr]	3.64	1.72	2.69	0.82	6.06
K [meq/100gr]	0.32	0.20	0.04	0.09	0.75
Na [meq/100gr]	0.42	0.16	0.02	0.15	0.59
P [mg/kg]	26.25	34.75	1097.83	2.98	109.64
CIC [cmol (+)/kg]	17.14	4.32	16.94	11.05	26.33
NT [mg/kg]	917.76	328.08	97850.18	201.60	1444.50
DA [g/cm ³]	1.29	0.11	0.01	1.11	1.49
CH [cm/h]	0.89	0.88	0.71	0.02	3.16
SO ₄ [mg/L]	148.98	153.71	21478.17	11.40	454.36
HCO ₃ [mg/L]	43.62	79.66	5768.42	40.00	244.80

Donde, DE: desviación estándar, Var: varianza, CE: conductividad eléctrica, CIC: capacidad de intercambio catiónico, P: fósforo, K: potasio, MO: materia orgánica, Ca: calcio, Mg: magnesio, Na: sodio, NT: nitrógeno total. DA: densidad aparente, NT: nitrógeno total, CH: conductividad hidráulica, SO₄: sulfatos, HCO₃: bicarbonatos

De acuerdo a los resultados reportados en la Tabla 27 se observa la mayor y la menor variabilidad en los parámetros NT y densidad aparente, respectivamente. La variación en la presencia de nitrógeno total en el suelo se puede atribuir a los factores explicados con antelación. Adicionalmente, se presenta una alta variación en la presencia de sulfatos en los predios, la cual puede atribuir a la aplicación y el tipo de agua de riego, teniendo en cuenta que este componente afecta la acumulación de sales en el suelo, principalmente de cloruros y sulfatos (Castellon *et al.*, 2014).

Cabe resaltar que el análisis de parámetros se realizó teniendo en cuenta los valores promedios. Se observa que los puntos priorizados presentaron una CIC media o no óptima (17,14 cmol/kg) según los rangos establecidos por ICA (1992). Por el contrario, la disponibilidad de macronutrientes (Ca, Mg y K) (Figura 24) varió entre los predios evaluados. Los predios presentaron condiciones deseables de Ca y Mg para el suelo, según los rangos propuestos por ICA (1992) (Ca > 6 meq/100 gr, Mg > 2.5 meq/100 gr, alta disponibilidad), pero condiciones no óptimas en cuanto al contenido de K (K < 0.4 meq/100 gr).

Al comparar los resultados en la determinación de PSI (2.45%) con los rangos reportados por Massoud (1971), se reporta que los puntos priorizados pueden ser valorados como suelos no sódicos (PSI < 7%). Otro de los parámetros importantes es la disponibilidad de azufre (S) en el suelo, reflejándose una alta disponibilidad. Por otra parte, analizando los resultados de pH se logró caracterizar los suelos como neutros, siendo una condición adecuada para el desarrollo del cultivo de la caña de azúcar (ICA 1992). De igual forma, los suelos se clasificaron como no salinos (< 2 dS/m) con base a los resultados de CE (0.24

dS/m). Por su parte, el contenido de MO de los suelos fue medio, condición en la cual los suelos tienden a generar reducción en las propiedades físicas del suelo, una menor capacidad amortiguadora (Buffer) y un mayor requerimiento de nitrógeno (ICA, 1992; Cenicaña, 1995).

Con las propiedades físicas de los suelos, se logró clasificar los puntos priorizados como suelos de textura fina (DA: 1.0 – 1.2 gr/cm³) (Salamanca y Sadeghian, 2005).

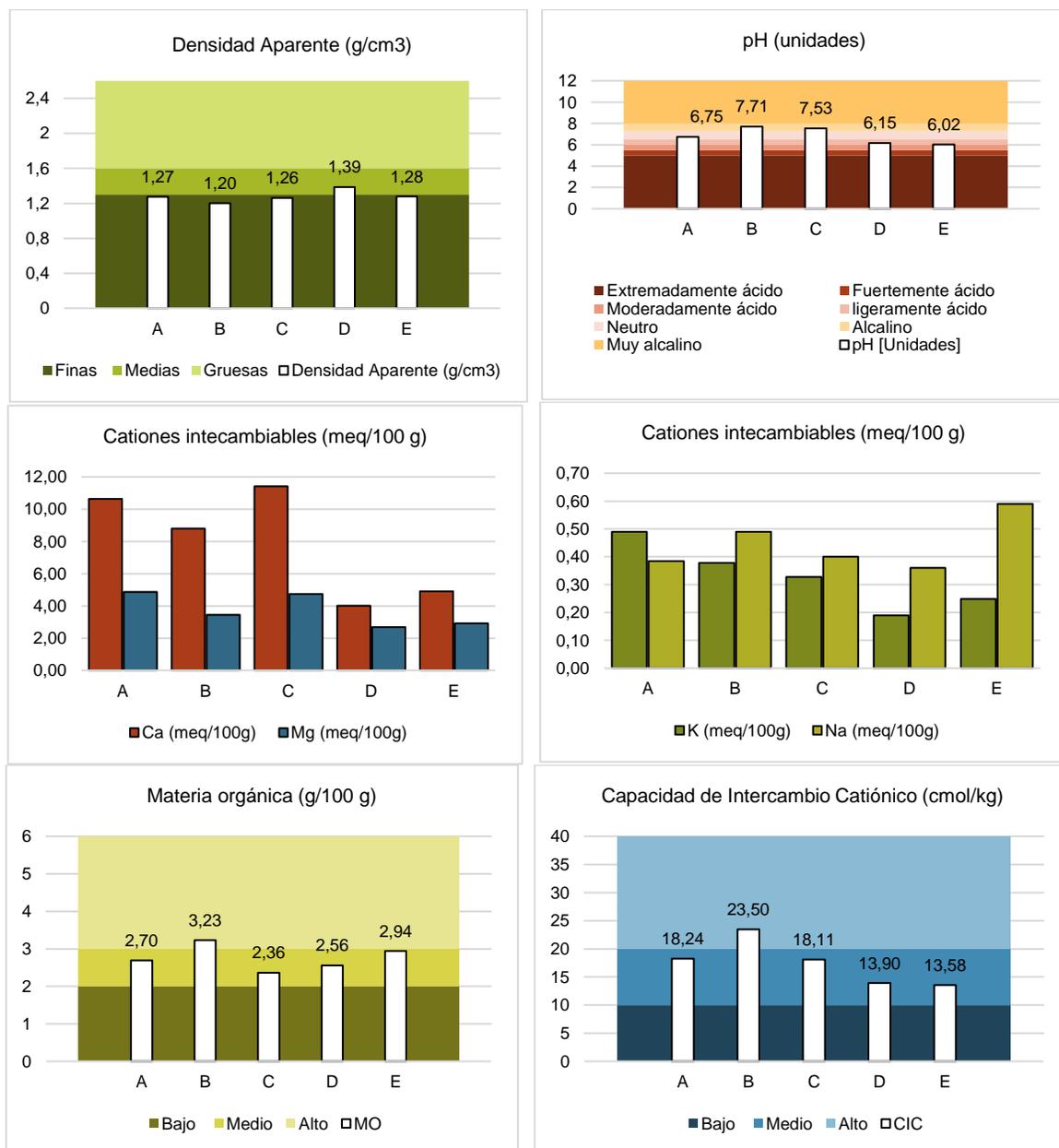


Figura 24. Resultados de propiedades fisicoquímicas del suelo en puntos priorizados asociados al Ingenio Incauca.

Donde, A: Las Palmas, B: Florencia, C: Aranjuez, D: Egipto-09, E: Egipto-11.

6.1.5. Resultados propiedades suelos en sitios priorizados del Ingenio Providencia

Las tablas 28 y 29 presentan los resultados para las vigencias 2021 y 2022, de las propiedades de suelos cultivados con caña de azúcar en sitios priorizados del Ingenio Providencia. La Tabla 30 incluye la estadística descriptiva para los sitios evaluados.

Tabla 28. Resultados de las propiedades físico-químicas de suelos en puntos priorizados, Ingenio Providencia.

Parámetro	Alizal		Alizal		Aurora		Ceiba		Marsella	
	vce-pm-23		vce-pm-22		vce-pm-11		vce-pm-10		vce-pm-09	
	2021	2022	2021	2022	2021	2022	2021	2022	2021	2022
pH	7.83	7.94	7.85	8.09	7.72	7.83	7.79	7.95	6.8	7.61
CE [dS/m]	0.49	0.178	0.49	0.117	0.52	0.148	0.44	0.199	0.26	0.119
MO [gr/100 gr]	3.65	3.19	3.24	3.13	3.59	3.21	3.12	2.96	3.47	3.38
Ca [meq/100 gr]	8.57	14.40	6.61	13.12	8.65	15.33	5.12	14.75	4.75	11.17
Mg [meq/100 gr]	6.11	6.95	4.56	6.30	6.04	7.80	2.68	5.67	2.84	4.85
K [meq/100 gr]	0.62	0.67	0.54	0.87	0.5	0.97	0.82	1.59	0.48	0.69
Na [meq/100 gr]	1.05	0.44	0.93	0.48	0.93	0.52	0.57	0.53	1.39	0.55
CICE [cmol (+)/kg]	16.35	22.46	12.64	20.77	16.12	24.62	9.19	22.54	9.46	17.26
CO [gr/100 gr]	2.12	-	1.88	-	2.08	-	1.81	-	2.01	-
P [mg/kg]	120.69	19.62	125.87	19.57	74.57	13.43	218.87	54.92	8.57	16.14
CICA [cmol (+)/kg]	26.24	28.31	25.06	21.94	28.22	25.13	23.34	25.14	18.87	18.92
NT [mg/kg]	1386.3	244.5	1582.5	136.9	1979.4	179.61	1166.4	1483.5	1066.2	307.8
PA [%]	15.34	42.8	32.07	52.6	25.66	53.7	47.16	51.9	43.17	55.3
Par [%]	38.85	30.2	38.81	18.5	30.56	17.6	17.83	26.7	23.96	14.1
PL [%]	45.81	27	29.12	28.9	43.78	28.7	35.01	21.4	32.87	30.6
Clase textural	F.Ar-L	F.Ar	F.Ar	F.A	F.Ar	F.A	F	F.Ar-A	F	F.A
DA [g/cm ³]	1.33	1.43	1.47	1.32	1.26	1.42	1.67	1.35	1.33	1.44
RH 0.3 [%]	43.84	29.88	48.11	34.85	41.26	30.81	27.41	32.79	22.28	29.62
RH 15 [%]	40.25	16.53	43.43	15.37	36.89	14.42	23.11	15.72	16.53	16.66
CH [cm/h]	2.24	0.62	0.00	0.98	0.35	0.46	3.96	1.00	0.61	0.68
SO ₄ [mg/l]	102.4	0.91	153.3	0.65	58.51	1.13	45.32	1.46	95.26	2.36
CO ₃ [mg/l]	0	<2,5	0	<2,5	0	<2,5	0	<2,5	0	<2,5
NO ₃ [mg/l]	0.056	113.4	0.074	76.8	0	64.2	0.269	104.85	1.296	50.7
HCO ₃ [mg/l]	240	214.20	215	244.80	225	214.20	175	183.60	75	224.40
N-NH ₄ [mg/kg]	7.224	-	6.802	-	7.464	-	4.847	-	7.031	-
N-NO ₂ [mg/kg]	0.023	-	0.03	-	0.027	-	0.028	-	0.026	-

Donde, CE: conductividad eléctrica, CIC: capacidad de intercambio catiónico, P: fósforo, K: potasio, MO: materia orgánica, Ca: calcio, Mg: magnesio, Na: sodio, CO: carbono orgánico, NT: nitrógeno total. DA: densidad aparente, NT: nitrógeno total, CH: conductividad hidráulica, PA: porcentaje de arena, PAR: porcentaje arcilla, PL: porcentaje de limos, SO₄: sulfatos, NO₃: nitratos, CO₃: carbonatos, HCO₃: bicarbonatos, NH₄: amonio, NO₂: nitritos, RH: retención de humedad.

Tabla 29. Resultados de las propiedades físico-químicas de suelos en puntos priorizados, Ingenio Providencia.

Parámetro	Union Molina		Santa Lucía			Santa Lucía		Santa Lucía
	vce-pm-08		vce-pm-19			vce-pm-30		vce-pm-28
	2021	2022	2021	2022-I	2022	2021	2022	2022
pH	7.39	7.9	7.62	7.51	8.15	7.65	7.75	8.1
CE [dS/m]	0.43	0.243	0.27	0.59	0.128	0.34	0.252	0.409
MO [gr/100 gr]	3.74	3.16	3.43	3.09	3.13	2.76	3.09	3.22
Ca [meq/100 gr]	10.28	19.39	4.88	9.94	16.14	4.75	11.06	19.02
Mg [meq/100 gr]	6.26	8.38	3.19	6.46	7.71	2.76	6.70	9.73
K [meq/100 gr]	1.26	1.68	0.28	0.87	1.23	0.5	1.99	1.51
Na [meq/100 gr]	1.73	0.49	0.64	1.02	0.68	0.84	0.25	0.57
CICE [cmol (+)/kg]	19.53	29.94	8.99	18.29	25.75	8.85	20.00	30.82
CO [gr/100 gr]	2.17	-	1.99	1.79	-	1.6	-	-
P [mg/kg]	17.71	20.2	29.62	56.32	58.68	91.48	12.73	10.43
CICA [cmol (+)/kg]	32.9	34.54	27.95	27.1	29.08	23.12	24.80	31.26
NT [mg/kg]	1310	1683.7	1344.2	1290	948.2	1283.1	2029.59	1346.5
PA [%]	18.2	31.3	17.32	20.73	37.8	22.45	35.4	30.90
Par [%]	45.83	35.2	36.81	34.16	33.9	30.19	31.6	37.50
PL [%]	35.97	33.5	45.87	45.11	28.3	47.36	33	31.60
Clase textural	Ar	F.Ar	F.Ar-L	F.Ar	F.Ar	F.Ar	F.Ar	F.Ar
DA [g/cm ³]	1.50	1.35	1.44	1.33	1.27	1.31	1.33	1.41
RH 0.3 [%]	47.86	34.58	45.86	38.24	35.46	41.12	35.43	30.57
RH 15 [%]	43.81	16.44	41.38	34.34	14.66	37.02	16.02	13.68
CH [cm/h]	0.08	0.66	0.29	1.92	1.27	0.15	0.58	0.84
SO ₄ [mg/l]	17	1.18	55.64	122.5	0.79	45.88	1.84	1.68
CO ₃ [mg/l]	0	<2,5	0	0	<2,5	0	<2,5	<2,5
NO ₃ [mg/l]	0.348	129.75	0.235	0.15	73.65	0	152.7	92.55
HCO ₃ [mg/l]	150	255.00	140	160	204.00	185	275.40	224.40
N-NH ₄ [mg/kg]	5.382	-	7.905	4.51	-	7.991	-	-
N-NO ₂ [mg/kg]	0.037	-	0.026	0.046	-	0.023	-	-

Donde, CE: conductividad eléctrica, CIC: capacidad de intercambio catiónico, P: fósforo, K: potasio, MO: materia orgánica, Ca: calcio, Mg: magnesio, Na: sodio, CO: carbono orgánico, NT: nitrógeno total. DA: densidad aparente, NT: nitrógeno total, CH: conductividad hidráulica, PA: porcentaje de arena, PAR: porcentaje arcilla, PL: porcentaje de limos, SO₄: sulfatos, NO₃: nitratos, CO₃: carbonatos, HCO₃: bicarbonatos, NH₄: amonio, NO₂: nitritos, RH: retención de humedad.

Tabla 30. Estadística descriptiva de propiedades del suelo en cultivos de caña de azúcar, Ingenio Providencia.

Parámetro	Media	DE	Var	Min	Max
pH [Unidades]	7.75	0.31	0.09	6.80	8.15
CE [dS/m]	0.31	0.15	0.02	0.12	0.59
MO [%]	3.25	0.25	0.06	2.76	3.74
Ca [meq/100gr]	11.00	4.81	21.81	4.75	19.39
Mg [meq/100gr]	5.83	2.03	3.88	2.68	9.73
K [meq/100gr]	0.95	0.49	0.22	0.28	1.99
Na [meq/100gr]	0.76	0.37	0.13	0.25	1.73
P [mg/kg]	53.86	55.74	2934.25	8.57	218.87
CIC [cmol (+)/kg]	26.22	4.26	17.16	18.87	34.54
NT [mg/kg]	1153.80	583.34	321377.25	136.90	2029.59
DA [g/cm ³]	1.39	0.10	0.01	1.26	1.67
CH [cm/h]	0.93	0.96	0.87	0.00	3.96
SO ₄ [mg/L]	102.69	53.94	2748.35	17.00	226.70
HCO ₃ [mg/L]	200.28	48.03	2178.88	75.00	275.40

Donde, DE: desviación estándar, Var: varianza, CE: conductividad eléctrica, CIC: capacidad de intercambio catiónico, P: fósforo, K: potasio, MO: materia orgánica, Ca: calcio, Mg: magnesio, Na: sodio, NT: nitrógeno total. DA: densidad aparente, NT: nitrógeno total, CH: conductividad hidráulica, SO₄: sulfatos, HCO₃: bicarbonatos

De acuerdo a los resultados obtenidos, en la Tabla 30 se observa la mayor y la menor variabilidad en los parámetros NT y densidad aparente, respectivamente. La variación en la presencia de nitrógeno total en el suelo se puede atribuir a diferentes factores tales como la aplicación, tipo y manejo del agua de riego, el uso de fertilizantes nitrogenados así como a la etapa de desarrollo del cultivo (Castellon *et al.*, 2014, Leghari *et al.*, 2016). De igual forma, se evidencia una alta variación en los resultados de P entre los puntos priorizados, comportamiento que se puede atribuir a la incorporación y manejo de dosis de fertilizantes fosfatados (Silva *et al.*, 2006).

Cabe resaltar que el análisis de parámetros se realizó teniendo en cuenta los valores promedios. Se observa que los predios presentaron un valor alto de CIC (26.22 cmol/kg) según los rangos establecidos por ICA (1992). Con base en estos resultados, se puede establecer que los suelos que presentan una condición deseable de CIC. Similarmente, la disponibilidad de macronutrientes (Ca, Mg y K) (Figura 25) varió entre los predios evaluados. Los predios presentaron condiciones deseables para el suelo, según los rangos propuestos por ICA (1992) (Ca > 6 meq/100 gr, Mg > 2.5 meq/100 gr, K > 0.4 meq/100 gr, alta disponibilidad de macronutrientes).

Por otro lado, contrastando los resultados de PSI (2.90%) con los rangos reportados por Massoud (1971), se determinó que los puntos priorizados pueden ser valorados como suelos no sódicos (PSI < 7%). Otro de los parámetros de importancia nutricional es la disponibilidad de azufre (S) en el suelo, reflejándose una alta disponibilidad en los puntos priorizados (34.28 ppm). Por otra parte, analizando los valores de pH se logró caracterizar los suelos como alcalinos, condición que se puede relacionar con una baja solubilidad del

P y de micronutrientes (ICA, 1992). De igual forma, los suelos se clasificaron como no salinos (< 2 dS/m) con base a los resultados de CE (0.31 dS/m). A pesar de presentarse altos contenidos de Ca, Mg y K en algunos puntos, se atribuye una mayor interacción de estos cationes con la presencia de cargas electronegativas en la superficie de las arcillas que componen la estructura de los suelos (Lopez, 2002). Por su parte, los suelos presentaron un alto contenido de MO (3.25%) según los rangos reportados por ICA (1992).

Al analizar las propiedades físicas de los suelos, los resultados reportados de DA permiten clasificar las puntos priorizados como suelos de textura media (DA: 1.2 – 1.6 gr/cm³) (Salamanca y Sadeghian, 2005).

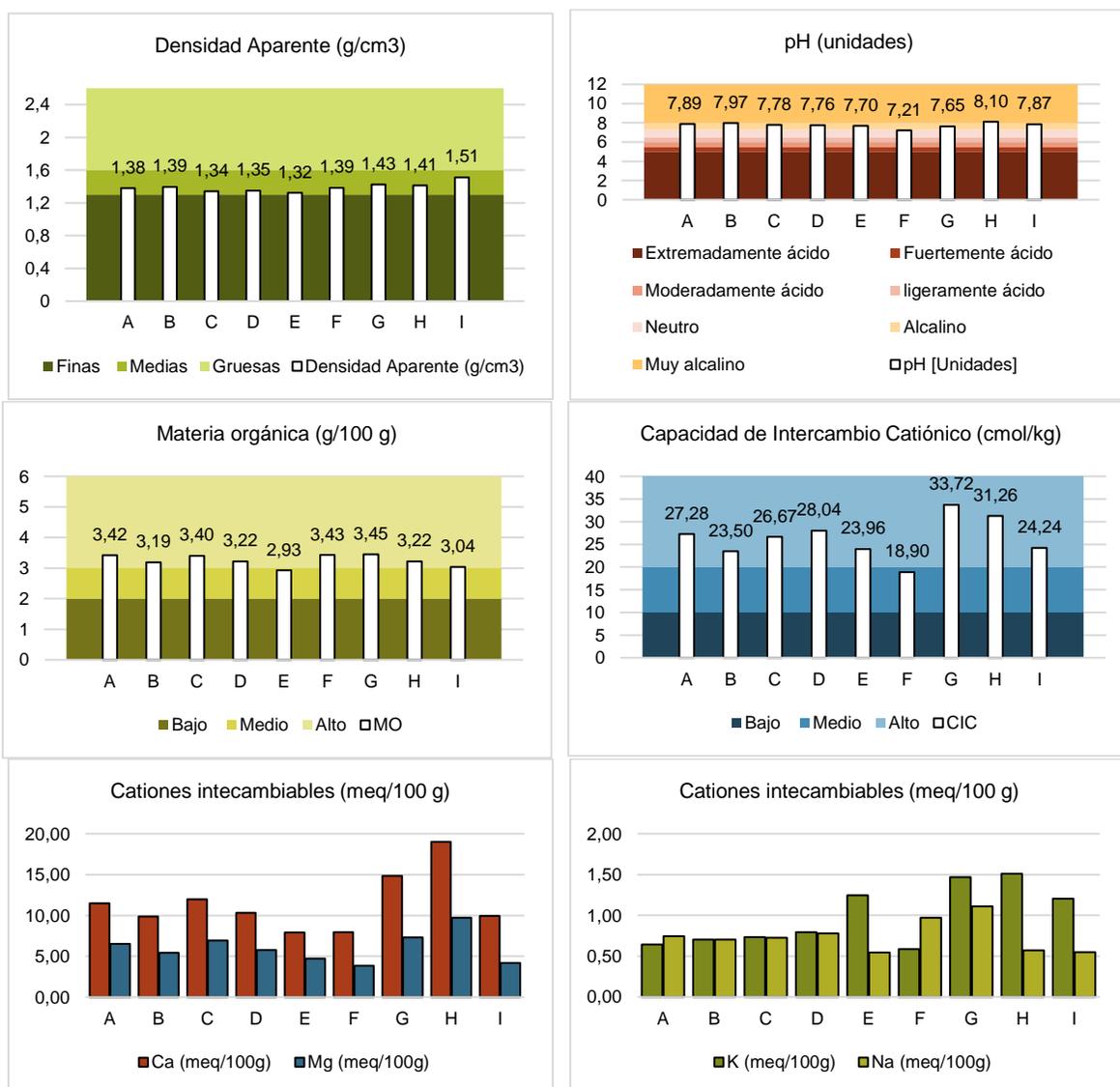


Figura 25. Resultados de propiedades fisicoquímicas del suelo en puntos priorizados asociados al Ingenio Providencia.

Donde, A: Alizal-23, B: Alizal-22, C: Aurora, D: Santa Lucía-19, E: Santa Lucía-30, F: Marsella, G: Unión Molina, H: Santa Lucía-28, I: Ceiba.

6.1.6. Resultados propiedades suelos en sitios priorizados del Ingenio Manuelita

Las tablas 31 y 32 presentan los resultados para las vigencias 2021 y 2022, de las propiedades de suelos cultivados con caña de azúcar en sitios priorizados del Ingenio Manuelita. La Tabla 33 incluye la estadística descriptiva para los sitios evaluados.

Tabla 31. Resultados de las propiedades fisicoquímicas de suelos en puntos priorizados, Ingenio Manuelita.

Parámetro	Florencia		Soledad		Olga		Olga		Josepilla		Malimbu	
	vp-pm-14		vp-pm-35		vp-pm-76		vp-pm-46		vp-pm-33		vp-pm-32	
	2021	2022	2021	2022	2021	2022	2021	2022	2021	2022	2021	2022
pH	7.99	8.09	8.09	8.69	6.94	7.66	6.88	7.9	8.29	8.02	6.96	8.03
CE [dS/m]	1.1	0.574	3.97	0.481	0.26	0.228	0.36	0.245	0.53	0.268	0.36	0.174
MO [gr/100 gr]	4	3.32	1.57	3.12	2.24	3.32	2.88	3.16	2.03	3.04	3.97	3.38
Ca [meq/100 gr]	13.87	11.38	16.57	12.48	3.8	10.31	11.8	14.14	21.08	11.30	17.91	10.29
Mg [meq/100 gr]	8.27	3.36	7.01	3.78	1.96	2.42	3.61	3.39	4.6	3.33	5.34	3.27
K [meq/100 gr]	1.26	0.29	0.58	0.30	0.12	0.24	0.19	0.45	0.31	0.38	0.38	0.33
Na [meq/100 gr]	3.26	0.61	1.46	0.63	0.69	0.7	<0.14	0.82	0.26	0.73	0.36	0.48
CICE [cmol (+)/kg]	26.66	15.65	90.14	17.19	6.57	13.66	15.72	18.81	26.25	15.74	23.99	14.37
CO [gr/100 gr]	2.32	-	0.91	-	1.3	-	1.67	-	1.18	-	2.3	-
P [mg/kg]	76.96	15.43	31.05	1.47	52.99	51.66	54.2	64.63	30.2	2.17	35.62	4.28
CICA [cmol (+)/kg]	19.13	21.46	13.82	23.80	17.01	17.69	15.66	22.67	18.78	20.68	25.42	19.95
NT [mg/kg]	2102.2	516.9	1535.4	785.2	1426.3	982.5	1132.1	445.7	1030	476.9	1550	326.1
PA [%]	30.98	31.90	25.47	33.6	53.54	35.80	42.04	33.60	22.03	32.9	63.91	31.8
Par [%]	23.91	39.80	19.64	44.6	19.81	41.50	19.53	44.90	26.21	43.4	32	37.7
PL [%]	45.11	28.30	54.89	21.8	26.65	22.70	38.43	21.50	51.76	23.7	4.09	30.5
Clase textural	F	F.Ar	F-L	Ar	F-A	Ar	F	Ar	F-L	Ar	F.Ar-A	F.Ar
DA [g/cm ³]	1.06	1.48	1.27	1.07	1.54	1.14	1.21	1.02	1.09	1.19	1.16	1.37
RH 0.3 [%]	32.13	28.48	31.18	44.18	47.55	40.58	38.83	50.03	32.22	35.44	29.06	32.75
RH 15 [%]	27.24	14.12	25.11	18.20	44.11	17.71	35.75	16.22	27.22	15.29	25.90	18.08
CH [cm/h]	0.20	0.28	0.40	2.15	0.80	1.57	0.11	2.00	0.36	2.19	0.09	1.11
SO ₄ [mg/l]	171.40	0.41	225.8	0.75	43.52	1.37	42.87	1.02	73.22	1.13	90.17	0.96
CO ₃ [mg/l]	0.00	<2,5	0	<2,5	0.00	<2,5	0.00	<2,5	0	<2,5	0	<2,5
NO ₃ [mg/l]	0.03	78.30	1	34.2	0.83	136.20	0.00	147.50	0.92	38.6	0.1	59.9
HCO ₃ [mg/l]	225.00	227.60	310	204.00	200.00	214.20	190.00	235.60	193	186.20	90	173.40
N-NH ₄ [mg/kg]	5.56	-	3.32	-	6.75	-	6.59	-	5.56	-	7.86	-
N-NO ₂ [mg/kg]	0.03	-	0.041	-	0.02	-	0.02	-	0	-	0	-

Donde, CE: conductividad eléctrica, CIC: capacidad de intercambio catiónico, P: fósforo, K: potasio, MO: materia orgánica, Ca: calcio, Mg: magnesio, Na: sodio, CO: carbono orgánico, NT: nitrógeno total. DA: densidad aparente, NT: nitrógeno total, CH: conductividad hidráulica, PA: porcentaje de arena, PAR: porcentaje arcilla, PL: porcentaje de limos, SO₄: sulfatos, NO₃: nitratos, CO₃: carbonatos, HCO₃: bicarbonatos, NH₄: amonio, NO₂: nitritos, RH: retención de humedad.

Tabla 32. Resultados de las propiedades fisicoquímicas de suelos en puntos priorizados, Ingenio Manuelita.

Parámetro	Rosario		Rosario		Real			Santa Anita		Real
	vp-pm-28		vp-pm-27		vp-pm-39			vp-pm-13		vp-pm-31
	2021	2022	2021	2022	2021	2022-I	2022	2021	2022	2022
pH	7.19	7.7	7.84	7.34	6.92	6.79	7.13	7.5	7.9	7.29
CE [dS/m]	0.68	0.266	0.58	0.093	0.38	0.57	0.155	0.78	0.191	0.137
MO [gr/100 gr]	4.45	3.75	2.67	3.21	3.65	4.31	3.79	2.48	3.41	3.71
Ca [meq/100 gr]	21.61	9.05	16.62	12.75	3.54	4.6	6.24	12.6	8.47	5.83
Mg [meq/100 gr]	8.37	2.76	5.68	3.16	2.7	3.64	2.50	8.93	2.86	2.53
K [meq/100 gr]	0.69	0.19	0.39	0.28	1.53	1.79	0.57	1.61	0.60	0.40
Na [meq/100 gr]	0.18	0.73	<0.14	0.66	0.75	0.88	0.53	2.12	0.54	0.61
CICE [cmol (+)/kg]	30.85	12.73	22.81	16.85	8.52	10.91	9.84	25.26	12.48	9.37
CO [gr/100 gr]	2.58	-	1.55	-	2.12	2.5	-	1.44	-	-
P [mg/kg]	214.2	24.49	233.72	27.2	79.87	66.02	22.23	72.28	12.98	18.08
CICA [cmol (+)/kg]	25.83	18.61	18.05	18.19	16.91	17.81	11.78	17.44	17.96	14.05
NT [mg/kg]	1684.5	1043.6	1157.7	817.3	1405.3	1260	1833.5	1458.7	401.8	1524.6
PA [%]	46.02	33.8	28.33	32.1	55.69	50.9	33.50	37.34	34.10	31.3
Par [%]	19.17	41.7	41.26	36.2	15.67	15.9	34.07	27.92	39.20	41.2
PL [%]	34.81	24.5	30.41	31.7	28.64	33.2	32.43	34.74	26.70	27.5
Clase textural	F	Ar	Ar	F.Ar	F-A	F	F.Ar	F.Ar	F.Ar	Ar
DA [g/cm ³]	1.24	1.08	1.18	1.31	1.24	1.36	1.44	1.34	1.27	1.10
RH 0.3 [%]	33.27	44.47	37.45	33.34	26.88	31.12	30.31	32.87	34.66	41.86
RH 15 [%]	28.80	16.31	30.90	16.47	23.35	28.19	15.66	28.73	15.28	14.87
CH [cm/h]	1.96	1.83	0.17	1.07	1.66	1.41	0.62	1.03	1.49	1.91
SO ₄ [mg/l]	188.9	2.05	58.84	2.61	122.30	166.50	3.61	123.10	0.89	2.38
CO ₃ [mg/l]	0	<2,5	0	<2,5	0.00	0.00	<2,5	0.00	<2,5	<2,5
NO ₃ [mg/l]	0	137.4	0	119.1	0.90	1.51	116.90	0.35	65.70	72.8
HCO ₃ [mg/l]	190	173.40	200	181.30	142.00	100.00	163.20	180.00	142.80	169.5
N-NH ₄ [mg/kg]	5.229	-	11.59	-	12.60	4.95	-	11.46	-	-
N-NO ₂ [mg/kg]	0.028	-	0.023	-	0.00	0.05	-	0.00	-	-

Donde, CE: conductividad eléctrica, CIC: capacidad de intercambio catiónico, P: fósforo, K: potasio, MO: materia orgánica, Ca: calcio, Mg: magnesio, Na: sodio, CO: carbono orgánico, NT: nitrógeno total. DA: densidad aparente, NT: nitrógeno total, CH: conductividad hidráulica, PA: porcentaje de arena, PAr: porcentaje arcilla, PL: porcentaje de limos, SO₄: sulfatos, NO₃: nitratos, CO₃: carbonatos, HCO₃: bicarbonatos, NH₄: amonio, NO₂: nitritos, RH: retención de humedad.

Tabla 33. Estadística descriptiva de propiedades del suelo en cultivos de caña de azúcar, Ingenio Manuelita.

Parámetro	Media	DE	Var	Min	Max
pH [Unidades]	7.60	0.53	0.27	6.79	8.69
CE [dS/m]	0.56	0.80	0.61	0.09	3.97
MO [%]	3.25	0.73	0.50	1.57	4.45
Ca [meq/100gr]	11.65	5.12	25.05	3.54	21.61
Mg [meq/100gr]	4.25	2.10	4.21	1.96	8.93
K [meq/100gr]	0.59	0.49	0.23	0.12	1.79
Na [meq/100gr]	0.85	0.71	0.47	0.18	3.26
P [mg/kg]	54.17	60.22	3462.05	1.47	233.72
CIC [cmol (+)/kg]	18.76	3.55	12.01	11.78	25.83
NT [mg/kg]	1131.65	499.35	238016.85	326.10	2102.20
DA [g/cm ³]	1.23	0.14	0.02	1.02	1.54
CH [cm/h]	1.11	0.74	0.52	0.09	2.19
SO ₄ [mg/L]	134.41	79.45	6025.23	39.38	346.78
HCO ₃ [mg/L]	185.96	45.91	2011.91	90.00	310.00

Donde, DE: desviación estándar, Var: varianza, CE: conductividad eléctrica, CIC: capacidad de intercambio catiónico, P: fósforo, K: potasio, MO: materia orgánica, Ca: calcio, Mg: magnesio, Na: sodio, NT: nitrógeno total. DA: densidad aparente, NT: nitrógeno total, CH: conductividad hidráulica, SO₄: sulfatos, HCO₃: bicarbonatos

Con base a los resultados obtenidos, en la Tabla 33 se observa la mayor y la menor variabilidad en los parámetros NT y densidad aparente, respectivamente. La variación en la presencia de nitrógeno total en el suelo se puede atribuir a los factores explicados con antelación. Así mismo, la variación en la presencia de sulfatos en el suelo entre un punto priorizado y otro, se puede atribuir a la aplicación y tipo de agua de riego, teniendo en cuenta que este factor afecta la acumulación de sales en el suelo, principalmente de cloruros y sulfatos (Castellon *et al.*, 2014).

Cabe resaltar que el análisis de parámetros se realizó teniendo en cuenta los valores promedios. Se observa que los puntos priorizados presentaron un valor medio (18.76 cmol/kg) según los rangos establecidos por ICA (1992). Es deseable que todo suelo reporte una CIC alta, de lo contrario se puede ver asociado a una saturación media de bases indicando, a su vez, una capacidad potencial moderada para suministrar Ca, Mg y K a las plantas (ICA, 1992).

La disponibilidad de macronutrientes (Ca, Mg y K) en los puntos priorizados (Figura 26), presentó condiciones deseables para el suelo, según los rangos propuestos por ICA (1992) (Ca > 6 meq/100 gr, Mg > 2.5 meq/100 gr, K > 0.4 meq/100 gr, alta disponibilidad de macronutrientes). Por otro lado, comparando los resultados de PSI (4.53%) con los rangos reportados por Massoud (1971), se estableció que los puntos priorizados pueden ser valorados como suelos no sódicos (PSI < 7%). Otro de los parámetros a resaltar es la disponibilidad de azufre (S) en el suelo, la cual reflejó una alta disponibilidad en los puntos priorizados (44.54 ppm). Por otra parte, al analizar los resultados obtenidos de pH (7.6) se logró caracterizar los suelos como alcalinos, condición que se puede relacionar con una

baja solubilidad del P y de micronutrientes (ICA, 1992). De igual forma, los suelos se clasificaron como no salinos (< 2 dS/m) con base a los resultados de CE (0.56 dS/m).

Por su parte, los suelos presentaron un alto contenido de MO (3.25%) según los rangos reportados por ICA (1992). Este tipo de característica hace que los suelos tiendan a presentar mejoras en sus propiedades físicas, una alta capacidad amortiguadora (Buffer) así como un menor requerimiento de nitrógeno (ICA, 1992; Cenicaña, 1995).

Al analizar las propiedades físicas de los suelos, los resultados reportados de DA permiten clasificar los puntos priorizados como suelos de textura media (DA: 1.2 – 1.6 gr/cm³) (Salamanca y Sadeghian, 2005).

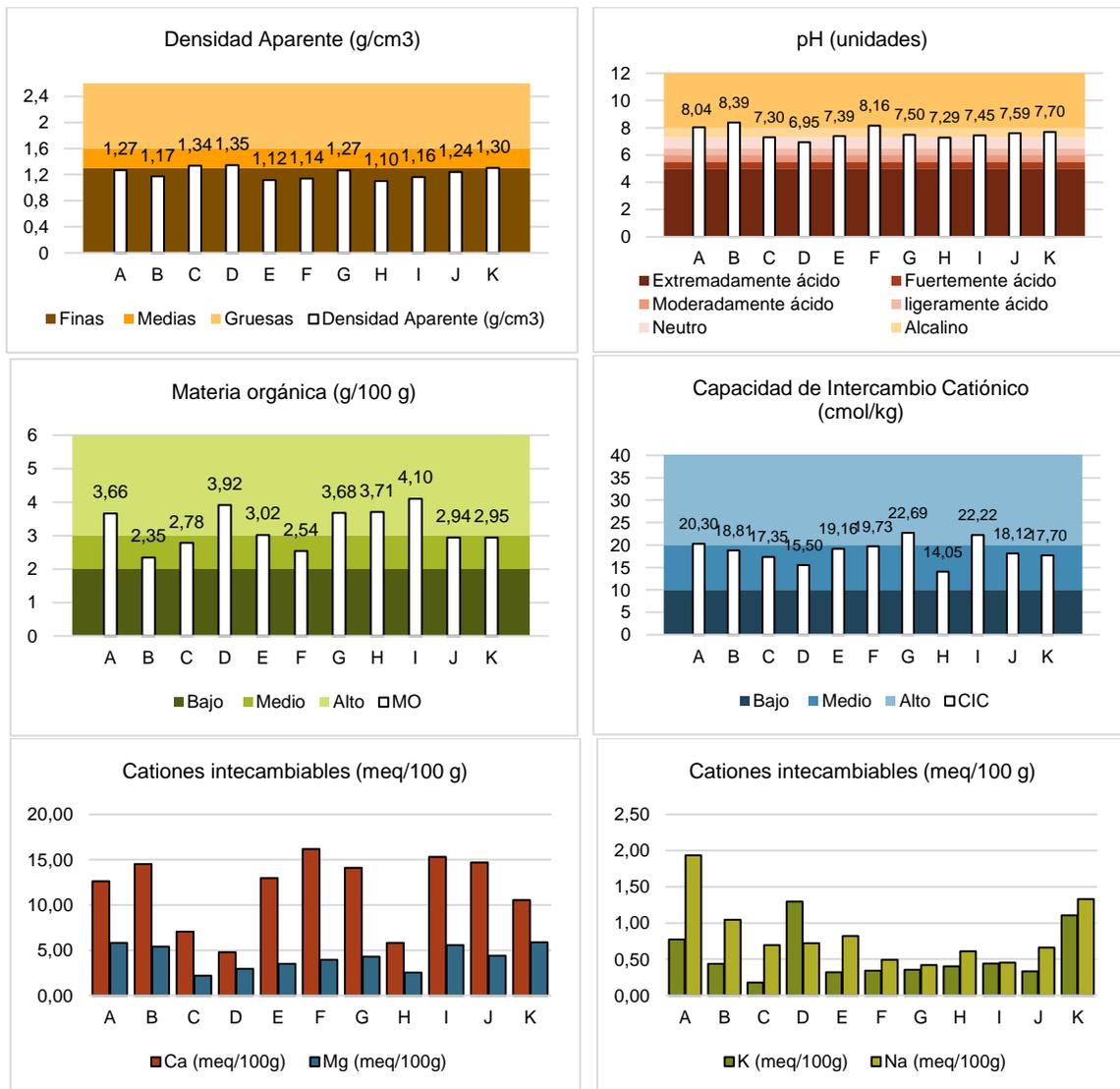


Figura 26. Resultados de propiedades fisicoquímicas del suelo en puntos priorizados asociados al Ingenio Manuelita.

Donde, A: Florencia, B: Soledad, C: Olga-76, D: Real-39, E: Olga-46, F: Josepilla, G: Malimbu, H: Real-31, I: Rosario-28, J: Rosario-27, K: Santa Anita.

6.2. ANÁLISIS DE LA CALIDAD DEL AGUA SUBTERRÁNEA EN POZOS PRIORIZADOS EN CULTIVOS DE CAÑA DE AZÚCAR

El monitoreo de aguas subterráneas incluyó el análisis de variables como: pH, conductividad eléctrica, fósforo disuelto, bicarbonatos, cloruros, sulfatos, nitratos, potasio, calcio, magnesio, sodio, nitrógeno total, hierro total y manganeso. Se realizó el análisis de la calidad de agua en 42 pozos priorizados por la CVC ubicados en los predios de 6 ingenios azucareros, sembrados con cultivos de caña de azúcar, en 6 municipios del Valle del Cauca (Tablas 34, 35, 37, 38, 40, 41, 43, 45, 47, 48).

En las Tablas 36, 39, 42, 44, 46 y 49 se presenta la estadística descriptiva de los resultados asociados a parámetros en agua subterránea tomada de los pozos priorizados por la CVC. Se presenta el resumen del conjunto de los datos en un valor que los represente, así como el comportamiento y dispersión de los mismos.

6.2.1. Resultados calidad de agua subterránea en pozos priorizados en predios del Ingenio Rio Paila

Las tablas 34 y 35 presentan los resultados para las vigencias 2021 y 2022, de los análisis fisicoquímicos de agua subterránea en pozos priorizados en predios cultivados con caña de azúcar del Ingenio Rio Paila. La Tabla 36 incluye la estadística descriptiva para los sitios evaluados.

Tabla 34. Resultados de la calidad del agua subterránea en puntos priorizados, Ingenio Rio Paila.

Parámetro	Cecilia vbg-pm-05		Margarita Floresta vbg-pm-06		Gertrudis vbg-pm-07	
	2021	2022-II	2021	2022-II	2021	2022-II
pH						
[Unidades de pH]	7.76	7.26	7.84	7.97	7.11	6.85
CE [μ S/cm]	852	337	518	476	386	345
CO ₃ [mg/L]	< 6.04	< 6.04	< 6.04	< 6.04	< 6.04	< 6.04
HCO ₃ [mg/L]	651	371	290	282	226	186
Ca [mg/L]	112	50.4	64.2	39.6	32.9	28
Mg [mg/L]	64.9	18.7	36	16	0.236	10.4
Cl [mg/L]	< 9.9	< 9.9	< 9.9	< 9.9	< 9.9	< 9.9
SO ₄ [mg/L]	14.3	< 5.0	9.59	8.43	11.6	10.3
NO ₃ [mg/L]	< 0.226	0.37	0.271	0.382	< 0.226	0.348
NT [mg/L]	< 0.5	1.28	< 0.5	< 0.5	1.8	2.68
NH ₄ [mg/L]	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1
Fenoles [mg/L]	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1
K [mg/L]	1.28	2.17	0.724	0.905	1.49	1.97
Na [mg/L]	17.2	16	5.73	7.4	7.75	12.2
Fe [mg/L]	< 0.2	1.12	< 0.2	1.18	< 0.2	0.286
Mn [mg/L]	0.352	0.352	0.17	< 0.1	0.453	0.405
COT [mg/L]	< 2	1.28	< 2	0.96	< 2	0.77
Al [mg/L]	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1
PO ₄ [mg/L]	0.345	0.253	0.153	0.152	0.337	0.301

Donde, CE: conductividad eléctrica, P: fósforo, K: potasio, COT: carbono orgánico total, Ca: calcio, Mg: magnesio, Na: sodio, NT: nitrógeno total, PO₄: fosfatos, NT: nitrógeno total, Al: aluminio, Mn: manganeso, Fe: hierro, SO₄: sulfatos, NO₃: nitratos, CO₃: carbonatos, HCO₃: bicarbonatos, NH₄: amonio, NO₂: nitritos.

Tabla 35. Resultados de la calidad del agua subterránea en puntos priorizados, Ingenio Río Paila.

Parámetro	Golfo vbg-pm-09			Golfo vbg-pm-10		Samaria vbg-pm-08	
	2021	2022-I	2022-II	2021	2022-II	2021	2022-II
pH							
[Unidades de pH]	7.28	7.37	8.24	7.51	7.49	8.04	8.11
CE [μ S/cm]	650	672	561	678	579	448	396
CO ₃ [mg/L]	< 6.04	< 6.04	< 6.04	< 6.04	< 6.04	< 6.04	< 6.04
HCO ₃ [mg/L]	501	408	357	362	390	310	232
Ca [mg/L]	53.7	58.5	41.8	92.3	42.7	43.2	40.4
Mg [mg/L]	51	45.6	19	49.1	18.6	24.5	21.8
Cl [mg/L]	< 9.9	< 9.9	< 9.9	< 9.9	< 9.9	< 9.9	< 9.9
SO ₄ [mg/L]	20.5	< 5.0	< 5.0	5	< 5.0	11.9	< 5.0
NO ₃ [mg/L]	0.378	0.355	0.373	0.734	0.391	0.267	0.36
NT [mg/L]	< 0.5	< 0.5	0.62	0.7	0.795	< 0.5	0.556
NH ₄ [mg/L]	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1
Fenoles [mg/L]	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1
K [mg/L]	4.17	3.97	4.45	3.5	3.56	1.36	1.29
Na [mg/L]	16.7	20	20.7	18.1	20	8.85	9.6
Fe [mg/L]	2.17	3.17	1.46	2.18	4.44	< 0.2	0.623
Mn [mg/L]	< 0.1	1.04	0.451	0.886	0.93	1.09	< 0.1
COT [mg/L]	< 2	< 0.5	1.59	3.51	2.17	< 2	1.28
Al [mg/L]	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1
PO ₄ [mg/L]	0.812	0.723	0.764	0.803	0.807	0.395	0.381

Donde, CE: conductividad eléctrica, P: fósforo, K: potasio, COT: carbono orgánico total, Ca: calcio, Mg: magnesio, Na: sodio, NT: nitrógeno total, PO₄: fosfatos, NT: nitrógeno total, Al: aluminio, Mn: manganeso, Fe: hierro, SO₄: sulfatos, NO₃: nitratos, CO₃: carbonatos, HCO₃: bicarbonatos, NH₄: amonio, NO₂: nitritos.

Tabla 36. Estadística descriptiva de propiedades en aguas subterráneas en pozos ubicados en cultivos de caña, Ingenio Río Paila.

Parámetro	Media	DE	Var	Min	Max
pH					
[Unidades]	7.60	0.43	0.17	6.85	8.24
CE [μ S/cm]	530.62	153.69	21804.54	337.00	852.00
HCO ₃ [mg/L]	351.23	124.16	14230.79	186.00	651.00
Ca [mg/L]	53.82	23.93	528.81	28.00	112.00
Mg [mg/L]	28.91	18.77	325.38	0.24	64.90
K [mg/L]	2.37	1.35	1.69	0.72	4.45
Na [mg/L]	13.86	5.44	27.32	5.73	20.70
PO ₄ [mg/L]	0.48	0.26	0.06	0.15	0.81

Donde, CE: conductividad eléctrica, K: potasio, Ca: calcio, Mg: magnesio, Na: sodio, PO₄: fosfatos, HCO₃: bicarbonatos, DE: desviación estándar, Var: varianza, Min: valor mínimo, Max: valor máximo.

De acuerdo con la información presentada en la Tabla 36 se observa la mayor y la menor variabilidad de los datos para los parámetros CE y fosfatos, respectivamente. Las variaciones presentadas en CE entre un punto priorizado y otro se pueden atribuir a los aportes de aguas externas, la incidencia de fuentes nitrogenadas, la liberación de nitrógeno por el mineral que compone los suelos y el entorno hidrogeológico de la zona (Zhang *et al.*, 2022). Así mismo, las variaciones en la concentración de bicarbonatos y otro tipo de aniones o cationes dependen esencialmente de la relación con otras fuentes de agua y su historia previa (tipo de suelo, atmósfera, zona saturada y no saturada) (Cerón *et al.*, 2021).

La solución transportadora de nutrientes que percola en el suelo es por necesidad eléctricamente neutra, por lo tanto, los aniones se lixivian junto con los cationes en cantidades equivalentes, siendo el Ca y el Mg los cationes que tienden a percolar en mayor medida (Lehmann y Schroth, 2003). Por su parte, las fuentes principales de acumulación de fosfatos son las rocas y el sustrato en que se localiza el cuerpo de agua además de los fertilizantes de origen antrópico. Adicionalmente, se puede mencionar que el Mn es el único parámetro que excede el valor típico reportado en el Decreto 1076 de 2015, agua para uso agrícola, en ciertos pozos (Véase Anexo Ficha Punto Priorizado).

Los resultados del parámetro pH reflejaron un valor de 7.6, indicando una tendencia “neutra” y cumpliendo con el criterio normativo del Decreto 1076 de 2015 (4.5 – 9.0 Unidades de pH). Por otro lado, teniendo en cuenta el valor de conductividad eléctrica y los rangos reportados por Meneses et al. (2019), el agua subterránea de los pozos se clasificó con mineralización media – acentuada (333 – 666 $\mu\text{S}/\text{cm}$). Estos valores indican un alto contenido de iones y sales disueltas, lo cual es una condición típica de las aguas subterráneas.

Otro de los indicadores de calidad del agua subterránea, empleada en actividades agrícolas, es la relación de absorción de sodio (RAS). Este indicador permite estimar la toxicidad por sodio, así como su dependencia o relación con los niveles de calcio y magnesio (Betancourt, 2016). Al realizar el cálculo con los resultados obtenidos para el (RAS: 0.38), se puede mencionar que el agua representa un riesgo bajo de sodicidad para el suelo, así como un excelente criterio de calidad para su uso en riego (RAS < 10).

6.2.2. Resultados calidad de agua subterránea en pozos priorizados en predios del Ingenio Mayagüez

Las tablas 37 y 38 presentan los resultados para las vigencias 2021 y 2022, de los análisis fisicoquímicos de agua subterránea en pozos priorizados en predios cultivados con caña de azúcar del Ingenio Mayagueza. La Tabla 39 incluye la estadística descriptiva para los sitios evaluados.

Tabla 37. Resultados de la calidad del agua subterránea en puntos priorizados, Ingenio Mayagüez.

Parámetro	Cofre		Barbarita		Unión		Zainera			Zainera	
	vcn-pm-18	vcn-pm-18	vcn-pm-16	vcn-pm-16	vcn-pm-15	vcn-pm-15	vcn-pm-27	vcn-pm-27	vcn-pm-27	vcn-pm-29	vcn-pm-29
	2021	2022-II	2021	2022-II	2021	2022-II	2021	2022-I	2022-II	2021	2022-II
pH											
[Unidades de pH]	7.47	7	7.51	7.4	7.66	7.15	7.64	7.1	7.2	8.1	7.1
CE [μ S/cm]	628	561	939	765	1140	905	978	950	802	587	696
CO ₃ [mg/L]	< 6.04	< 6.04	< 6.04	< 6.04	< 6.04	< 6.04	< 6.04	< 6.04	< 6.04	< 6.04	< 6.04
HCO ₃ [mg/L]	388	328	526	515	644	496	609	495	494	341	376
Ca [mg/L]	90	71.9	152	117	163	130	129	138	112	123	120
Mg [mg/L]	27.4	16	36.5	27.8	42	48.3	44.1	18.3	38.6	22.1	23.9
Cl [mg/L]	< 9.9	10.9	< 9.9	13.3	30.4	26.7	< 9.9	< 9.9	11.9	14.5	18.8
SO ₄ [mg/L]	11	9.05	40.1	35.4	62.3	37.3	43.9	59.4	49.6	38.8	35.5
NO ₃ [mg/L]	< 0.226	0.376	< 0.226	0.329	< 0.226	0.354	< 0.226	< 0.226	0.37	< 0.226	0.339
NT [mg/L]	< 0.5	< 0.5	< 0.5	0.67	7.8	6.39	2.5	2.8	3.09	0.6	< 0.5
NH ₄ [mg/L]	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1
Fenoles [mg/L]	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	0.896	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1
K [mg/L]	0.998	1.22	1.05	1.31	0.916	1.15	0.817	1.03	0.567	0.982	1
Na [mg/L]	23.4	32.1	24.8	0.357	38.6	51.9	27.1	32.2	30.1	11.9	19.4
Fe [mg/L]	0.242	9.93	< 0.2	0.259	< 0.2	< 0.2	0.536	< 0.2	0.334	< 0.2	< 0.2
Mn [mg/L]	1.6	1.78	1.55	1.37	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1
COT [mg/L]	< 2	2.39	< 2	2.26	< 2	2.08	< 2	1.18	2.2	< 2	2.56
Al [mg/L]	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1
PO ₄ [mg/L]	0.332	0.427	0.436	0.763	0.0993	0.096	< 0.07	< 0.07	< 0.07	0.197	0.105

Donde, CE: conductividad eléctrica, P: fósforo, K: potasio, COT: carbono orgánico total, Ca: calcio, Mg: magnesio, Na: sodio, NT: nitrógeno total, PO₄: fosfatos, NT: nitrógeno total, Al: aluminio, Mn: manganeso, Fe: hierro, SO₄: sulfatos, NO₃: nitratos, CO₃: carbonatos, HCO₃: bicarbonatos, NH₄: amonio, NO₂: nitritos.

Tabla 38. Resultados de la calidad del agua subterránea en puntos priorizados, Ingenio Mayaguez.

Parámetro	Casa de Teja vcn-pm-17		Arenal vcn-pm-19		Esmeralda vcn-pm-30		Esmeralda vcn-pm-33	
	2021	2022-II	2021	2022-II	2021	2022-II	2021	2022-II
pH								
[Unidades de pH]	7.23	6.89	6.77	6.75	7.76	6.91	7.28	6.75
CE [μ S/cm]	383	243	336	292	416	354	441	420
CO ₃ [mg/L]	< 6.04	< 6.04	< 6.04	< 6.04	< 6.04	< 6.04	< 6.04	< 6.04
HCO ₃ [mg/L]	197	195	197	181	201	153	224	264
Ca [mg/L]	45.7	32.7	44.6	32.8	53.8	36	61.6	52.5
Mg [mg/L]	18.6	9.95	13	7.48	16.9	7.74	17.6	13.2
Cl [mg/L]	< 9.9	< 9.9	< 9.9	< 9.9	< 9.9	< 9.9	< 9.9	11.4
SO ₄ [mg/L]	26.4	15.5	10	9.94	23.5	17.6	30.3	25.5
NO ₃ [mg/L]	< 0.226	0.388	< 0.226	0.342	< 0.226	0.398	< 0.226	0.364
NT [mg/L]	1.4	1.08	< 0.5	< 0.5	4.4	2.8	< 0.5	1.19
NH ₄ [mg/L]	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1
Fenoles [mg/L]	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1
K [mg/L]	0.668	0.818	0.475	0.567	0.401	0.68	0.695	0.848
Na [mg/L]	10.2	13.6	12.7	14.2	0.098	11	0.103	17.4
Fe [mg/L]	< 0.2	0.293	< 0.2	0.222	< 0.2	0.27	1.19	1.1
Mn [mg/L]	0.788	0.304	1.2	0.954	< 0.1	< 0.1	2.49	< 0.1
COT [mg/L]	< 2	2.15	< 2	1.2	< 2	1.74	< 2	3.47
Al [mg/L]	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1
PO ₄ [mg/L]	0.232	0.189	0.15	0.152	< 0.07	0.0798	0.282	0.269

Donde, CE: conductividad eléctrica, P: fósforo, K: potasio, COT: carbono orgánico total, Ca: calcio, Mg: magnesio, Na: sodio, NT: nitrógeno total, PO₄: fosfatos, NT: nitrógeno total, Al: aluminio, Mn: manganeso, Fe: hierro, SO₄: sulfatos, NO₃: nitratos, CO₃: carbonatos, HCO₃: bicarbonatos, NH₄: amonio, NO₂: nitritos.

Tabla 39. Estadística descriptiva de propiedades en aguas subterráneas en pozos ubicados en cultivos de caña de azúcar, Ingenio Mayaguez.

Parámetro	Media	DE	Var	Min	Max
pH					
[Unidades]	7.25	0.38	0.13	6.75	8.10
CE [μ S/cm]	622.95	271.40	69778.68	243.00	1140.00
HCO ₃ [mg/L]	359.16	259.79	24188.03	153.00	644.00
Ca [mg/L]	89.77	44.19	1849.72	32.70	163.00
Mg [mg/L]	23.66	12.70	152.88	7.48	48.30
K [mg/L]	0.85	0.25	0.06	0.40	1.31
Na [mg/L]	19.53	13.74	178.80	0.10	51.90
PO ₄ [mg/L]	0.25	0.18	0.03	0.08	0.76

Donde, CE: conductividad eléctrica, K: potasio, Ca: calcio, Mg: magnesio, Na: sodio, PO₄: fosfatos, HCO₃: bicarbonatos, DE: desviación estándar, Var: varianza, Min: valor mínimo, Max: valor máximo.

De acuerdo a la información presentada en la Tabla 39 se observa la mayor y la menor variabilidad de los datos para los parámetros CE y fosfatos, respectivamente. Las variaciones de CE que se presenta en el agua subterránea entre un punto priorizado y otro se pueden atribuir de forma similar a lo estipulado con antelación. Adicionalmente, la concentración de ciertos aniones y cationes se encuentra por encima del comportamiento histórico de los datos. De forma similar, se puede mencionar que el Mn es el único parámetro que excede el valor típico reportado en el Decreto 1076 de 2015, agua para uso agrícola, en ciertos pozos (Véase Anexo Ficha Punto Priorizado).

Los resultados del parámetro pH para los doce pozos de monitoreo reflejó un valor de 7.25, indicando una tendencia “neutra” y cumpliendo con el criterio normativo del Acuerdo Decreto 1076 de 2015 (4.5 – 9.0 Unidades de pH). Por otro lado, teniendo en cuenta los valores de conductividad eléctrica y los rangos reportados por Meneses et al. (2019), el agua subterránea se catalogó como mineralizada media – acentuada (333 – 666 $\mu\text{S}/\text{cm}$). Estos valores indican un alto contenido de iones y sales disueltas, lo cual es una condición típica de las aguas subterráneas. Otro de los indicadores de calidad del agua subterránea, empleada en actividades agrícolas, es la relación de absorción de sodio (RAS). Al realizar el cálculo con los resultados obtenidos para el (RAS: 0.48), se puede mencionar que el agua representa un riesgo bajo de sodicidad para el suelo, así como un excelente criterio de calidad para su uso en riego (RAS < 10).

6.2.3. Resultados calidad de agua subterránea en pozos priorizados en predios del Ingenio Providencia

Las tablas 40 y 41 presentan los resultados para las vigencias 2021 y 2022, de los análisis fisicoquímicos de agua subterránea en pozos priorizados en predios cultivados con caña de azúcar del Ingenio Rio Paila. La Tabla 42 incluye la estadística descriptiva para los sitios evaluados.

Tabla 40. Resultados de la calidad del agua subterránea en puntos priorizados, Ingenio Providencia.

Parámetro	Alizal vce-pm-23		Alizal vce-pm-22		Aurora vce-pm-11		Ceiba vce-pm-10		Marsella vce-pm-09	
	2021	2022-II	2021	2022-II	2021	2022-II	2021	2022-II	2021	2022-II
pH										
[Unidades de pH]	7.36	7.29	7.44	7.32	6.69	7.21	7.43	7.48	7.26	7.49
CE [$\mu\text{S}/\text{cm}$]	713	771	604	669	564	615	522	537	637	687
CO ₃ [mg/L]	< 6.04	< 6.04	< 6.04	< 6.04	< 6.04	< 6.04	< 6.04	< 6.04	< 6.04	< 6.04
HCO ₃ [mg/L]	452	413	423	362	334	292	364	297	403	464
Ca [mg/L]	116	114	72.1	89.1	88.2	94.5	42.5	74.3	75.1	75.5
Mg [mg/L]	56.6	12.8	53.1	12.2	38.4	22	39.4	9.38	44.2	10.8
Cl [mg/L]	17	18.3	14.5	15.8	16	17.3	< 9.9	11.9	12	12.4
SO ₄ [mg/L]	53.3	42.5	42.9	37.4	41.7	29	28.9	20.6	44.5	36.1
NO ₃ [mg/L]	< 0.226	0.376	< 0.226	0.339	< 0.226	0.326	< 0.226	0.373	< 0.226	0.382
NT [mg/L]	0.7	< 0.5	1.4	0.692	2.9	2.56	0.7	1.36	2.7	2.13
NH ₄ [mg/L]	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1
Fenoles [mg/L]	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	0.921	< 0.1
K [mg/L]	1.3	1.16	1	0.993	1.08	1.74	1.73	1.58	0.606	0.708
Na [mg/L]	13.2	13.7	11	12.8	9.15	11	9.61	9.5	39.6	35.7
Fe [mg/L]	0.395	< 0.2	< 0.2	0.805	0.626	7.23	< 0.2	< 0.2	< 0.2	0.224
Mn [mg/L]	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1
COT [mg/L]	< 2	1.84	< 2	2.16	< 2	2.22	< 2	2.17	< 2	2.03
Al [mg/L]	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	2.41	< 1	< 1	< 1	< 1
PO ₄ [mg/L]	0.161	0.176	0.151	0.128	0.0867	0.0798	0.203	0.187	0.0993	0.109

Donde, CE: conductividad eléctrica, P: fósforo, K: potasio, COT: carbono orgánico total, Ca: calcio, Mg: magnesio, Na: sodio, NT: nitrógeno total, PO₄: fosfatos, NT: nitrógeno total, Al: aluminio, Mn: manganeso, Fe: hierro, SO₄: sulfatos, NO₃: nitratos, CO₃: carbonatos, HCO₃: bicarbonatos, NH₄: amonio, NO₂: nitritos.

Tabla 41. Resultados de la calidad del agua subterránea en puntos priorizados, Ingenio Providencia.

Parámetro	Union Molina vce-pm-08		Santa Lucía vce-pm-19			Santa Lucía vce-pm-30		Santa Lucía vce-pm-28	
	2021	2022-II	2021	2022-I	2022-II	2021	2022-II	2021	2022-II
pH									
[Unidades de pH]	7.19	7.16	7.38	7.14	7.06	7.46	6.98	6.9	7.02
CE [μ S/cm]	924	731	702	773	637	723	635	889	635
CO ₃ [mg/L]	< 6.04	< 6.04	< 6.04	< 6.04	< 6.04	< 6.04	< 6.04	< 6.04	< 6.04
HCO ₃ [mg/L]	482	376	319	383	320	297	427	394	315
Ca [mg/L]	66.1	76.5	83	89.2	97.5	57	69.8	85.8	82
Mg [mg/L]	73.9	9.15	37.4	37.5	31.2	23.2	15	37.7	25.6
Cl [mg/L]	18.2	16.3	16.1	16.6	18.8	17.3	20.8	71.1	33.1
SO ₄ [mg/L]	52.8	41	32.9	85.7	37.5	21.6	25.4	< 5	40.6
NO ₃ [mg/L]	< 0.226	0.351	0.326	0.311	0.345	0.817	0.354	0.298	0.329
NT [mg/L]	5.6	5.26	0.8	< 0.5	< 0.5	< 0.5	< 0.5	3.6	0.824
NH ₄ [mg/L]	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1
Fenoles [mg/L]	< 0.1	< 0.1	< 0.1	0.128	< 0.1	< 0.1	< 0.1	0.265	< 0.1
K [mg/L]	2.69	6.31	0.822	0.753	0.508	3.76	7.68	2.47	13.5
Na [mg/L]	39.7	25	9.98	11.4	11.9	6.13	7.1	5.8	8.45
Fe [mg/L]	0.508	5.15	< 0.2	< 0.2	< 0.2	2.83	4.3	11.6	2.77
Mn [mg/L]	0.145	< 0.1	0.857	1.35	0.837	0.749	0.86	1.5	1.01
COT [mg/L]	< 2	4.21	< 2	< 0.5	1.93	< 2	3.77	< 0.5	9.42
Al [mg/L]	< 1	2.28	< 1	< 1	< 1	2.4	1.88	12.7	1.53
PO ₄ [mg/L]	0.162	0.211	0.139	0.119	< 0.07	0.261	0.251	2.47	0.483

Donde, CE: conductividad eléctrica, P: fósforo, K: potasio, COT: carbono orgánico total, Ca: calcio, Mg: magnesio, Na: sodio, NT: nitrógeno total, PO₄: fosfatos, NT: nitrógeno total, Al: aluminio, Mn: manganeso, Fe: hierro, SO₄: sulfatos, NO₃: nitratos, CO₃: carbonatos, HCO₃: bicarbonatos, NH₄: amonio, NO₂: nitritos.

Tabla 42. Estadística descriptiva de propiedades en aguas subterráneas en pozos ubicados en cultivos de caña de azúcar, Ingenio Providencia.

Parámetro	Media	DE	Var	Min	Max
pH					
[Unidades]	7.22	0.22	0.05	6.69	7.49
CE [μ S/cm]	682.53	106.15	10675.62	522.00	924.00
HCO ₃ [mg/L]	374.58	59.51	3355.09	292.00	482.00
Ca [mg/L]	81.48	17.63	294.31	42.50	116.00
Mg [mg/L]	31.03	18.07	309.29	9.15	73.90
K [mg/L]	2.65	3.27	10.10	0.51	13.50
Na [mg/L]	15.30	11.04	115.46	5.80	39.70
PO ₄ [mg/L]	0.30	0.55	0.28	0.08	2.47

Donde, CE: conductividad eléctrica, K: potasio, Ca: calcio, Mg: magnesio, Na: sodio, PO₄: fosfatos, HCO₃: bicarbonatos, DE: desviación estándar, Var: varianza, Min: valor mínimo, Max: valor máximo.

Con base a la información presentada en la Tabla 42 se observa la mayor y la menor variabilidad de los datos para los parámetros CE y pH, respectivamente. Las variaciones presentadas en CE entre un punto priorizado y otro se pueden atribuir a los aportes de aguas externas, la incidencia de fuentes nitrogenadas, la liberación de nitrógeno por el mineral que compone los suelos y el entorno hidrogeológico de la zona (Zhang *et al.*, 2022).

Así mismo, las variaciones en la concentración de bicarbonatos y otro tipo de aniones o cationes dependen esencialmente de la relación con otras fuentes de agua y su historia previa (tipo de suelo, atmósfera, zona saturada y no saturada) (Cerón *et al.*, 2021).

Adicionalmente, la concentración de ciertos aniones y cationes se encuentra por encima del comportamiento histórico de los datos. De forma similar, se puede mencionar que el Fe y el Mn son los parámetros que exceden los valores típicos reportados en el Decreto 1076 de 2015, agua para uso agrícola, en ciertos pozos.

Los resultados de pH para los pozos de monitoreo reflejaron un valor promedio de 7.22, indicando una tendencia “neutra” y cumpliendo con el criterio normativo del Decreto 1076 de 2015 (4.5 – 9.0 Unidades de pH). Por otro lado, teniendo en cuenta los valores de conductividad eléctrica y los rangos reportados por Meneses *et al.* (2019), el agua subterránea de los pozos se catalogó con mineralización importante (666 – 1000 $\mu\text{S}/\text{cm}$). Estos valores indican un alto contenido de iones y sales disueltas, lo cual es una condición típica de las aguas subterráneas.

Otro de los indicadores de calidad del agua subterránea, empleada en actividades agrícolas, es la relación de absorción de sodio (RAS). Al realizar el cálculo con los resultados obtenidos para el (RAS: 0.37), se puede mencionar que el agua representa un riesgo bajo de sodicidad para el suelo, así como un excelente criterio de calidad para su uso en riego (RAS < 10).

6.2.4. Resultados calidad de agua subterránea en pozos priorizados en predios del Ingenio Risaralda

La tabla 43 presenta los resultados para las vigencias 2021 y 2022, de los análisis fisicoquímicos de agua subterránea en pozos priorizados en predios cultivados con caña de azúcar del Ingenio Risaralda. La Tabla 44 incluye la estadística descriptiva para los sitios evaluados.

Tabla 43. Resultados de la calidad del agua subterránea en puntos priorizados, Ingenio Risaralda.

Parámetro	Cabuyas vcr-pm-31		Cabuyas vcr-pm-30		
	2021	2022-II	2021	2022-I	2022-II
	pH [Unidades de pH]	7.39	7.04	7.76	7.01
CE [$\mu\text{S}/\text{cm}$]	260	2432	587	1037	384
CO ₃ [mg/L]	< 6.04	< 6.04	< 6.04	< 6.04	< 6.04
HCO ₃ [mg/L]	432	385	486	399	232
Ca [mg/L]	284	255	68.5	63.5	26.4
Mg [mg/L]	193	101	51.8	33.8	0.974
Cl [mg/L]	< 9.9	14.5	< 9.9	< 9.9	< 9.9
SO ₄ [mg/L]	1043	2452	92.4	114	32.7
NO ₃ [mg/L]	< 0.226	0.395	0.518	0.356	0.385
NT [mg/L]	3.3	3.56	1.8	1.7	0.862

NH ₄ [mg/L]	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1
Fenoles [mg/L]	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1
K [mg/L]	15.8	15.9	5.81	6.47	1.7
Na [mg/L]	107	134	42.8	53.8	18.3
Fe [mg/L]	1.07	0.591	1.35	1.12	0.974
Mn [mg/L]	7.34	6.41	1.24	1.58	0.192
COT [mg/L]	< 2	8.96	< 2	< 0.5	7.26
Al [mg/L]	< 1	< 1	< 1	< 1	1.9
PO ₄ [mg/L]	1.12	0.835	1.2	1.07	0.436

Donde, CE: conductividad eléctrica, P: fósforo, K: potasio, COT: carbono orgánico total, Ca: calcio, Mg: magnesio, Na: sodio, NT: nitrógeno total, PO₄: fosfatos, NT: nitrógeno total, Al: aluminio, Mn: manganeso, Fe: hierro, SO₄: sulfatos, NO₃: nitratos, CO₃: carbonatos, HCO₃: bicarbonatos, NH₄: amonio, NO₂: nitritos.

Tabla 44. Estadística descriptiva de propiedades en aguas subterráneas en pozos ubicados en cultivos de caña de azúcar, Ingenio Risaralda.

Parámetro	Media	DE	Var	Min	Max
pH	7.18	0.40	0.13	6.72	7.76
[Unidades]					
CE [μS/cm]	940.00	884.82	626323.60	260.00	2432.00
HCO ₃ [mg/L]	386.80	94.87	7199.76	232.00	486.00
Ca [mg/L]	139.48	120.24	111565.82	26.40	284.00
Mg [mg/L]	76.11	74.68	4461.86	0.97	193.00
K [mg/L]	9.14	6.40	32.72	1.70	15.90
Na [mg/L]	71.18	47.78	1826.64	18.30	134.00
PO ₄ [mg/L]	0.93	0.31	0.08	0.44	1.20
SO ₄ [mg/L]	746.82	1040.92	866811.10	32.70	2452.00
Fe [mg/L]	1.02	0.28	0.06	0.59	1.35
Mn [mg/L]	3.35	3.27	8.57	0.19	7.34

Donde, CE: conductividad eléctrica, K: potasio, Ca: calcio, Mg: magnesio, Na: sodio, PO₄: fosfatos, HCO₃: bicarbonatos, Mn: manganeso, Fe: hierro total, DE: desviación estándar, Var: varianza, Min: valor mínimo, Max: valor máximo.

De acuerdo a la información presentada en la Tabla 44 se observa la mayor y la menor variabilidad de los datos para los parámetros sulfatos y Fe, respectivamente. La variación en la concentración de sulfatos en el agua subterránea entre un punto priorizado y otro se puede atribuir a la aplicación y tipo de agua de riego, teniendo en cuenta que este factor afecta la acumulación de sales, principalmente de cloruros y sulfatos (Castellon *et al.*, 2014). Adicionalmente, se puede mencionar que el Mn y los sulfatos son los parámetros que, en promedio, exceden el valor típico reportado en el Decreto 1076 de 2015, agua para uso agrícola y consumo humano con desinfección, respectivamente.

Los valores obtenidos de pH para los pozos de monitoreo reflejaron un valor de 7.18, indicando una tendencia “neutra” y cumpliendo con el criterio normativo del Decreto 1076 de 2015 (4.5 – 9.0 Unidades de pH). Por otro lado, teniendo en cuenta los valores de conductividad eléctrica y los rangos reportados por Meneses *et al.* (2019), el agua subterránea fue clasificada con mineralización importante (666 – 1000 μS/cm). Estos

valores indican un alto contenido de iones y sales disueltas, lo cual es una condición típica de las aguas subterráneas.

Otro de los indicadores de calidad del agua subterránea, empleada en actividades agrícolas, es la relación de absorción de sodio (RAS). Al realizar el cálculo con los resultados obtenidos para el (RAS: 1.20), se puede mencionar que el agua representa un riesgo bajo de sodicidad para el suelo, así como un excelente criterio de calidad para su uso en riego (RAS < 10).

6.2.5. Resultados calidad de agua subterránea en pozos priorizados en predios del Ingenio del Cauca

La tabla 45 presenta los resultados para las vigencias 2021 y 2022, de los análisis físicoquímicos de agua subterránea en pozos priorizados en predios cultivados con caña de azúcar del Ingenio Rio Paila. La Tabla 46 incluye la estadística descriptiva para los sitios evaluados.

Tabla 45. Resultados de la calidad del agua subterránea en puntos priorizados, Ingenio Incauca.

Parámetro	Las Palmas		Florencia		Aranjuez		Egipto			Egipto	
	vcn-pm-63		vcn-pm-65		vcn-pm-64		vj-pm-09			vj-pm-11	
	2021	2022-II	2021	2022-II	2021	2022-II	2021	2022-I	2022-II	2021	2022-II
pH [Unidades de pH]	8.16	7.44	7.63	7.71	7.7	6.78	6.38	6.42	6.24	6.66	6.48
CE [μ S/cm]	721	708	301	422	498	466	277	272	277	267	308
CO ₃ [mg/L]	< 6.04	< 6.04	< 6.04	< 6.04	< 6.04	< 6.04	< 6.04	< 6.04	< 6.04	< 6.04	< 6.04
HCO ₃ [mg/L]	381	371	361	223	280	148	152	157	139	152	158
Ca [mg/L]	85.6	74.9	74.3	47.8	44	35.5	16.5	39.5	14.5	22.7	30.2
Mg [mg/L]	34.5	21.2	24.5	15.1	16.3	8.1	7.58	7.11	2.99	12	5.86
Cl [mg/L]	19.2	20.3	< 9.9	< 9.9	< 9.9	< 9.9	< 9.9	< 9.9	< 9.9	< 9.9	< 9.9
SO ₄ [mg/L]	29.2	26	24.9	21.1	16	13.1	8.01	8.26	7.5	12.7	9.68
NO ₃ [mg/L]	< 0.226	0.329	< 0.226	0.36	< 0.226	0.367	< 0.226	< 0.226	0.348	0.326	0.364
NT [mg/L]	< 0.5	< 0.5	< 0.5	0.514	< 0.5	< 0.5	< 0.5	< 0.5	< 0.5	< 0.5	< 0.5
NH ₄ [mg/L]	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1
Fenoles [mg/L]	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1
K [mg/L]	0.94	1.06	0.242	1.33	1.78	2.47	0.881	0.833	0.835	0.996	1.24
Na [mg/L]	14.6	0.214	16.9	18.1	39.3	38.5	12.3	17.6	14.6	8.28	11.2
Fe [mg/L]	0.648	0.23	1.92	0.866	< 0.2	< 0.2	0.327	0.448	< 0.2	0.435	1.14
Mn [mg/L]	0.54	< 0.1	0.981	< 0.1	0.31	0.237	0.13	0.159	0.148	0.12	0.404
COT [mg/L]	< 2	3.26	< 2	3.26	< 2	1.98	< 2	0.96	1.72	< 2	5.03
Al [mg/L]	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1
PO ₄ [mg/L]	0.217	0.232	0.687	0.624	0.307	0.36	< 0.07	< 0.07	< 0.07	< 0.07	< 0.07

Donde, CE: conductividad eléctrica, P: fósforo, K: potasio, COT: carbono orgánico total, Ca: calcio, Mg: magnesio, Na: sodio, NT: nitrógeno total, PO₄: fosfatos, NT: nitrógeno total, Al: aluminio, Mn: manganeso, Fe: hierro, SO₄: sulfatos, NO₃: nitratos, CO₃: carbonatos, HCO₃: bicarbonatos, NH₄: amonio, NO₂: nitritos.

Tabla 46. Estadística descriptiva de propiedades en aguas subterráneas en pozos ubicados en cultivos de caña de azúcar, Ingenio Incauca.

Parámetro	Media	DE	Var	Min	Max
pH	7.05	0.68	0.42	6.24	8.16
[Unidades]					
CE [μ S/cm]	410.64	171.38	26700.05	267.00	721.00
HCO ₃ [mg/L]	229.27	100.04	9097.47	139.00	381.00
Ca [mg/L]	44.14	24.46	543.71	14.50	85.60
Mg [mg/L]	14.11	9.51	82.15	2.99	34.50
K [mg/L]	1.15	0.58	0.30	0.24	2.47
Na [mg/L]	17.42	11.77	125.84	0.21	39.30
SO ₄ [mg/L]	16.04	7.97	57.70	7.50	29.20

Donde, CE: conductividad eléctrica, K: potasio, Ca: calcio, Mg: magnesio, Na: sodio, PO₄: fosfatos, HCO₃: bicarbonatos, DE: desviación estándar, Var: varianza, Min: valor mínimo, Max: valor máximo.

De acuerdo a la información presentada en la Tabla 46 se observa la mayor y la menor variabilidad de los datos para los parámetros CE y potasio, respectivamente. Las variaciones de CE que se presenta en el agua subterránea entre un punto priorizado y otro se pueden atribuir de forma similar a lo estipulado con antelación. Adicionalmente, la concentración de ciertos aniones y cationes se encuentra por encima del comportamiento histórico de los datos. De forma similar, se puede mencionar que el Mn es el único parámetro que excede el valor típico reportado en el Decreto 1076 de 2015, agua para uso agrícola, en ciertos pozos.

Los resultados de pH para los pozos de monitoreo reflejaron un valor promedio de 7.05, indicando una tendencia “neutra” y cumpliendo con el criterio normativo del Decreto 1076 de 2015 (4.5 – 9.0 Unidades de pH). Por otro lado, teniendo en cuenta los valores de conductividad eléctrica y los rangos reportados por Meneses et al. (2019), el agua subterránea se catalogó como mineralizada media – acentuada (333 – 666 μ S/cm). Estos valores indican un alto contenido de iones y sales disueltas, lo cual es una condición típica de las aguas subterráneas.

Otro de los indicadores de calidad del agua subterránea, empleada en actividades agrícolas, es la relación de absorción de sodio (RAS). Al realizar el cálculo con los resultados obtenidos para el (RAS: 0.58), se puede mencionar que el agua representa un riesgo bajo de sodicidad para el suelo, así como un excelente criterio de calidad para su uso en riego (RAS < 10).

6.2.6. Resultados calidad de agua subterránea en pozos priorizados en predios del Ingenio Manuelita

Las tablas 47 y 48 presentan los resultados para las vigencias 2021 y 2022, de los análisis fisicoquímicos de agua subterránea en pozos priorizados en predios cultivados con caña de azúcar del Ingenio Rio Paila. La Tabla 49 incluye la estadística descriptiva para los sitios evaluados.

Tabla 47. Resultados de la calidad del agua subterránea en puntos priorizados, Ingenio Manuelita.

Parámetro	Florencia vp-pm-14		Soledad vp-pm-35		Olga vp-pm-76		Olga vp-pm-46		Josepilla vp-pm-33		Malimbu vp-pm-32	
	2021	2022-II	2021	2022-II	2021	2022-II	2021	2022-II	2021	2022-II	2021	2022-II
pH [Unidades de pH]	6.94	7.02	8.2	7.52	7.32	7.28	7.16	7.2	7.14	7.31	7.58	6.95
CE [μ S/cm]	1153	1354	539	696	710	768	725	738	1010	627	585	953
CO ₃ [mg/L]	< 6.04	< 6.04	< 6.04	< 6.04	< 6.04	< 6.04	< 6.04	< 6.04	< 6.04	< 6.04	< 6.04	< 6.04
HCO ₃ [mg/L]	757	533	295	441	452	445	472	408	480	390	241	482
Ca [mg/L]	180	198	70.1	106	115	118	127	109	110	91.5	52.6	92.8
Mg [mg/L]	78.3	7.49	41.5	4.93	55.2	5.34	50.3	4.71	42.5	3.78	19.8	3.17
Cl [mg/L]	33.4	21.7	9.98	< 9.9	10.2	10.4	11.5	10.9	< 9.9	< 9.9	34.2	87.3
SO ₄ [mg/L]	68.8	66.7	55.9	46.8	42.9	33.7	55.4	61.7	68.5	51.6	6.71	< 5
NO ₃ [mg/L]	0.226	0.373	0.226	0.404	0.226	0.401	0.226	0.339	0.276	0.41	0.928	0.398
NT [mg/L]	< 0.5	< 0.5	3.9	2.55	4.3	4.16	5.9	5.08	< 0.5	3.54	4.4	5.24
NH ₄ [mg/L]	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1
Fenoles [mg/L]	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1
K [mg/L]	1.38	1.72	4.09	2.36	1.6	0.863	0.86	0.827	4.71	4.81	36	59.8
Na [mg/L]	44.2	48.4	22.1	21.1	14.4	16.2	16.9	15.9	33.2	35.9	9.4	12.4
Fe [mg/L]	< 0.2	< 0.2	0.408	0.434	22.3	0.885	0.405	0.635	0.625	5.74	2.57	2.87
Mn [mg/L]	0.333	0.363	< 0.1	0.234	0.479	< 0.1	0.257	< 0.1	3.52	1.44	1.08	2.79
COT [mg/L]	2.9	2.6	< 2	1.87	< 2	1.96	2.4	1.16	< 2	3.1	< 2	1.91
Al [mg/L]	< 1	< 1	< 1	< 1	15.5	1.39	< 1	< 1	< 1	1.91	< 1	< 1
PO ₄ [mg/L]	0.172	0.161	0.082	0.102	0.107	0.102	0.147	0.142	0.205	0.208	4.36	6.44

Donde, CE: conductividad eléctrica, P: fósforo, K: potasio, COT: carbono orgánico total, Ca: calcio, Mg: magnesio, Na: sodio, NT: nitrógeno total, PO₄: fosfatos, NT: nitrógeno total, Al: aluminio, Mn: manganeso, Fe: hierro, SO₄: sulfatos, NO₃: nitratos, CO₃: carbonatos, HCO₃: bicarbonatos, NH₄: amonio, NO₂: nitritos.

Tabla 48. Resultados de la calidad del agua subterránea en puntos priorizados, Ingenio Manuelita.

Parámetro	Rosario vp-pm-28		Rosario vp-pm-27		Real vp-pm-39			Santa Anita vp-pm-13		Real vp-pm-31	
	2021	2022-II	2021	2022-II	2021	2022-I	2022-II	2021	2022-II	2021	2022-II
pH [Unidades de pH]	7.03	6.79	7.09	7.13	7.88	7.56	7.5	6.97	6.96	7.59	7.28
CE [μ S/cm]	529	622	833	834	727	759	612	1080	1019	891	770
CO ₃ [mg/L]	< 6.04	< 6.04	< 6.04	< 6.04	< 6.04	< 6.04	< 6.04	< 6.04	< 6.04	< 6.04	< 6.04
HCO ₃ [mg/L]	344	352	392	371	307	388	403	492	807	364	399
Ca [mg/L]	88.7	89.2	94.6	114	85.8	112	93.8	158	129	110	116
Mg [mg/L]	33.2	3.6	17.4	5.21	41.8	18.8	4.19	29.8	5.59	53.7	4.43
Cl [mg/L]	< 9.9	< 9.9	21.2	28.7	< 9.9	10.7	< 9.9	22.6	35.1	< 9.9	< 9.9
SO ₄ [mg/L]	26.9	22.9	41.2	55.4	29.2	< 5.0	36.1	91.6	68.1	30.5	43.1
NO ₃ [mg/L]	0.226	0.36	< 0.226	0.401	0.226	< 0.226	0.376	< 0.226	0.398	0.377	0.407
NT [mg/L]	0.7	0.747	0.7	0.658	5.7	3.8	3.92	< 0.5	< 0.5	6.1	4.58
NH ₄ [mg/L]	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1
Fenoles [mg/L]	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1
K [mg/L]	0.733	0.947	0.685	0.882	0.845	0.826	0.96	1.5	1.47	0.85	0.907
Na [mg/L]	15.7	0.478	16.9	23.3	13.2	17.1	18.2	31.5	24.7	16.7	19.7
Fe [mg/L]	0.578	< 0.2	< 0.2	< 0.2	< 0.2	< 0.2	0.259	< 0.2	< 0.2	< 0.2	0.619
Mn [mg/L]	< 0.1	< 0.1	0.374	0.229	< 0.1	< 0.1	< 0.1	0.434	< 0.1	< 0.1	< 0.1
COT [mg/L]	< 2	1.68	1.73	1.65	< 2	1.03	1.44	1.84	3.81	< 2	1.52
Al [mg/L]	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1
PO ₄ [mg/L]	0.082	0.0782	< 0.07	< 0.07	0.236	0.177	0.192	0.109	0.104	0.132	0.107

Donde, CE: conductividad eléctrica, P: fósforo, K: potasio, COT: carbono orgánico total, Ca: calcio, Mg: magnesio, Na: sodio, NT: nitrógeno total, PO₄: fosfatos, NT: nitrógeno total, Al: aluminio, Mn: manganeso, Fe: hierro, SO₄: sulfatos, NO₃: nitratos, CO₃: carbonatos, HCO₃: bicarbonatos, NH₄: amonio, NO₂: nitritos.

Tabla 49. Estadística descriptiva de propiedades en aguas subterráneas en pozos ubicados en cultivos de caña de azúcar, Ingenio Manuelita.

Parámetro	Media	DE	Var	Min	Max
pH [Unidades]	7.28	0.34	0.11	6.79	8.20
CE [μ S/cm]	805.83	208.59	41617.53	529.00	1354.00
HCO ₃ [mg/L]	435.43	129.33	16000.16	241.00	807.00
Ca [mg/L]	111.35	32.48	1009.32	52.60	198.00
Mg [mg/L]	23.25	22.09	466.85	3.17	78.30
K [mg/L]	5.64	13.87	183.90	0.69	59.80
Na [mg/L]	21.20	11.03	116.41	0.48	48.40

Donde, CE: conductividad eléctrica, K: potasio, Ca: calcio, Mg: magnesio, Na: sodio, PO₄: fosfatos, HCO₃: bicarbonatos, DE: desviación estándar, Var: varianza, Min: valor mínimo, Max: valor máximo.

De acuerdo a la información reportada en la Tabla 49 se observa la mayor y la menor variabilidad de los datos para los parámetros CE y pH, respectivamente. Las variaciones presentadas en CE entre un punto priorizado y otro se pueden atribuir a los aportes de aguas externas, la incidencia de fuentes nitrogenadas, la liberación de nitrógeno por el

mineral que compone los suelos y el entorno hidrogeológico de la zona (Zhang *et al.*, 2022). Así mismo, las variaciones en la concentración de bicarbonatos y otro tipo de aniones o cationes dependen esencialmente de la relación con otras fuentes de agua y su historia previa (tipo de suelo, atmósfera, zona saturada y no saturada) (Cerón *et al.*, 2021).

Adicionalmente, la concentración de ciertos aniones y cationes se encuentra por encima del comportamiento histórico de los datos. De forma similar, se puede mencionar que el Fe, Al y el Mn son los parámetros que exceden los valores típicos reportados en el Decreto 1076 de 2015, agua para uso agrícola, en ciertos pozos.

Los resultados de pH para los pozos de monitoreo reflejaron un valor promedio de 7.28, indicando una tendencia “neutra” y cumpliendo con el criterio normativo del Decreto 1076 de 2015 (4.5 – 9.0 Unidades de pH). Por otro lado, teniendo en cuenta los valores de conductividad eléctrica y los rangos reportados por Meneses *et al.* (2019), el agua subterránea se catalogó con mineralización importante. Estos valores indican un alto contenido de iones y sales disueltas, lo cual es una condición típica de las aguas subterráneas.

Otro de los indicadores de calidad del agua subterránea, empleada en actividades agrícolas, es la relación de absorción de sodio (RAS). Al realizar el cálculo con los resultados obtenidos para el (RAS: 0.48), se puede mencionar que el agua representa un riesgo bajo de sodicidad para el suelo, así como un excelente criterio de calidad para su uso en riego (RAS < 10).

6.3. CARACTERIZACIÓN DE DERIVADOS DE VINAZA Y AGUA DE RIEGO APLICADA EN CULTIVOS DE CAÑA DE AZÚCAR

6.3.1. Caracterización de derivados de la vinaza para los Ingenios

La caracterización de los derivados de las vinazas por ingenio se reporta en las Tablas 50 y 51. Se destaca que los resultados de la caracterización de la vinaza del ingenio Risaralda se encuentran relacionados con el subproducto crudo y no con la mezcla vinaza – úrea.

En las siguientes fotografías se observa que la vinaza fue recolectada directamente de los sistemas de aplicación garantizando la representatividad de los derivados de la vinaza aplicados en suelos cultivados con caña de azúcar.



Fotografía 9. Toma de muestra de vinaza y agua de riego.

Tabla 50. Características de la vinaza aplicada sobre los cultivos de caña de azúcar.

Parámetro	Rio Paila		Mayaguez		Providencia	
	2021	2022	2021	2022	2021	2022
Al [mg Al/L]	7.41	8.35	1.18	2.5	1	10.8
As Disuelto [mg As/L]	< 0.00250	< 0.00250	< 0.00250	< 0.00250	< 0.00250	< 0.00250
Cd [mg Cd/L]	0.0352	0.4	0.055	0.186	0.0435	0.0434
Ca [mg Ca/L]	2261	916	1717	7954	1055	1551
Cl [mg Cl/L]	10396	18116	10453	7658	9476	< 9.9
Cu [mg Cu/L]	2.07	1.36	0.156	< 0.1	0.168	0.27
CE [μ S/cm]	80300	32000	36200	26600	41900	54500
Cr [mg Cr/L]	0.174	< 0.1	0.304	< 0.1	< 0.1	< 0.1
DBO [mg/L]	75900	206700	83700	112500	40200	1274
DQO [mg/L]	157189	384448	488225	179829	471060	271469
Fe Disuelto [mg Fe/L]	16.2	38.3	5.9	15.5	5.07	13.7
Fe Total [mg Fe/L]	27.4	103	5.28	16.3	21.6	33.8
Mg [mg Mg/L]	468	39.7	856	636	628	131
Mn [mg Mn/L]	2.6	29.3	7.91	7.58	5.6	8.3
Hg [mg Hg/L]	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001
NO ₃ [mg NO ₃ /L]	48.2	351	62.5	< 0.226	53.1	< 0.226
NO ₂ [mg NO ₂ /L]	< 0.00608	< 0.00608	< 0.00608	< 0.00608	< 0.00608	< 0.00608
NT [mg N/L]	38112	2835	34570	16328	5683	2549
pH	9.57	5.38	4.97	4.92	4.23	4.95
Pb [mg Pb/L]	0.28	0.516	0.26	0.96	0.19	1.16
K [mg K/L]	1.79	9369	17500	4977	10300	35940
Na [mg Na/L]	262	434	148	659	124	612
SO ₄ [mg SO ₄ /L]	27538	18610	13490	13484	19235	13395

Donde, CE: conductividad eléctrica, K: potasio, Ca: calcio, Mg: magnesio, Na: sodio, NT: nitrógeno total, Mn: manganeso, Fe: hierro, Al: aluminio, As: arsénico, Cd: cadmio, Cu: cobre, Cr: cromo, Hg: mercurio, Pb: plomo, SO₄: sulfatos, NO₃: nitratos, NO₂: nitritos, Cl: cloruros.

Tabla 51. Características de la vinaza aplicada sobre los cultivos de caña de azúcar.

Parámetro	Risaralda		Incauca		Manuelita	
	2021	2022	2021	2022	2021	2022
Al [mg Al/L]	1.8	2.59	3.45	49.4	5.15	5.32
As Disuelto [mg As/L]	< 0.00250	< 0.00250	< 0.00250	< 0.00250	< 0.00250	< 0.00250
Cd [mg Cd/L]	0.0611	0.0565	0.032	0.0391	0.039	0.176
Ca [mg Ca/L]	459	1071	732	2098	1841	7543
Cl [mg Cl/L]	13640	8811	9037	< 9.9	10453	14451
Cu [mg Cu/L]	0.137	0.848	0.384	0.956	1.1	< 0,1
CE [μ S/cm]	57600	42300	32600	39700	31100	24500
Cr [mg Cr/L]	0.123	< 0.1	< 0.1	0.422	0.48	< 0.1
DBO [mg/L]	89400	101800	81750	1084	96600	205300
DQO [mg/L]	166998	165831	353359	207447	627995	332980
Fe Disuelto [mg Fe/L]	23	16.5	11.5	364	10.1	15.4
Fe Total [mg Fe/L]	53.4	41.3	39.8	376	48.7	27.3
Mg [mg Mg/L]	318	27.6	265	106	914	1345
Mn [mg Mn/L]	8.2	7.84	6.37	31.5	10.8	11.4
Hg [mg Hg/L]	0.00153	0.047	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001
NO ₃ [mg NO ₃ /L]	52.3	35.8	68.1	< 0.226	65.6	< 0.226
NO ₂ [mg NO ₂ /L]	< 0.00608	3.61	< 0.00608	< 0.00608	< 0.00608	< 0.00608
NT [mg N/L]	7226	1954	75374	2235	75940	19271
pH	4.97	4.17	4.69	4.46	4.68	4.55
Pb [mg Pb/L]	1.57	0.674	0.16	1.23	0.18	0.67
K [mg K/L]	19370	5365	9119	12280	15190	5820
Na [mg Na/L]	905	161	142	499	253	905
SO ₄ [mg SO ₄ /L]	13580	12550	14298	10305	26326	14240

Donde, CE: conductividad eléctrica, K: potasio, Ca: calcio, Mg: magnesio, Na: sodio, NT: nitrógeno total, Mn: manganeso, Fe: hierro, Al: aluminio, As: arsénico, Cd: cadmio, Cu: cobre, Cr: cromo, Hg: mercurio, Pb: plomo, SO₄: sulfatos, NO₃: nitratos, NO₂: nitritos, Cl: cloruros.

6.3.2. Análisis de derivados de la vinaza vs criterios calidad de la OMS

En las Tablas 52 a 57 se presenta el análisis comparativo de la caracterización de los derivados de la vinaza con los parámetros y valores establecidos por la Organización Mundial de la Salud (WHO) para el uso de aguas residuales industriales en agricultura.

Tabla 52. Comparación entre la caracterización de la vinaza aplicada y los parámetros establecidos por la WHO (2006), Vinaza Ingenio Rio Paila.

Parámetro	Unidades	Valor determinado 2021	Valor determinado 2022	Límite Máximo Recomendado	Interpretación
Aluminio	mg/L	7.41	8.35	5	El parámetro excede la concentración recomendada, pero como el pH del suelo donde se aplica es mayor a 7 (7.78) el ion precipita y se elimina su toxicidad
Arsénico	mg/L	< 0.00250	< 0.00250	0.1	El parámetro no se hace tóxico para el cultivo
Cadmio	mg/L	0.0352	0.4	0.01	El parámetro excede la concentración recomendada, por lo cual puede generar acumulación en las plantas
Cobre	mg/L	2.07	1.36	0.2	El parámetro excede la concentración recomendada, por lo cual puede volverse tóxico para las plantas
CE	μS/cm	80300	32000	300000	Salinidad ligera a moderada (70000 - 300000 μS/cm) y salinidad ligera para las caracterizaciones 2021 y 2022, respectivamente
Cromo	mg/L	0.174	< 0.1	0.1	El parámetro excede la concentración recomendada, aunque no se tiene conocimiento de su toxicidad en plantas (Monitoreo 2021).
Hierro	mg/L	16.2	103	5	El parámetro excede la concentración recomendada, contribuyendo potencialmente en la acidificación del suelo. Esta condición no se cumple teniendo en cuenta el pH determinado en el suelo, 7.78
Manganeso	mg/L	2.6	29.3	0.2	El parámetro excede la concentración recomendada, por lo cual puede ser tóxico para el cultivo en suelos ácidos. Esta condición no se cumple teniendo en cuenta el pH determinado en el suelo, 7.78
NT	mg/L	38112	2835	30	El parámetro excede la concentración recomendada
pH	Unidades	9.57	5.38	6.5 - 8	El parámetro excede el rango recomendado (Monitoreo 2021)
Plomo	mg/L	0.28	0.516	5	El parámetro no excede la concentración recomendada, por lo cual no se presentaría inhibición en el crecimiento de las células de las plantas
Sodio	mg/L	269	434	203	El parámetro excede la concentración recomendada

Tabla 53. Comparación entre la caracterización de la vinaza aplicada y los parámetros establecidos por la WHO (2006), Vinaza Ingenio Mayaguez.

Parámetro	Unidades	Valor determinado 2021	Valor determinado 2022	Límite Máximo Recomendado	Interpretación
Aluminio	mg/L	1.18	2.5	5	El parámetro no excede la concentración recomendada.
Arsénico	mg/L	< 0.00250	< 0.00250	0.1	El parámetro no se hace tóxico para el cultivo
Cadmio	mg/L	0.055	0.186	0.01	El parámetro excede la concentración recomendada, por lo cual puede generar acumulación en las plantas
Cobre	mg/L	0.156	< 0.1	0.2	El parámetro excede la concentración recomendada, por lo cual puede volverse tóxico para las plantas (Monitoreo 2021)
CE	μS/cm	36200	26600	300000	Salinidad ligera (< 70000 μS/cm)
Cromo	mg/L	0.304	< 0.1	0.1	El parámetro excede la concentración recomendada, aunque no se tiene conocimiento de su toxicidad en plantas (Monitoreo 2021).
Hierro	mg/L	5.28	16.3	5	El parámetro excede la concentración recomendada, contribuyendo potencialmente en la acidificación del suelo. Esta condición no se cumple teniendo en cuenta el pH determinado en el suelo, 7.26
Manganeso	mg/L	7.91	7.58	0.2	El parámetro excede la concentración recomendada, por lo cual puede ser tóxico para el cultivo en suelos ácidos. Esta condición no se cumple teniendo en cuenta el pH determinado en el suelo, 7.26
NT	mg/L	34570	16328	30	El parámetro excede la concentración recomendada
pH	Unidades	4.97	4.92	6.5 - 8	El parámetro se encuentra por debajo del rango recomendado
Plomo	mg/L	0.26	0.96	5	El parámetro no excede la concentración recomendada, por lo cual no se presentaría inhibición en el crecimiento de las células de las plantas
Sodio	mg/L	148	659	203	El parámetro excede la concentración recomendada (Monitoreo 2022)

Tabla 54. Comparación entre la caracterización de la vinaza aplicada y los parámetros establecidos por la WHO (2006), Vinaza Ingenio Providencia.

Parámetro	Unidades	Valor determinado 2021	Valor determinado 2022	Límite Máximo Recomendado	Interpretación
Aluminio	mg/L	1	10.8	5	El parámetro excede la concentración recomendada (Monitoreo 2022), pero como el pH del suelo donde se aplica es mayor a 7 (7.75) el ion precipita y se elimina su toxicidad
Arsénico	mg/L	< 0.00250	< 0.00250	0.1	El parámetro no se hace tóxico para el cultivo
Cadmio	mg/L	0.0435	0.0434	0.01	El parámetro excede la concentración recomendada, por lo cual puede generar acumulación en las plantas
Cobre	mg/L	0.168	0.27	0.2	El parámetro excede la concentración recomendada (Monitoreo 2022), por lo cual puede volverse tóxico para las plantas
CE	μS/cm	41900	54500	300000	Salinidad ligera (< 70000 μS/cm)
Cromo	mg/L	< 0.1	< 0.1	0.1	El parámetro no excede la concentración recomendada
Hierro	mg/L	21.6	33.8	5	El parámetro excede la concentración recomendada, contribuyendo potencialmente en la acidificación del suelo. Esta condición no se cumple teniendo en cuenta el pH determinado en el suelo, 7.75
Manganeso	mg/L	5.6	8.3	0.2	El parámetro excede la concentración recomendada, por lo cual puede ser tóxico para el cultivo en suelos ácidos. Esta condición no se cumple teniendo en cuenta el pH determinado en el suelo, 7.75
NT	mg/L	5683	2549	30	El parámetro excede la concentración recomendada
pH	Unidades	4.23	4.95	6.5 - 8	El parámetro se encuentra por debajo del rango recomendado
Plomo	mg/L	0.19	1.16	5	El parámetro no excede la concentración recomendada, por lo cual no se presentaría inhibición en el crecimiento de las células de las plantas
Sodio	mg/L	124	612	203	El parámetro excede la concentración recomendada (Monitoreo 2022)

Tabla 55. Comparación entre la caracterización de la vinaza aplicada y los parámetros establecidos por la WHO (2006), Vinaza Ingenio Risaralda.

Parámetro	Unidades	Valor determinado 2021	Valor determinado 2022	Límite Máximo Recomendado	Interpretación
Aluminio	mg/L	1.8	2.59	5	El parámetro no excede la concentración recomendada
Arsénico	mg/L	< 0.00250	< 0.00250	0.1	El parámetro no se hace tóxico para el cultivo
Cadmio	mg/L	0.0611	0.0565	0.01	El parámetro excede la concentración recomendada, por lo cual puede generar acumulación en las plantas
Cobre	mg/L	0.137	0.848	0.2	El parámetro excede la concentración recomendada (Monitoreo 2022), por lo cual puede volverse tóxico para las plantas
CE	μS/cm	57600	42300	300000	Salinidad ligera (< 70000 μS/cm)
Cromo	mg/L	0.123	< 0.1	0.1	El parámetro excede la concentración recomendada, aunque no se tiene conocimiento de su toxicidad en plantas (Monitoreo 2021).
Hierro	mg/L	53.4	41.3	5	El parámetro excede la concentración recomendada, contribuyendo potencialmente en la acidificación del suelo. Esta condición no se cumple teniendo en cuenta el pH determinado en el suelo, 6.24
Manganeso	mg/L	8.2	7.84	0.2	El parámetro excede la concentración recomendada, por lo cual puede ser tóxico para el cultivo en suelos ácidos. Esta condición no se cumple teniendo en cuenta el pH determinado en el suelo, 6.24
NT	mg/L	7226	1954	30	El parámetro excede la concentración recomendada
pH	Unidades	4.97	4.17	6.5 - 8	El parámetro se encuentra por debajo del rango recomendado
Plomo	mg/L	1.57	0.674	5	El parámetro no excede la concentración recomendada, por lo cual no se presentaría inhibición en el crecimiento de las células de las plantas
Sodio	mg/L	905	161	203	El parámetro excede la concentración recomendada (Monitoreo 2021)

Tabla 56. Comparación entre la caracterización de la vinaza aplicada y los parámetros establecidos por la WHO (2006), Vinaza Ingenio Incauca.

Parámetro	Unidades	Valor determinado 2021	Valor determinado 2022	Límite Máximo Recomendado	Interpretación
Aluminio	mg/L	3.45	49.4	5	El parámetro excede la concentración recomendada (Monitoreo 2022), pero como el pH del suelo donde se aplica se encuentra entre 5.5 - 7 (6.77) el ion precipita y se elimina su toxicidad
Arsénico	mg/L	< 0.00250	< 0.00250	0.1	El parámetro no se hace tóxico para el cultivo
Cadmio	mg/L	0.032	0.0391	0.01	El parámetro excede la concentración recomendada, por lo cual puede generar acumulación en las plantas
Cobre	mg/L	0.384	0.956	0.2	El parámetro excede la concentración recomendada, por lo cual puede volverse tóxico para las plantas
CE	μS/cm	32600	39700	300000	Salinidad ligera (< 70000 μS/cm)
Cromo	mg/L	< 0.1	0.422	0.1	El parámetro excede la concentración recomendada, aunque no se tiene conocimiento de su toxicidad en plantas (Monitoreo 2022).
Hierro	mg/L	39.8	376	5	El parámetro excede la concentración recomendada, contribuyendo potencialmente en la acidificación del suelo. Esta condición no se cumple teniendo en cuenta el pH determinado en el suelo, 6.77
Manganeso	mg/L	6.37	31.5	0.2	El parámetro excede la concentración recomendada, por lo cual puede ser tóxico para el cultivo en suelos ácidos. Esta condición no se cumple teniendo en cuenta el pH determinado en el suelo, 6.77
NT	mg/L	75374	2235	30	El parámetro excede la concentración recomendada
pH	Unidades	4.69	4.46	6.5 - 8	El parámetro se encuentra por debajo del rango recomendado
Plomo	mg/L	0.16	1.23	5	El parámetro no excede la concentración recomendada, por lo cual no se presentaría inhibición en el crecimiento de las células de las plantas
Sodio	mg/L	142	499	203	El parámetro excede la concentración recomendada (Monitoreo 2022)

Tabla 57. Comparación entre la caracterización de la vinaza aplicada y los parámetros establecidos por la WHO (2006), Vinaza Ingenio Manuelita.

Parámetro	Unidades	Valor determinado 2021	Valor determinado 2022	Límite Máximo Recomendado	Interpretación
Aluminio	mg/L	5.15	5.32	5	El parámetro excede la concentración recomendada (Monitoreo 2022), pero como el pH del suelo donde se aplica es > 7 (7.6) el ion precipita y se elimina su toxicidad
Arsénico	mg/L	< 0.00250	< 0.00250	0.1	El parámetro no se hace tóxico para el cultivo
Cadmio	mg/L	0.039	0.176	0.01	El parámetro excede la concentración recomendada, por lo cual puede generar acumulación en las plantas
Cobre	mg/L	1.1	< 0,1	0.2	El parámetro excede la concentración recomendada (Monitoreo 2021), por lo cual puede volverse tóxico para las plantas
CE	µS/cm	31100	24500	300000	Salinidad ligera (< 70000 µS/cm)
Cromo	mg/L	0.48	< 0.1	0.1	El parámetro excede la concentración recomendada, aunque no se tiene conocimiento de su toxicidad en plantas (Monitoreo 2021).
Hierro	mg/L	48.7	27.3	5	El parámetro excede la concentración recomendada, contribuyendo potencialmente en la acidificación del suelo. Esta condición no se cumple teniendo en cuenta el pH determinado en el suelo, 7.6
Manganeso	mg/L	10.8	11.4	0.2	El parámetro excede la concentración recomendada, por lo cual puede ser tóxico para el cultivo en suelos ácidos. Esta condición no se cumple teniendo en cuenta el pH determinado en el suelo, 7.6
NT	mg/L	75940	19271	30	El parámetro excede la concentración recomendada
pH	Unidades	4.68	4.55	6.5 - 8	El parámetro se encuentra por debajo del rango recomendado
Plomo	mg/L	0.18	0.67	5	El parámetro no excede la concentración recomendada, por lo cual no se presentaría inhibición en el crecimiento de las células de las plantas
Sodio	mg/L	253	905	203	El parámetro excede la concentración recomendada

Comparando los resultados de la caracterización de vinaza con los rangos reportados por la literatura (Tabla 58), se destaca que los valores de Al, As, Mg, Na, Cr, Cu, Hg y los Nitratos se encuentran dentro o por debajo de los rangos típicos establecidos para las vinazas provenientes del procesamiento de la caña de azúcar. Caso contrario sucede con los demás parámetros, donde ciertos valores se encuentran por encima de los rangos establecidos, siendo el Cd, la CE y los sulfatos los más representativos al encontrarse por exceso en cada una de las vinazas analizadas.

Tabla 58. Características típicas de la vinaza obtenida a partir de caña de azúcar.

Parámetro	Unidades	Rango	Referencia
pH	Unidades	3.25 - 5.9	[1,2,3,4,5]
DQO	mg/L	11100 - 299250	[1,2,3,5,6]
DBO	mg/L	5046 - 65000	[1,2,5]
CE	μS/cm	8294 - 15110	[1,7]
K	mg/L	40 - 10000	[1,2,4,5,7]
NT	mg/L	14 - 4004	[1,3,4,5]
Ca	mg/L	8 - 5180	[1,3,4,7]
Mg	mg/L	4.2 - 1529	[1,3,4]
Sulfatos	mg/L	14 - 9500	[1,2,3,4,5]
Na	mg/L	26 - 3820	[1,3,4,7]
Cr	mg/L	0.04 - 3.56	[1,4,7]
Cu	mg/L	0.05 - 5.18	[1,7]
Hg	mg/L	0.0019	[1]
Fosfatos	mg/L	102 - 161.92	[1]
Nitratos	mg/L	441 - 648.36	[1,6]
FeT	mg/L	2.792 - 246.9	[1,4,7]
Mn	mg/L	1.18 - 8.53	[1,4,7]
Cd	mg/L	0 - 0.025	[4,7]
Al	mg/L	499	[7]
Pb	mg/L	0.34	[7]

Donde, CE: conductividad eléctrica, K: potasio, Ca: calcio, Mg: magnesio, Na: sodio, NT: nitrógeno total, Mn: manganeso, FeT: hierro total, Al: aluminio, AsD: arsénico disuelto, Cd: cadmio, Cu: cobre, Cr: cromo, FeD: hierro disuelto, Hg: mercurio, Pb: plomo, [1]: Parsaee *et al.* (2019), [2]: Nunes *et al.* (2022), [3]: Deh *et al.* (2021), [4]: Barbosa *et al.* (2022), [5]: Silva *et al.* (2021a), [6]: Siqueira *et al.* (2022), [7]: Silva *et al.* (2021b).

6.3.3. Caracterización de agua de riego

En las Tabla 59 y 60 se presentan los resultados asociados a la caracterización del agua de riego aplicada sobre suelos cultivados con caña de azúcar. Los datos fueron comparados con los rangos y parámetros establecidos por la FAO (1989) para valorar la calidad del agua usada en agricultura (Tabla 61).

Tabla 59. Características del agua de riego aplicada sobre cultivos de caña de azúcar.

Parámetro	Rio Paila		Mayaguez		Providencia	
	2021	2022	2021	2022	2021	2022
Aluminio [mg/L]	3.93	1.84	< 1	< 1	1	2.68
Bicarbonatos [mg/L]	88.4	101	204	216	87.5	111
Calcio [mg/L]	9.26	18.9	53.7	51.7	28.7	23.7
Carbonatos [mg/L]	< 6.04	< 6.04	< 6.04	< 6.04	< 6.04	< 6.04
Cloruros [mg/L]	< 9.9	12.6	< 9.9	< 9.9	< 9.9	< 9.9
CE [μS/cm]	129.7	257	346	393	197.9	215
DBO [mg/L]	5	< 5.0	< 5	< 5	< 5	< 5
DQO [mg/L]	5	9.67	5	24.3	5	5.05
Fenoles [mg/L]	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1

Fosfatos [mg/L]	0.07	0.237	0.339	0.321	0.161	0.173
Hierro disuelto [mg/L]	0.967	< 0.2	< 0.2	< 0.2	< 0.2	< 0.2
Hierro total [mg/L]	3.93	1.64	0.367	< 0.2	0.717	2.94
Magnesio [mg/L]	6.48	32.1	16.7	16.4	7.55	7.26
Manganeso [mg/L]	< 0.1	< 0.1	0.1	0.263	< 0.1	< 0.1
Nitratos [mg/L]	0.418	0.408	0.226	0.305	0.284	0.305
Nitritos [mg/L]	0.0136	< 0.00608	< 0.00608	< 0.00608	< 0.00608	< 0.00608
Nitrógeno amoniacal [mg/L]	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1
OD [mg/L]	6.85	5.21	1.91	2.38	6.14	7.21
pH	8.7	7.58	7.66	7.51	7.28	8.16
Potasio [mg/L]	1.19	7.98	1.82	1.55	6.33	3.36
Sodio [mg/L]	4.18	7.6	9.7	16.2	3.2	6
SST [mg/L]	197	25	< 10	< 10	16.5	78
ST [mg/L]	324	370	280	270	194	226
Sulfatos [mg/L]	5	< 5.0	21.7	16.3	25.7	20.7

Donde CE: conductividad eléctrica, OD: Oxígeno disuelto, SST: Sólidos suspendidos totales, ST: Sólidos totales.

Tabla 60. Características del agua de riego aplicada sobre cultivos de caña de azúcar.

Parámetro	Risaralda		Incauca		Manuelita	
	2021	2022	2021	2022	2021	2022
Aluminio [mg/L]	3.61	8.09	10.5	4.11	<1	< 1
Bicarbonatos [mg/L]	108	92.8	45.2	176	393	260
Calcio [mg/L]	9.84	13.1	8.47	34.6	93.6	82
Carbonatos [mg/L]	< 6.04	< 6.04	< 6.04	< 6.04	< 6.04	< 6.04
Cloruros [mg/L]	< 9.9	24.1	< 9.9	16.1	< 9.9	< 9.9
CE [μ S/cm]	133.7	291	106.9	384	557	522
DBO [mg/L]	< 5.0	34.5	11.8	< 5	< 5	5.67
DQO [mg/L]	5	78.5	42.4	22.5	5	24.6
Fenoles [mg/L]	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1
Fosfatos [mg/L]	0.07	0.318	0.07	0.155	0.184	0.206
Hierro disuelto [mg/L]	0.362	0.626	2.98	< 0.2	< 0.2	< 0.2
Hierro total [mg/L]	7.13	5.7	10.1	5.27	< 0.2	< 0.2
Magnesio [mg/L]	1.42	12.5	6.8	1.69	24	1.31
Manganeso [mg/L]	0.1	0.303	< 0.1	< 0.1	0.109	0.14
Nitratos [mg/L]	0.538	0.41	0.85	0.311	< 0.226	< 0.226
Nitritos [mg/L]	0.039	< 0.00608	0.0157	0.0633	< 0.00608	< 0.00608
Nitrógeno amoniacal [mg/L]	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1
OD [mg/L]	4.31	5.73	6.02	5.23	4.84	5.28
pH	8.49	6.48	7.28	7.5	7.69	7.82
Potasio [mg/L]	3.75	19.9	2.21	2.72	1.24	1.51
Sodio [mg/L]	5.11	7.43	1.68	19.5	19	25.5
SST [mg/L]	171	148	91.5	114	< 10	< 10
ST [mg/L]	260	476	286	344	468	346
Sulfatos [mg/L]	15.8	57.3	5	16.9	26.4	19.6

Donde CE: conductividad eléctrica, OD: Oxígeno disuelto, SST: Sólidos suspendidos totales, ST: Sólidos totales.

Tabla 61. Características del agua de riego empleada en agricultura FAO (1989).

Parámetro	Rango
CE [dS/m]	0 - 3
SDT [mg/L]	0 - 2000
Ca [me/L]	0 - 20
Mg [me/L]	0 - 5
Na [me/L]	0 - 40
CO ₃ [me/L]	0 - 1
HCO ₃ [me/L]	0 - 10
Cl [me/L]	0 - 30
SO ₄ [me/L]	0 - 20
NO ₃ [mg/L]	0 - 10
NH ₄ [mg/L]	0 - 5
PO ₄ [mg/L]	0 - 2
K [mg/L]	0 - 2
RAS	0 - 15
pH	6.5 - 8.4

Donde, CE: conductividad eléctrica, K: potasio, Ca: calcio, Mg: magnesio, Na: sodio, NO₃: nitratos, NH₄: nitrógeno amoniacal, Cl: cloruros, SO₄: sulfatos, PO₄: fosfatos, RAS: radio de absorción de sodio, CO₃: carbonatos, HCO₃: bicarbonatos, SDT: sólidos disueltos totales.

Las concentraciones K del agua de riego asociada a los ingenios Providencia, Risaralda e Incauca (Monitoreos 2021 y 2022) así como para el ingenio Rio Paila (Monitoreo 2022), se encuentran por encima de los rangos establecidos por FAO (1989).

Los resultados de pH para el agua de riego reflejaron valores entre 7.28 y 8.7 unidades de pH, indicando una tendencia “neutra”. Con base a los valores de conductividad eléctrica y los rangos reportados por Meneses et al. (2019), el agua de riego asociada a los ingenios Rio Paila, Providencia, Risaralda e Incauca (Monitoreo 2021) se catalogaron como mineralizada débil (100 – 200 μ S/cm), mientras el agua de riego de las demás caracterizaciones como mineralización media - acentuada (333 – 666 μ S/cm).

7. SOCIALIZACIONES

La Actividad 012 se ha venido socializando a partir de diferentes actividades tanto presenciales como virtuales. El 10 de septiembre de 2021 en el Centro de Educación Ambiental Buitre La Ciénaga - Laguna de Sonso, se realizó por parte de la Universidad la socialización del Convenio ante las Direcciones Ambientales Regionales - DAR y UMATAS asociadas con el área de influencia (cuencas definidas en el Convenio) para las vigencias 2021 y 2022, en este espacio se presentaron los objetivos, metodología y alcance de esta actividad, además se inició el proceso de recolección de información primaria y de contactos por parte de funcionarios de la DAR y UMATA que asistieron a la reunión. La interacción entre los asistentes se dio a través de mapas físicos de cada una de las cuencas priorizadas por la CVC con el objetivo de reconocer el área de estudio (vías de acceso, cultivos representativos, seguridad, estado de vías, etc.).



Figura 27. Reunión CVC-UNAL-UMATA septiembre 10 de 2021.

El primero de octubre se participó en reunión virtual con el equipo de vinazas, profesores y profesionales de la CVC en donde se definieron las zonas de monitoreo de interés (enviadas el 26 de octubre de 2021), la ubicación de estas zonas y las actividades programadas.

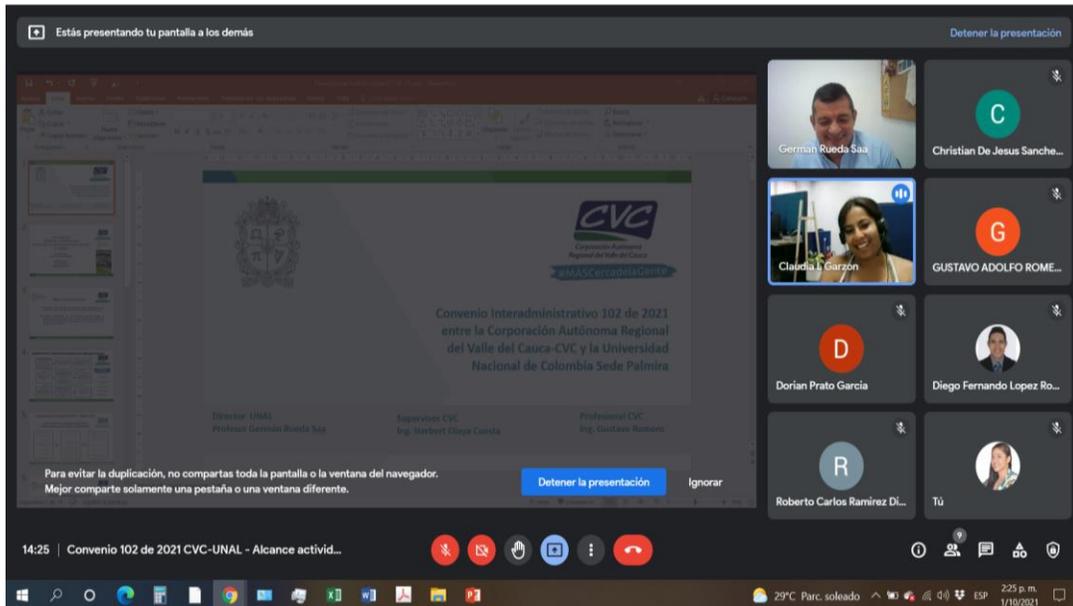


Figura 28. Reunión funcionarios CVC de Recursos Hídricos.

Reunión presencial el 21 de octubre de 2021 con el sector azucarero en el que se socializo la actividad de forma general y se levantó información de contacto con algunos profesionales que hacen parte de los ingenios de modalidad dual y posteriormente el 29 de octubre se hizo una socialización más detallada con los ingenios de forma virtual.



Figura 29. Reunión de funcionarios CVC y personal de algunos ingenios del Valle del Cauca.

En la reunión presencial en la CVC el 13 de diciembre del 2021 con el comité técnico del Convenio 102 de 2021, se explicó en mayor detalle el diseño experimental y se realizó la socialización de los avances realizados para esa fecha en cada una de las actividades programadas y se plantearon recomendaciones para el informe final.



Figura 30. Socialización de avances con el comité técnico de la CVC.

En la reunión presencial en la CVC el 16 de febrero del 2022 con el comité técnico del Convenio 102 de 2021 y personal del grupo de Recursos Hídricos de CVC se explicó en mayor detalle el diseño experimental y se realizó la socialización de resultados en cada una de las actividades programadas.



Figura 31. Socialización de resultados con el comité técnico de la CVC y personal del grupo de Recursos Hídricos de CVC.

Posterior a la entrega del informe asociado a la primera vigencia del Convenio 102 de 2021, el día 27 de abril del 2022 se presentaron las observaciones del trabajo relacionadas con la actividad 012 durante el comité técnico presencial citado para esta fecha por la autoridad ambiental.

Durante el comité técnico del 30 de junio del 2022 se presentó la propuesta de diseño experimental en columnas de suelo para la segunda vigencia del convenio. Así mismo, en los comités de los días 01 de agosto, 07 de septiembre, 03 de octubre y 01 de noviembre del 2022, se expusieron los avances de las tareas y acciones relacionadas con la actividad 012 del Convenio.



Figura 32. Socializaciones de avance de acciones asociadas a la actividad 012 del Convenio CVC – UNAL.

La socialización final se realizó en el auditorio Bernardo Garcés Córdoba de la Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca – CVC en Cali (Carrera 56 No 11-56), el jueves 24 de noviembre de 2022, actividad en donde se expuso a los usuarios asociados a ingenios y cultivos de caña de azúcar.



Figura 33. Socialización final de la actividad 012 del Convenio CVC – UNAL.

8. CONSIDERACIONES FINALES

Los monitoreos realizados en las vigencias 2021 y 2022 permitieron a la CVC cumplir con la responsabilidad ambiental de proteger y hacer seguimiento a la calidad de suelos en cultivos de caña de azúcar en predios priorizados por la CVC. De igual forma se realizó el monitoreo a la calidad de agua de pozos someros en estos mismos predios. En documento adjunto se entregan los resultados de forma individual para cada uno de los 42 predios, incluye el análisis del comportamiento de diferentes variables para suelo y agua.

A pesar de no existir una normativa nacional donde se establezcan límites o rangos permisibles para el uso de subproductos industriales o agua de riego en actividades agrícolas, se debe realizar seguimiento y control a parámetros de interés presentes en las vinazas tales como el Al, Fe, Na, Mn, Cd y Cu los cuales exceden las concentraciones recomendadas por la Organización Mundial de la Salud (2006) aumentando la probabilidad de generar un impacto negativo sobre el suelo. Así mismo, se debe realizar seguimiento a variables como el K presente en el agua de riego, parámetro que excede el rango establecido por la FAO (1989) para valorar la calidad del agua empleada en actividades agrícolas.

Con base en el análisis de las propiedades de los suelos y los límites revisados en la bibliografía revisada, se destaca que algunos parámetros presentaron valores por encima de los valores típicos: i) calcio en el punto Esmeralda-30 (Monitoreo 2022), ii) potasio en los puntos Esmeralda-30 (Monitoreo 2021 y 2022), Santa Lucia-19 (Monitoreo 2022) y Zainera-27 (Monitoreo 2022), y iii) porcentaje de sodio intercambiable (PSI) en los puntos Santa Lucia-19 (Monitoreo 2021 y 2022), Esmeralda-30 (Monitoreo 2021 y 2022), Olga- 46 (Monitoreo 2022), Olga-76 (Monitoreo 2021 y 2022), Real-31 (Monitoreo 2022) y Zainera-27 (Monitoreo 2021 y 2022). Teniendo en cuenta esto, se debe hacer seguimiento y control a las actividades agrícolas que puedan impactar negativamente la calidad del suelo.

Al contrastar los resultados de calidad del agua de los pozos priorizados con los parámetros para hacer uso del agua en consumo humano con desinfección, uso agrícola y pecuario establecidos por el Decreto 1076 del 2015, se concluye que los parámetros sulfatos y cloruros no presentaron una alteración relevante en el agua subterránea, a pesar de encontrarse en altas concentraciones en las vinazas caracterizadas.

9. RECOMENDACIONES

- Los monitoreos de suelos deben realizarse en cultivos con un tiempo de desarrollo similar, esto con el fin de poder contrastar los resultados con un menor grado de incertidumbre y variabilidad. Así mismo, se recomienda evaluar parámetros de interés que se relacionen con las características fisicoquímicas de los derivados de la vinaza incorporados en suelos cultivados con caña de azúcar.
- Realizar pruebas pilotos en campo que permitan evaluar la incidencia de la aplicación de vinazas u otros derivados del procesamiento de la caña de azúcar, bajo condiciones controladas y el establecimiento de variables que permitan determinar o valorar el impacto sobre la calidad del suelo y de las aguas subterráneas.
- Realizar un muestreo de suelos a una mayor profundidad con el fin de determinar la incidencia o los impactos de la vinaza a medida que se desplaza a lo largo del perfil del suelo.
- Con el fin de valorar el impacto del agua de riego empleada en las labores de campo, se hace necesario tener una mayor cobertura en cuanto a la caracterización del recurso hídrico empleado en las diferentes haciendas o predios de interés por parte de la autoridad ambiental. Del mismo modo, tener en cuenta diferentes parámetros de interés que puedan afectar la calidad del agua empleada en riego, así como la procedencia u origen de esta.

10. BIBLIOGRAFÍA

- Agrosavia. GA-G-17 Guía toma de Muestras de Suelo para Análisis Químicos y Físicos.
- Aristizabal C. E. (2015). Caracterización físico-química de una vinaza resultante de la producción de alcohol de una industria licorera, a partir del aprovechamiento de la caña de azúcar. Ing. USBMed. 6 (2).
- Barbosa M. Y., Alves I., Del Nery V., Sakamoto I. K., Pozzi E. and Rissato M. H. (2022). Methane production in a UASB reactor from sugarcane vinasse: shutdown or exchanging substrate for molasses during the off-season? Journal of Water Process Engineering. 47, 102664.
- Cabral F.R., Vieira G.D., Cunha, F.N., Alves D.K.M., Soares F.A.L., dos Santos L.N.S., Teixeira M.B., da Silva N.F. and Cavalcante W.S.D. (2020). Cation concentrations and dynamics in the surface profile of two oxisols after the application of vinasse. Romanian Agricultural Research. 38, 259-269.
- Cardoso E.N., Coelho A.P. and Fernandes C. (2021). What Are the Impacts of Long-Term Vinasse Application on Clayey and Sandy Soils? Sugar Tech.
- Castellón J. J., Bernal R. and Hernández M. (2014). Calidad del agua para riego en la agricultura protegida en Tlaxcala. Ingeniería. 19 (1), 39 – 50.
- Cengicaña. (2017). Guía de Buenas Prácticas Agrícolas en Caña de Azúcar. 84p.
- Cenicaña. (1995). El cultivo de la caña de azúcar en la zona azucarera de Colombia. ISBN 958-33-0283-X. Colombia, Valle del Cauca.
- Coelho M.P., Correia J.E., Idalgo L., de Castro A.C., de Andrade T., Soto M.A., Broggio J., Kiang C. and Silvia C. (2018). Toxicity evaluation of leached of sugarcane vinasse: Histopathology and immunostaining of cellular stress protein. Ecotoxicology and Environmental Safety. 165, 367–375.
- da Silva J.J., da Silva B.F., Ramos N., Petrović M. Gros M. and Gago-Ferrero P. (2021). Identification of organic contaminants in vinasse and in soil and groundwater from fertigated sugarcane crop areas using target and suspect screening strategies. Science of the Total Environment. 761, 143237.
- da Silva M.A., Kliemann H.J., De-Campos A., Emöke B., Borges J.D. and Mesquita, J. (2013). Effects of vinasse irrigation on effluent ionic concentration in Brazilian Oxisols. Afr. J. Agric. Res. 8(45), 5663-5671.
- da Silva A.M., Lopes I.G., Boscov L. and da Cruz M.C. (2020). Nitrogen Mineralization and Sugarcane Growth in Soils Fertilized with Vinasse. Sugar Tech. 22(6):1076–1085.
- da Silva N.F., Nobre F., Batista M. and Lelis J.A. (2016). Distribution of solutes NO₃ – e Ca in soil columns with vinasse. Rev. Bras. Agric. Irr. 10 (4), 777- 786.
- Deh M. K., Parsaee M. and Mahdavi Z. (2021). Biogas production from sugarcane vinasse at mesophilic and thermophilic temperatures by static granular bed reactor (SGBR). Sustainable Energy Technologies and Assessments. 48, 101569.
- Domínguez S.P. and Besosa T.R. (1992). Efecto de la Vinaza Concentrada en la Producción y Calidad de la Caña de Azúcar. Sociedad Colombiana de la Ciencia del Suelo. - Palmira: [s.n.].
- Eykelbosh A.J., Johnson M.S. and Guimarães E. (2015). Biochar decreases dissolved organic carbon but not nitrate leaching in relation to vinasse application in a Brazilian sugarcane soil. Journal of Environmental Management. 149, 9-16.

- Food and Agriculture Organization of the United Nations – FAO. 1989. Water quality for agriculture. Davis, California, USA.
- Filho F.R., da Silva G., da Silva N.F., Sousa E., Silva L.N., Rodrigues C.R., Cunha F.N., Teixeira M.B. and Loureiro F.A. (2019). Sugarcane Vinasse Cations Dynamics in Cerrado Soils, Brazil. *Sugar Tech.* 21(1), 38–46.
- Fuess L. T., Rodrigues I. J. and Garcia M. L. (2017). Fertirrigation with sugarcane vinasse: Foreseeing potential impacts on soil and water resources through vinasse characterization. *Journal of Environmental Science and Health, Part A.* 0, 1 – 10.
- Gómez J. (2007). Uso de la vinaza en el Ingenio Manuelita. En Seminario sobre el potasio y su importancia en el manejo del cultivo de la caña de azúcar. Cali, Colombia.
- Hadžić E., Lazović N. and Mulaomerović-Šeta A. (2015). The Importance of Groundwater Vulnerability Maps in the Protection of Groundwater Sources. Key Study: Sarajevsko Polje. *Procedia Environmental Sciences.* 25, 104 – 111.
- Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria. Técnicas de toma y remisión de muestras de suelo – Manejo de Suelos.
- Khomutinin Y., Fesenko S., Levchuk S., Zhebrovska K. and Kashparov V. (2020). Optimising sampling strategies for emergency response: Soil sampling. *Journal of Environmental Radioactivity.* 222, 106344.
- Lehmann J. and Schroth G. (2003). Nutrient leaching. Tree, crops and soil fertility. 10.1079/9780851995939.0151.
- Lopez R. A. (2002). Procesos de degradación del suelo: Exceso de sales. Ciclo de conferencias: “Manejo y control de la salinidad del suelo y del agua. Península de Santa Elena, Provincia del Guayas, Ecuador”. Guayaquil, Ecuador.
- López W., Reynoso R., López J., Camas R. and Tasistro A. (2018). Diagnóstico de la compactación en suelos cultivados con maíz en la Región Fraylesca, Chiapas. *Revista mexicana de ciencias agrícolas.* 9 (1).
- Mendoza R. and A. Espinoza (2017). Guía Muestreo de Suelos. Universidad Nacional Agraria y Catholic Relief Services (CRS).
- Meneses Y., Castro M. I. and Jaramillo A. M. (2019). Comparación de la calidad del agua en dos ríos altoandinos mediante el uso de los índices BMWP/COL. y ABI. *Acta Biológica Colombiana.* 24 (2), 299 – 310.
- Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. (2010). Política Nacional para la Gestión Integral del Recurso Hídrico. Colombia.
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2016). Política para gestión sostenible del suelo. Colombia.
- Moran R. G., Sanchez A. L., Rodriguez J., Davila G., Marino E. N., Dendooven L. and Contreras S. M. (2016). Utilization of vinasses as soil amendment: consequences and perspectives. *Springer Plus.* 5, 1007.
- Nortcliff, S., Hulpke, H., Bannick, C.G., Terytze, K., Knoop, G., Bredemeier, M., Schulte-Bisping, H. (2011). Soil, 1. Definition, Function, and Utilization of Soil. In *Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry*, (Ed.).
- Nunes A. D., Etchebehere C., Perecin D., Teixeira S. and Woods J. (2022). Advancing anaerobic digestion of sugarcane vinasse: Current development, struggles and future trends on production and end-uses of biogas in Brazil. *Renewable and Sustainable Energy Reviews.* 157, 112045.
- Páez G.I., Baena L.M., Guerrero S.A., Bautista J.A., Delgado R., Prada J.A. and Rojas J.A. (2012). Determinación de los efectos de la aplicación de vinazas en la

zona no saturada, aguas subterráneas y definición de protocolos de manejo sostenible en el Valle del Cauca. Corporación Autónoma Regional Del Valle del Cauca, CVC. Colombia.

- Páez G.I. and Candela L. (2015). Caso de Estudio Colombia: Monitoreo de la zona no saturada y aguas subterráneas en áreas de aplicación de vinazas Valle del Cauca- Colombia. II Encuentro Nacional sobre gestión de información asociada al agua y red básica nacional de monitoreo de aguas subterráneas. Colombia.
- Páez G., Muñoz F., Candela L., Tamoh K. and Valdes J. (2016). Vinasse application to sugar cane fields. Effect on the unsaturated zone and groundwater at Valle del Cauca (Colombia). *Science of the Total Environment*. 539, 410 – 419.
- Parsaee M., Deh M. K. and Karimib K. (2019). A review of biogas production from sugarcane vinasse. *Biomass and Bioenergy*. 122, 117 – 125.
- Quintero R. (2007) Investigaciones sobre el manejo de las vinazas aplicadas al suelo. En Seminario sobre el potasio y su importancia en el manejo del cultivo de la caña de azúcar. Cali, Colombia.
- Razzaghi F., Arthur E. and Moosavi A. A. (2021). Evaluating models to estimate cation exchange capacity of calcareous soils. *Geoderma*. 400, 115221.
- Rengel M., Gil F. and Montaña J. (2011). Crecimiento y dinámica de acumulación de nutrientes en caña de azúcar. I. macronutrientes. *Bioagro*. 23 (1).
- Ribeiro B.T., de Lima J.M., Guimarães L.R. and Fernandes L.G. (2010) Lead sorption and leaching from an Inceptisol sample amended with sugarcane vinasse. *Sci. Agric. (Piracicaba, Braz.)*. 67 (4), 441 – 447.
- Silva M. M., Rollán A. A. and Bachmeier O. A. (2006). Biodisponibilidad de fósforo en un suelo del sur de Santa Fe (Argentina). Efectos de dos fuentes fosfatadas y sus mezclas con urea. *Agriscientia*. 23 (2), 91 – 97.
- Silva A.F.R., Brasil Y.L., Koch K. and Amaral M.C.S. (2021a). Resource recovery from sugarcane vinasse by anaerobic digestion – A review. *Journal of Environmental Management*. 295, 113137.
- Silva L. C, Moreira R. A., Pinto T. J., Vanderlei M. R., Athayde D. B., Lopes L. F. P., Ogura A. P., Yoshii M. P. C., Freitas J. S., Montagner C. C., Goulart B. V., Schiesari L., Daam M. A. and Espíndola E. L. G. (2021b). Lethal and sublethal toxicity of pesticides and vinasse used in sugarcane cultivation to *Ceriodaphnia silvestrii* (Crustacea: Cladocera). *Aquatic Toxicology*. 241, 106017.
- Siqueira J.C., Braga M.Q., Azara M.S., Garcia K.J., Alencar S.N.M., Ramos T.S., Siniscalchi L.A. B., Assemany P.P. and Ensinas A.V. (2022). Recovery of vinasse with combined microalgae cultivation in a conceptual energy-efficient industrial plant: Analysis of related process considerations. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 155, 111904.
- Takeshita V., Ferreira K., Ventoso T.F., Alonso F.G., Pimpinato R.F. and Tornisielo V.L. (2020) Aminocyclopyrachlor sorption–desorption and leaching in soil amended with organic materials from sugar cane cultivation. *Weed Research*. 60, 363 – 373.
- Tejada M. A. G. (2010). Use of vinasse for soil reclamation and its impact on elemental loads in vertisol soil and groundwater. *Proc. Int. Soc. Sugar Cane Technol. (Vol. 27)*.
- WHO, 2006. Guidelines for the Safe Use of Wastewater, Excreta and Greywater. World Health Organization, Geneva.