

**CARACTERIZACIÓN PARCIAL DE SUELOS CON FINES
FORENSES EN LA COMUNA 4 DE ARMENIA - QUINDÍO**

**CLAUDIA MARCELA CARDONA LINDO
NORVAIRO LOPEZ ROMAN**

**UNIVERSIDAD DEL QUINDÍO
FACULTAD DE CIENCIAS BÁSICAS
PROGRAMA DE QUÍMICA
ARMENIA
2002**

**CARACTERIZACIÓN PARCIAL DE SUELOS CON FINES
FORENSES EN LA COMUNA 4 DE ARMENIA - QUINDÍO**

**CLAUDIA MARCELA CARDONA LINDO
NORVAIRO LOPEZ ROMAN**

**Trabajo presentado como proyecto de grado para optar al título
de Químico**

DIRECTOR

CARLOS MARTÍN MOLINA GALLEGO

Geólogo. Área de Geología Forense. Instituto Nacional de
Medicina Legal y Ciencias Forenses

CODIRECTOR

MARCO ALBERTO GONZALEZ

Químico. Profesor Programa de Química. Universidad del Quindío.

**UNIVERSIDAD DEL QUINDÍO
FACULTAD DE CIENCIAS BÁSICAS
PROGRAMA DE QUÍMICA
ARMENIA
2002**

Nota de aceptación

Presidente del Jurado

Jurado

Jurado

Armenia, 15 de Agosto de 2002

A mi familia:
esas personas a
quienes les debo
lo que soy
y me han
enseñado a vivir

Claudia

A mis padres que
con su sacrificio y
apoyo me
permitieron
explorar el
fascinante mundo
del conocimiento

Vairon

AGRADECIMIENTOS

Los autores expresan su agradecimiento a:

Los peritos forenses Jairo Peláez Rincón, Ernesto Díaz y Néstor Gómez, quienes con sus conocimientos nos orientaron para realizar este proyecto; y en general a todos los funcionarios de Instituto Nacional de Medicina Legal y Ciencias Forenses Regional Bogotá que siempre estuvieron dispuestos a colaborarnos.

A los profesores de la Universidad del Quindío que durante toda nuestra carrera nos condujeron por el mundo de la Química

A la MERCK Colombia por la donación de los reactivos para los análisis

Al comando de la policía Nacional de la ciudad de Armenia por prestarnos seguridad oportuna para la realización del trabajo de campo. Especialmente al Teniente González por toda la ayuda proporcionada.

CONTENIDO

	pág.
INTRODUCCIÓN	17
1. OBJETIVOS	19
2. JUSTIFICACIÓN	21
3. MARCO TEÓRICO	23
3.1. CARACTERÍSTICAS GENERALES DE LA FORMACIÓN ARMENIA	28
3.1.1. Composición de la fracción arcillosa en suelos de la Formación Armenia	28
3.2. MÉTODOS DE COMPARACIÓN PARA SUELOS EN GEOLOGÍA FORENSE	29
3.2.1. Observaciones con el estereomicroscopio	29
3.2.2. Pruebas a la gota	30
3.2.3. Color	37
3.2.4. pH	38
3.2.5. Distribución del gradiente de densidad	40
3.2.6. Distribución del tamaño de partícula de suelo y sedimentos	41
3.2.7. Caracterización de Arcillas	44

	pág.
4. METODOLOGÍA	54
4.1. MUESTREO DE LOS SUELOS	54
4.2. ANÁLISIS DE LABORATORIO	55
4.2.1. Observaciones con el estereomicroscopio	55
4.2.2. Pruebas a la gota	56
4.2.3. Color	59
4.2.4. pH	59
4.2.5. Gradiente de densidad	60
4.2.6. Textura	60
4.2.7. Análisis de los minerales arcillosos	61
5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	63
5.2. DESCRIPCIÓN DEL LUGAR DE MUESTREO DEL SUELO	63
5.3. OBSERVACIONES CON EL ESTEREOMICROSCOPIO	69
5.4. PRUEBAS A LA GOTA	72
5.4.1. Cationes	74
5.4.2. Aniones	76
5.4.3. Prueba para ceniza volcánica	76
5.5. COLOR	77
5.6. pH	80
5.7. GRADIENTE DE DENSIDAD	82
5.8. ANÁLISIS DE TEXTURA DEL SUELO	85
5.9. ANÁLISIS DE MINERALES ARCILLOSOS	88
5.9.1. Análisis de un espectro infrarrojo de la fracción arcilla	94

	pág.
6. CONCLUSIONES	98
7. RECOMENDACIONES	101
8. BIBLIOGRAFÍA	103
ANEXOS	106

LISTA DE TABLAS

	pág.
Tabla 1. Número de onda de las bandas de absorción características observadas en el espectro IR de los suelos, en la región desde 3800 hasta 2800 cm^{-1}	48
Tabla 2. Número de onda de las bandas de absorción características observadas en el espectro IR de los suelos, en la región desde 1850 hasta 950 cm^{-1}	49
Tabla 3. Número de onda de las bandas de absorción características observadas en el espectro IR de los suelos, en la región desde 950 hasta 400 cm^{-1}	50
Tabla 4. Descripción del lugar de muestreo de los suelos	64
Tabla 5. Observaciones con el estereomicroscopio de los suelos de la Comuna 4	70
Tabla 6. Pruebas para cationes extraídos con acetato de amonio de las muestras de suelo A-1 a D-30	74
Tabla 7. Pruebas para cationes extraídos con acetato de amonio de las muestras de suelo D-30 a F-63	74
Tabla 8. Pruebas para cationes extraídos con ácido nítrico de las muestras de suelo A-1 a D-30	75
Tabla 9. Pruebas para cationes extraídos con ácido nítrico de las muestras de suelo D-30 a F-63	75
Tabla 10. Prueba para aniones de las muestras de suelo A-1 a D-30	76
Tabla 11. Prueba para aniones de las muestras de suelo D-30 a F-63	76
Tabla 12. Pruebas a la gota para ceniza volcánica de las muestras de suelo A-1 a D-30	76
Tabla 13. Pruebas a la gota para ceniza volcánica de las muestras de suelo D-30 a F-63	76
Tabla 14. Determinación del color de los suelos de la comuna 4 por comparación directa con la tabla Munsell	79
Tabla 15. Valores de pH de los suelos de la comuna 4 medidos con microelectrodo de vidrio	81
Tabla 16. Densidad relativa de las partículas después de 1 y 3 horas de reposo	84
Tabla 17. Promedio de los porcentajes del tamaño de partícula y	

clase textural del suelo	87 pág.
Tabla 18. Bandas de absorción en el IR en las regiones 4000-3000 y 1200-400cm ⁻¹ para la fracción arcilla de los suelos de la comuna 4 y minerales identificados	90
Tabla 19. Análisis de varianza de pH	112
Tabla 20. Densidad relativa de las partículas después de 1 y 3 horas de reposo con 10 y 5 mg de muestra	114
Tabla 21. Densidad relativa de las partículas después de 1 y 3 horas de reposo. Ensayos iniciales	115
Tabla 22. Densidad relativa de las partículas, variando la densidad de las fracciones, después de 1 y 3 horas de reposo	115
Tabla 23. Densidad relativa de las partículas, aumentando el número de fracciones, después de 1 y 3 horas de reposo	115
Tabla 24. Densidad media del suelo	116
Tabla 25. Porcentajes de tamaños de partícula en triplicados de suelo determinados por el método de la pipeta	118
Tabla 26. Análisis de varianza de la fracción Arena	119
Tabla 27. Análisis de varianza de la fracción Arcilla	119
Tabla 28. Análisis de varianza de la fracción Limo	119
Tabla 29. Análisis físicos, químicos y mineralógicos de las muestras seleccionadas para comparación de métodos.	120

LISTA DE FIGURAS

	pág.
Figura 1. Espectro infrarrojo de una muestra de suelo tomada en Armenia	93
Figura 2. Espectro infrarrojo de una muestra de suelo tomada en Ciudad Bolívar (Bogotá D.C.)	93
Figura 3. Espectro infrarrojo de la muestra 59	94
Figura 4. Ubicación de la comuna 4 en la ciudad de Armenia	106
Figura 5. Ubicación del sitio de muestreo de los suelos	107
Figura 6. Ubicación de las muestras de suelo	108
Figura 7. Distribución porcentual del color	111
Figura 8. Histograma de color según la reproducibilidad entre las repeticiones	111
Figura 9. Histograma pH	112
Figura 10. Histograma Arena	117
Figura 11. Histograma Arcilla	117
Figura 12. Histograma Limo	117
Figura 13. Relación lineal entre las variables Arena, Arcilla y Limo	119
Figura 14. Espectro infrarrojo de la muestra 1	121
Figura 15. Espectro infrarrojo de la muestra 2	121
Figura 16. Espectro infrarrojo de la muestra 3	122
Figura 17. Espectro infrarrojo de la muestra 4	122
Figura 18. Espectro infrarrojo de la muestra 5	122
Figura 19. Espectro infrarrojo de la muestra 6	123
Figura 20. Espectro infrarrojo de la muestra 7	123
Figura 21. Espectro infrarrojo de la muestra 8	123
Figura 22. Espectro infrarrojo de la muestra 9	124
Figura 23. Espectro infrarrojo de la muestra 10	124
Figura 24. Espectro infrarrojo de la muestra 11	124
Figura 25. Espectro infrarrojo de la muestra 12	125
Figura 26. Espectro infrarrojo de la muestra 13	125
Figura 27. Espectro infrarrojo de la muestra 14	125
Figura 28. Espectro infrarrojo de la muestra 15	126
Figura 29. Espectro infrarrojo de la muestra 16	126
Figura 30. Espectro infrarrojo de la muestra 18	126
Figura 31. Espectro infrarrojo de la muestra 20	127
Figura 32. Espectro infrarrojo de la muestra 22	127
Figura 33. Espectro infrarrojo de la muestra 24	127
Figura 34. Espectro infrarrojo de la muestra 26	128

	pág.
Figura 35. Espectro infrarrojo de la muestra 28	128
Figura 36. Espectro infrarrojo de la muestra 30	128
Figura 37. Espectro infrarrojo de la muestra 32	129
Figura 38. Espectro infrarrojo de la muestra 34	129
Figura 39. Espectro infrarrojo de la muestra 35	129
Figura 40. Espectro infrarrojo de la muestra 37	130
Figura 41. Espectro infrarrojo de la muestra 39	130
Figura 42. Espectro infrarrojo de la muestra 40	130
Figura 43. Espectro infrarrojo de la muestra 43	131
Figura 44. Espectro infrarrojo de la muestra 45	131
Figura 45. Espectro infrarrojo de la muestra 47	131
Figura 46. Espectro infrarrojo de la muestra 48	132
Figura 47. Espectro infrarrojo de la muestra 49	132
Figura 48. Espectro infrarrojo de la muestra 50	132
Figura 49. Espectro infrarrojo de la muestra 51	133
Figura 50. Espectro infrarrojo de la muestra 52	133
Figura 51. Espectro infrarrojo de la muestra 53	133
Figura 52. Espectro infrarrojo de la muestra 54	134
Figura 53. Espectro infrarrojo de la muestra 55	134
Figura 54. Espectro infrarrojo de la muestra 56	134
Figura 55. Espectro infrarrojo de la muestra 57	135
Figura 56. Espectro infrarrojo de la muestra 59	135
Figura 57. Espectro infrarrojo de la muestra 61	135
Figura 58. Espectro infrarrojo de la muestra 63	136
Figura 59. Espectro infrarrojo de una muestra de suelo tomada en Ciudad Bolívar (Bogotá D.C.)	136
Figura 60. Espectro infrarrojo de la muestra 10 luego de tratamiento con peróxido de hidrógeno	137
Figura 61. Espectro infrarrojo de la muestra 34 luego de tratamiento con peróxido de hidrógeno	137
Figura 62. Espectro infrarrojo de la fracción <0.038 mm de la muestra 22	137
Figura 63. Espectro infrarrojo de la muestra 49 luego de calcinación a 800°C	138
Figura 64. Espectro infrarrojo de la muestra 5 luego de calcinación a 800°C	138
Figura 65. Espectro infrarrojo de la muestra 1 luego de calentamiento a 160°C por 16 horas	139
Figura 66. Espectro infrarrojo de la muestra 55 luego de calentamiento a 160°C por 16 horas	139
Figura 67. Espectro infrarrojo de la muestra 59 luego de calentamiento a 160°C por 16 horas	139
Figura 68. Mapa según notación de color	140
Figura 69. Mapa según nombre de color	141
Figura 70. Mapa según notación pH	142
Figura 71. Mapa según densidad media	143
Figura 72. Mapa según clase textural	144
Figura 73. Mapa según minerales encontrados	145

LISTA DE FOTOGRAFÍAS

	pág.
Foto 1. Muestra A-05	109
Foto 2. Muestra A-10	109
Foto 3. Muestra A-12	109
Foto 4. Muestras B-13, 14 y 15	109
Foto 5. Muestras C-19 y 20	109
Foto 6. Muestra C-26	109
Foto 7. Muestra D-30	110
Foto 8. Muestra D-32	110
Foto 9. Muestras D-38 y 39	110
Foto 10. Muestra E-48	110
Foto 11. Muestras F-58 y 59	110
Foto 12. Muestra F-63	110
Foto 13. Duplicado de columnas realizadas con bromoformo-etanol	113
Foto 14. Distribución de las partículas de suelos en columnas de bromoformo-etanol y bromoformo-bromobenceno	113
Foto 15. Distribución de las partículas de suelos en columnas de bromoformo-etanol y bromoformo-bromobenceno después de 1 hora de reposo	114
Foto 16. Distribución de las partículas de suelos en columnas de bromoformo-etanol y bromoformo-bromobenceno después de 3 horas de reposo	114
Foto 17. Distribución de las partículas de suelos en columnas de bromoformo-etanol después de 1 hora de reposo	114
Foto 18. Distribución de las partículas de suelos en columnas de bromoformo-etanol después de 3 horas de reposo	114
Foto 19. Distribución de las partículas de suelos en columnas de bromoformo-etanol después de 8 horas de reposo	114

LISTA DE ANEXOS

	pág.
Anexo A. Mapas de la zona de muestreo	106
Anexo B. Lugares de toma de las muestras	109
Anexo C. Color	111
Anexo D. PH	112
Anexo E. Distribución del gradiente de densidad	113
Anexo F. Análisis de textura del suelo	117
Anexo G. Comparación entre los métodos	120
Anexo H. Espectros infrarrojos de la fracción arcilla	121
Anexo J. Mapas según propiedades del suelo	140

RESUMEN

Mediante la aplicación de un modelo analítico se caracterizaron parcialmente muestras de suelo tomadas en la comuna 4 de la ciudad de Armenia con el fin de hacer un aporte a la base de datos de suelo geoquímica con fines forenses.

Dicha caracterización se llevó a cabo con la utilización de técnicas ampliamente usadas en el campo forense para análisis de suelos como son observaciones con el estereomicroscopio, color, pH, densidad y textura; y la adaptación de otras técnicas como el análisis de minerales arcillosos por espectrofotometría infrarroja con transformada de Fourier, en la región de 4000 – 400 cm^{-1} , y pruebas a la gota.

Se encontró que aunque la zona geográfica estudiada pertenece a la misma formación geológica conocida como formación Armenia, los suelos pudieron diferenciarse con la mayoría de las propiedades estudiadas, pero se aclara que ninguna prueba puede considerarse aisladamente para discriminar dos muestras, es necesario realizar una combinación de todos los métodos analíticos disponibles.

Con la espectrofotometría infrarroja con transformada de Fourier en las muestras estudiadas se encontró una variedad limitada de minerales siendo el componente principal de la arcilla de esta zona la hallosita. Las observaciones con el estereomicroscopio muestran que los suelos estudiados contienen materia orgánica en grandes proporciones y los colores predominantes de acuerdo a la tabla Munsell fueron el café –oliva claro y el café –amarillo claro. En la determinación del pH, el suelo estudiado se clasificó como neutro, aunque algunas muestras presentaron pH ligeramente ácido o alcalino. En cuanto a la clase textural todos los suelos resultaron ser Franco-arcillo arenosos. De acuerdo a la distribución de las partículas en los gradientes de densidad se vio una clara tendencia de éstas a presentar densidades entre 2.1 y 2.6 g/cm^3 .

Todos los procedimientos aplicados en este trabajo presentaron una buena reproducibilidad, pero su poder de diferenciación varía ampliamente desde las pruebas a la gota, con un bajo grado de discriminación hasta medición del pH o distribución del gradiente de densidad con una alta discriminación entre las muestras estudiadas.

INTRODUCCIÓN

En el presente trabajo se encuentra una descripción detallada de los métodos utilizados para la caracterización de suelos desde el punto de vista forense, así como también la presentación y el análisis de los resultados de 45 muestras provenientes de la comuna 4 de la Ciudad de Armenia.

Para propósitos forenses, suelo es el material de la tierra que ha sido colectado accidental o deliberadamente y que tiene alguna asociación con el aspecto de una investigación. El uso más común, como el de todos los elementos materia de prueba, es convertirse en evidencia científica para ayudar a establecer la culpabilidad o inocencia de un individuo respecto a un delito. Es de vital importancia tomar en consideración todos los aspectos de la muestra de suelo: físicos, químicos y mineralógicos. Al tener esta información disponible en forma de mapas geoquímicos, los encargados de las investigaciones judiciales tienen más herramientas a la mano, para realizar cotejos, verificar coartadas y llevar a buen término un proceso que incluya muestras de suelo como evidencia.

Es por eso que el Instituto Nacional de Medicina Legal y Ciencias Forenses viene desarrollando un proyecto con el cual se pretende, a largo plazo, levantar

mapas geoquímicos de suelos para fines forenses de todo el territorio colombiano, para ello comenzó con la caracterización de suelos de Ciudad Bolívar en Bogotá.

Para la realización de este proyecto se han utilizado las técnicas más comunes en el área de análisis de suelos para propósitos forenses y que se encuentran disponibles en los laboratorios forenses, como observaciones en el estereomicroscopio, pruebas a la gota, color, pH, densidad y textura. Se ha hecho un aporte adicional, adaptando la técnica de espectrofotometría infrarroja con transformada de Fourier para el análisis de minerales arcillosos, debido a que este equipo se encuentra disponible en el laboratorio del Instituto. Las cantidades de muestra usadas fueron las mínimas posibles (entre 500 y 10 mg) teniendo en cuenta la pequeña cantidad de suelo que está disponible en los casos forenses.

1. OBJETIVOS

1.1. OBJETIVO GENERAL

Realizar un estudio parcial de suelos con fines forenses por análisis Geoquímicos en la Comuna 4 de la ciudad de Armenia

1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1.2.1. Utilizar métodos de análisis de suelos con aplicación forense, tales como: pruebas a la gota, observaciones con el estereomicroscopio, color, pH, densidad, y textura.

1.2.2. Determinar minerales arcillosos por el método de espectrometría de absorción infrarroja con transformada de Fourier

1.2.3. Ampliar la cobertura de la investigación geoquímica de suelos con fines forenses que se está realizando actualmente en Ciudad Bolívar, a otras zonas de Colombia, en este caso la ciudad de Armenia.

1.2.4. Continuar la elaboración de la base de datos de suelos con fines forenses

2. JUSTIFICACIÓN

El suelo es un elemento de prueba que permite establecer la relación existente entre el lugar de los hechos y las personas u objetos involucrados en la investigación judicial, como pueden ser: la víctima, el victimario, el(los) vehículo(s), y las herramientas (palas, hachas, martillos, etc.), entre otros.

Al tener un alto valor como evidencia, en las ciencias forenses, es imperativo que la información potencial de éstas trazas pueda ser identificada por una combinación adecuada de métodos analíticos. La experiencia ha demostrado que los mejores resultados pueden ser obtenidos cuando todos los aspectos de la evidencia, incluyendo físicos, químicos y mineralógicos son tomados en consideración.

A pesar de la importancia de dicha evidencia, sólo un laboratorio forense de nuestro país cuenta con la infraestructura e información para comparar suelos con fines forenses, lo que hace urgente la realización de este estudio experimental en el cual se aplica un modelo analítico con el que se pueden identificar y diferenciar suelos en cortas distancias, para realizar mapas forenses caracterizando los suelos de las distintas regiones del país (en este

caso en la ciudad de Armenia), de acuerdo a sus propiedades físicas, químicas y mineralógicas; que más adelante podrán ser utilizados por la justicia para resolver casos cuya evidencia esté representada por muestras de suelo procedentes de estas áreas del país que han sido estudiadas.

Es de resaltar que el desarrollo de estos estudios de suelos darán un aporte muy positivo a las ciencias forenses en Colombia, colocándola a la par con países como Alemania, Inglaterra, Estados Unidos, Canadá y Japón, donde ya se han realizado este tipo de trabajos a través de la geología forense como herramienta básica utilizada para el esclarecimiento de diferentes delitos.

La afirmación anterior debe entenderse como una necesidad social que admite un amplio campo de investigación. En este caso se puede hablar de una labor interdisciplinaria donde participan médicos, físicos, geólogos, químicos y estudiantes de dichas áreas, que ponen sus conocimientos en aras de los avances científicos; planteando así modelos con soluciones a los problemas sociales y mejorando sistemas como el judicial.

Actualmente el Instituto Nacional de Medicina Legal y Ciencias Forenses y la Universidad Nacional de Colombia adelantan estudios de este índice en un área de 48 Km² al sureste de Bogotá, y se pretende iniciarlos en otras ciudades y departamentos del país. Con el presente proyecto se hará el aporte correspondiente a la ciudad de Armenia.

3. MARCO TEÓRICO

El suelo es formado por el deterioro físico, químico y biológico de la capa más superficial del manto de roca que cubre la tierra. Es una mezcla de sustancias, tanto orgánicas como inorgánicas, de diferentes tamaños y composición (Demmelmeyer y Adam, 1995). Esta diversidad de materiales de la tierra y los cambios tanto horizontales como verticales que presentan, proporciona un alto poder de discriminación y por ello un significativo valor como evidencia. El número de suelos diferentes a partir de observaciones y medidas que podemos tomar en ellos son casi ilimitados. (Murray, 2000)

A través del curso de millones de años, una diversidad de procesos han depositado y modificado diferentes tipos de suelo en diferentes lugares. El suelo cambia horizontal y verticalmente, incluso en un área muy pequeña, dichos cambios pueden presentarse de una manera poco uniforme. (Murray, 2000)

Cada persona tiene contacto diario con suelo y partículas de polvo. La transferencia de dichas partículas al cuerpo, ropa y otros objetos es inevitable, como dejar la huella de un zapato o una huella digital. Incluso ahora, a pesar

de su alto valor como evidencia, el suelo y las partículas de polvo pertenecen a las formas relativamente exóticas de pruebas presentadas en procesos criminales a comparación con las áreas clásicas de las ciencias forenses.

La principal razón por la que el suelo no es considerado como “evidencia clásica” es el esfuerzo relativamente grande para la mayoría de los exámenes científicos, también por su complicada composición heterogénea, la cual muestra características de muchos productos naturales que puede llevar a incertidumbres a la hora de determinar el método analítico que conducirá a los mejores resultados. (Demmelmeier y Adam, 1995)

Cada tipo de suelo tiene sus propias características, referidas a su apariencia, color, textura y propiedades químicas y mineralógicas. Son estas variaciones, combinadas con nuestra habilidad para medir y observar las distintas clases de materiales, lo que nos da la capacidad para diferenciarlos. (Murray, 2000)

El valor y el uso del suelo como evidencia tiende a incrementarse. Sin embargo, este incremento depende del entrenamiento apropiado de los examinadores y colectores de evidencia. Lo más importante son los esfuerzos para poner en su conocimiento el valor del suelo como prueba, si este no es colectado de una manera apropiada y oportuna, nunca será examinado y los resultados no podrán ser presentados en la corte. (Murray, 2000)

Aplicando el análisis del suelo como prueba pericial en los procesos judiciales, se pueden realizar los siguientes cotejos (Murray y Tedrow, 1975)

- ◆ Suelo adherido a una víctima de homicidio, comparado con el suelo presente en el lugar donde fue hallado el cuerpo o con el suelo encontrado en los zapatos o prendas de un sospechoso.
- ◆ Suelo en los zapatos del sospechoso, comparado con el suelo del sitio de los hechos.
- ◆ Suelo del interior (asientos, tapetes, etc.) y/o exterior (guardabarros, defensa, etc.) del vehículo involucrado, comparado con el suelo del sitio de los hechos.
- ◆ Suelo adherido a puertas golpeadas con el pié, comparado con el suelo encontrado en los zapatos del sospechoso.
- ◆ Suelo presente en una pala decomisada a un sospechoso, comparado con el suelo de la excavación de una fosa o tumba.
- ◆ Suelo presente en el cuchillo y pantalón del sospechoso, comparado con el suelo de la escena donde ocurrió la violación.

La relación entre la geología y las ciencias forenses ha existido desde 1887 con las aventuras de Sherlock Holmes, este personaje creado por Conan Doyle, es acreditado como el gestor de la Geología Forense. En 1893, otro autor, investigador y profesor de criminología, el australiano Hans Gross publicó el libro *Handbook for Examining Magistrates*, en el cual resaltó la importancia de microscopistas y mineralogistas para el estudio de “polvo”, suciedad y salpicaduras en la ropa. El Dr. Georg Popp, científico forense alemán, en 1904, desarrolló y presentó el primer ejemplo de evidencia en un caso criminal usando materiales del suelo. En Francia, Edmond Locard en el

año de 1910, realizó un importante trabajo con identificación de partículas, estudiando, catalogando y usando en muchos casos restos de polvo asociado con crímenes y sospechosos. Este polvo estaba compuesto usualmente de minerales o materiales relacionados. Edward Oscar Heinrich, fue uno de los más famosos criminalistas en Estados Unidos, quien llevó a cabo algunos casos en los que debió aplicar sus conocimientos en geología. El *Federal Bureau of Investigation Laboratory*, desde 1935, fue uno de los primeros laboratorios forenses en los Estados Unidos en usar suelo y análisis minerales en casos criminales (Murray y Tedrow, 1975).

En 1975 Murray y Tedrow publicaron su libro "*Forensic Geology*" el cual se convirtió en lectura obligada para investigadores, abogados, oficiales de policía y geólogos que quieren tener información específica acerca de la geología forense. En las últimas décadas el interés por esta ciencia se ha incrementado y numerosos trabajos han sido realizados. En algunos de estos estudios se han desarrollado técnicas para identificar e individualizar partículas de arena, utilizando microscopía electrónica de barrido y microscopía de transmisión electrónica (Fitzpatrick and Thornton, 1975, tomado de Junger, 1996); se han implementado métodos para la diferenciación de suelo por medio de gradientes de densidad (Nute, 1975, tomado de Junger, 1996), observando el color de la fracción de arena de la muestra (Janssen, 1983, tomado de Junger, 1996), y obteniendo el valor del pH del suelo (Dudley, 1976); todas las técnicas anteriores demostraron un alto poder de discriminación entre los suelos.

Muchos investigadores se han inclinado por el examen instrumental de suelos utilizando técnicas como la activación neutrónica y el análisis por absorción atómica con las que se obtuvieron diferencias en la composición de elementos trazas de las muestras estudiadas (Hoffman y Brunelle, 1969, tomado de Junger, 1996), la cromatografía líquida de alta resolución (HPLC) con la que se encontraron grandes variaciones en los suelos en muy cortas distancias (Siegel y Precord 1985, tomado de Junger, 1996), con. El análisis inorgánico por fluorescencia de rayos X (XRF) fue usado para predecir el origen de una muestra de suelo ofreciendo resultados confiables (Hiraoka, 1994, tomado de Junger, 1996)

En nuestro país hasta el momento se han realizado dos estudios de suelos con fines forenses. El primero tuvo como fin validar algunos métodos analíticos de suelos, tales como: color, fraccionamiento por tamizaje, pH, análisis mecánico, mineralogía, difracción de rayos X y microscopía electrónica de barrido para su aplicación en geología forense utilizando suelos de Funza y Zabrinisky en Cundinamarca. (Molina y Moreno, 1995).

En el segundo se realizó la caracterización petrográfica y mineralógica de los suelos de un sector al sudeste de Ciudad Bolívar en Bogotá. Con éste, se creó una base de datos, donde se muestran los resultados obtenidos para ser aplicados posteriormente en las investigaciones judiciales que involucren suelos de dicho sector, se estandarizó el procedimiento de preparación de muestras de suelo para el análisis petroográfico y mineralógico. (Peña y Peña, 1998).

3.1. CARACTERÍSTICAS GENERALES DE LA FORMACIÓN ARMENIA

La ciudad de Armenia se encuentra sobre la formación que lleva su nombre. Constituye de una secuencia de depósitos no consolidados, principalmente de cenizas volcánicas y flujos de lodos que afloran al oeste de Armenia fosilizando rocas más antiguas y enmascarando las relaciones geológicas. Esta formación tiene una edad Plioceno-Pleistoceno. (Ingeominas, 1991)

Las arcillas del Quindío, especialmente las ocurrencias localizadas cerca de centros urbanos y sobre las vías de comunicaciones son residuales. Teniendo en cuenta algunas relaciones geológicas se les ha asignado una edad probable como paleoceno pudiendo ser más antigua con removilizaciones recientes. Sistema que por lo general se encuentra enmascarado y dislocado por la mayor actividad del sistema romeral. (Ingeominas, 1987)

3.1.1. Composición de la fracción arcillosa en suelos de la Formación Armenia

En estos suelos los medios edáficos se han desarrollado a partir de materiales aluviales recientes, poco meteorizados y bajo condiciones de alteración química ligeramente drásticas, a raíz de la baja pluviosidad que impera en esta área. Estas condiciones determinan que la arcilla esté integrada por las asociaciones montmorillonita, vermiculita, y montmorillonita, caolinita, vermiculita. (Malagón y otros, 1995)

3.2. MÉTODOS DE COMPARACIÓN PARA SUELOS EN GEOLOGÍA FORENSE

Las bases de un análisis significativo de cada muestra de suelo consisten en un examen paso a paso de las características generales, las cuales también podrán revelar algunos rasgos especiales que puedan estar presentes.

Los métodos comprenden desde exámenes directos, medidas físicas y pruebas químicas hasta modernos métodos de instrumentación

3.2.1. Observaciones con el estereomicroscopio.

Esta observación se realiza para hacer una descripción general del suelo, incluyendo las características morfológicas de las partículas con una tabla patrón de esfericidad y redondez. (Molina y Moreno, 1995). El grado de redondez hace referencia a la agudeza de los bordes y cantos de una partícula, mientras el de esfericidad corresponde a la tendencia de la partícula a tener forma de esfera. El tamaño de partícula, la agregación de las mismas, la humedad y la vegetación presentes pueden ser observados (METRO DADE POLICE DEPARTMENT 1988). Además, se deben extraer todos los elementos ajenos a la composición natural del suelo, tales como: fibras, cabellos, partículas de vidrio, fragmentos de papel y trozos de pintura entre otros, para un posterior estudio paralelo que complemente la investigación

Con el tamizaje de la muestra se pueden remover las partículas más grandes y la mayoría de los fragmentos orgánicos de mayor tamaño. Si la muestra es lavada cuidadosamente en agua, las partículas orgánicas más livianas flotarán y pueden ser removidas para ser estudiadas. El tratamiento con peróxido de hidrógeno remueve la materia orgánica fina y limpia la muestra. (Murray y Tedrow, 1975)

3.2.2. Pruebas a la gota.

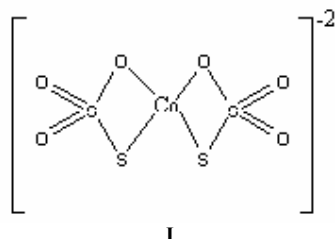
3.2.2.1. Detección de los cationes metálicos de los suelos.

Las especies catiónicas canjeables de interés más frecuentes en los suelos son los iones Ca^{+2} , Mg^{+2} , K^+ , Mn^{+2} , Na^+ , que son extraídos todos con facilidad y determinados en el extracto que se obtiene del suelo con una solución 1N de acetato de amonio. Si bien el Al^{+3} , Fe^{+3} , Cu^{+2} , Zn^{+2} y Co^{+2} se extraen en parte con el acetato de amonio, su química en los suelos es más compleja que la de los cationes metálicos más abundantes. Las ventajas de este reactivo son su eficacia para mojar el suelo y reemplazar a los cationes canjeables.

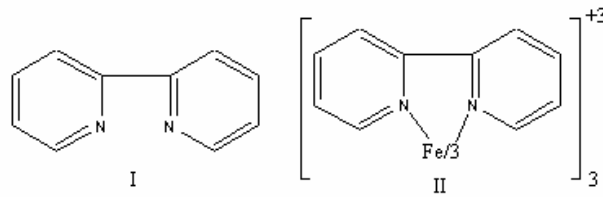
Los Fe^{+2} y Fe^{+3} son solubles en ácidos diluidos. El Mn^{+2} total puede determinarse en una alícuota del filtrado obtenido mediante la separación con hidróxido de amonio. La cantidad de Cu^{+2} que puede extraerse mediante varios reactivos oscila entre la casi totalidad en ácido perclórico a una fracción muy pequeña en acetato de amonio neutro. El Zn^{+2} puede extraerse de los suelos con ácido fluorhídrico (con unas gotas de ácido sulfúrico) o con acetato de amonio 1N.

Para llevar a cabo la extracción lo ideal es que la muestra de suelo esté en las condiciones de humedad en que se encuentra en el campo, de forma que el equilibrio iónico no haya sido perturbado por el proceso de desecación. El procedimiento de extracción con centrifuga es rápido y conveniente cuando se utilizan semimicro métodos de determinación. (Jackson, 1964)

- Co^{+2} . Si una solución neutra de una sal de cobalto se agrega a una solución concentrada de tiosulfato de sodio resulta un color azul. Este efecto probablemente se debe a la formación de los iones complejos $[\text{Co}(\text{S}_2\text{O}_3)_2]^{-2}$ (I). Esta prueba para el cobalto es específica dentro de los grupos de iones metálicos que forman aminas (Zn, Cd, Cu, Ni, Pd). Límite de identificación: 8 μg de cobalto.



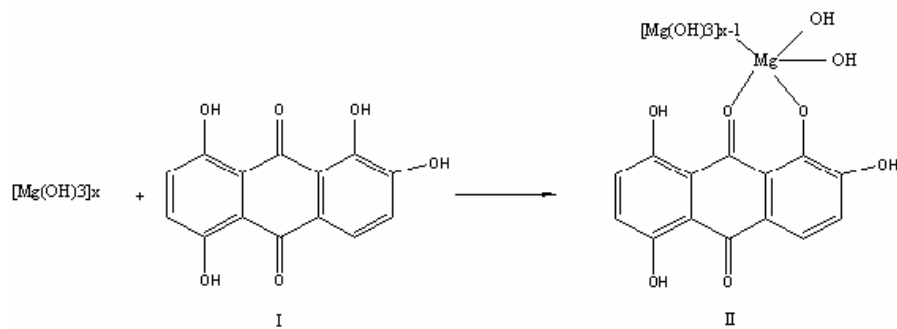
- Fe^{+2} . Prueba con α,α' -dipiridilo y compuestos emparentados. Las sales de Fe^{+2} reaccionan, en solución ácida, con la base orgánica α,α' -dipiridilo (I) dando un catión complejo muy estable, soluble, de color rojo intenso (II). Las sales de Fe^{+3} no reaccionan en estas condiciones; en consecuencia, cantidades muy pequeñas de sales de Fe^{+2} pueden ser reveladas en presencia de grandes cantidades de Fe^{+3} . Límite de identificación: 0.03 μg de hierro.



- Fe^{+3} . *Prueba con ferrocianuro de potasio.* El ferrocianuro de potasio forma azul de Prusia, $\text{Fe}_4[\text{Fe}(\text{CN})_6]_3$, con las sales férricas en solución ácida. Límite de identificación: 0.1 μg de hierro (sobre papel). 0.05 μg de hierro (sobre placa).
- Fe^{+3} . *Prueba con tiocianato de potasio.* Los iones de Fe^{+3} reaccionan con los iones tiocianato en solución ácida dando un color rojo. Resultan varios compuestos coloridos que están en equilibrio entre sí. Límite de identificación: 0.25 μg de hierro.
- Mg^{+2} . *Prueba con hipoyodito de álcali.* Si está recién precipitado, el hidróxido de magnesio se tiñe de rojo pardo intenso con una solución de yodo en yoduro de potasio. Así, cuando el hidróxido de magnesio se forma en presencia de yodo libre, el precipitado es rojo pardo. Se trata de unos compuestos de adsorción de hidróxido de magnesio y yodo. Las condiciones más adecuadas para la formación de este compuesto colorido (aun en solución diluida) se obtienen cuando una solución de yodo se decolora con hidróxido de sodio o de potasio inmediatamente antes de la adición de la sal de magnesio. En presencia de magnesio, el color pardo es claramente visible. Límite de identificación: 0.3 μg de magnesio.

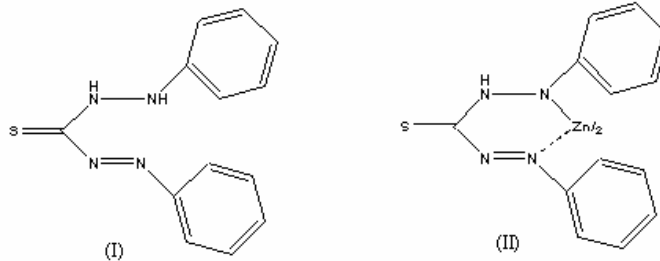


- Mg^{+2} . *Prueba con quinalizarina*. Las sales de magnesio dan un precipitado azul o una coloración azul aciano, según la concentración, con las soluciones alcalinas de quinalizarina I (1, 2, 5, 8-tetrahidroxiantraquinona). El producto colorido es una laca de magnesio-quinalizarina (II), esto es, un compuesto de adsorción de hidróxido de magnesio con el colorante. De acuerdo con la cantidad de magnesio presente aparece un precipitado o una coloración azul; la prueba en blanco queda azul violeta. Límite de identificación: 0.25 μg de magnesio.



- Mn^{+2} . *Prueba con formaldoxima*. Las sales de Mn^{+2} forman un complejo rojo naranja o pardo con la formaldoxima en solución alcalina. La prueba es selectiva porque los iones interferentes pueden ser enmascarados por EDTA e hidroxilamina. Límite de identificación: 0.02 μg de Mn.
- Zn^{+2} . *Prueba con ditizona*. La difeniltiocarbazona (ditizona) (I) forma sales complejas internas coloridas, insolubles, con un número de metales pesados. Estos productos son fácilmente extraídos por los solventes orgánicos. La sal de zinc rojo púrpura (II), formada en soluciones neutras, alcalinas y acéticas es soluble en tetracloruro de carbono sin cambio de color. Límites de identificación: 0.025 μg de zinc en solución neutra de sulfato de zinc, 0.06 μg de zinc en amoníaco al 2%, 0.06 μg de zinc en

presencia de amoniaco, sales de amonio y tartratos, 0.9 μg de zinc en hidróxido de sodio a 2%, 0.9 μg de zinc en ácido acético a 10%, 0.05 μg de zinc en ácido acético a 10% y acetato de amonio a 5%. (Anger y Fritz, 1980)

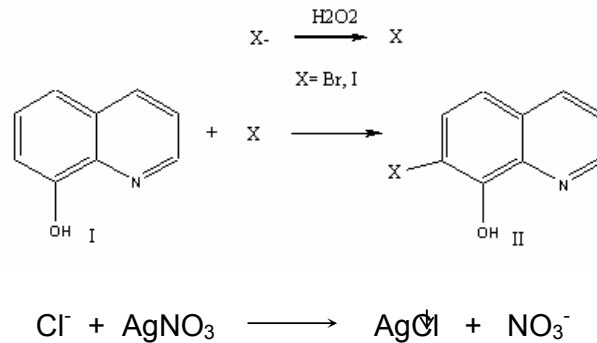


3.2.2.2. Detección de los aniones del suelo.

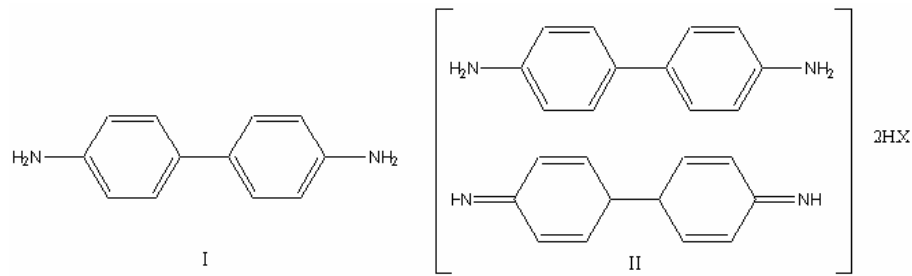
Los aniones más comunes del suelo son: Cl^- , MnO_4^- , $\text{MoO}_4^{=}$, NO_2^- , NO_3^- , $\text{PO}_4^{=}$, $\text{SO}_4^{=}$ y H_3SiO_4^- . La extracción de los aniones se lleva a cabo mediante ácidos diluidos o, en el caso de los fosfatos, una solución de BRAY, por el método de centrifugación.

- Cl^- . *Prueba por precipitación de cloruro de plata en presencia de otros iones de halógenos.* En contraste con las soluciones de cloruros en ácido acético o en ácidos minerales diluidos, las cuales permanecen prácticamente inafectadas por adición de peróxido de hidrógeno, los bromuros y los yoduros son oxidados a bromo y yodo elementales, respectivamente. Si esta oxidación se lleva a cabo en presencia de 8-hidroxiquinolina I (oxina), este compuesto fenólico es bromado o yodado por el halógeno libre. La solución ácida de la oxina halogenada (II) no reacciona con el nitrato de plata y, en consecuencia, sólo los iones cloruro

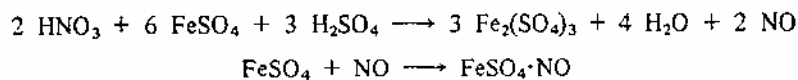
inalterados serán precipitados como cloruro de plata. En presencia de cloruro aparece una turbidez o precipitado incoloro. Límite de identificación: 2 µg de cloruro.



- PO_4^{3-} . *Prueba con molibdato de amonio y bencidina.* Los fosfatos reaccionan con los molibdatos produciendo sales del ácido fosfomolibdico, $\text{H}_7\text{P}(\text{Mo}_2\text{O}_7)_6$, complejo en soluciones que contienen ácidos minerales. Debido a la formación de ácido fosfomolibdico, aun la adición de pequeñas cantidades de iones PO_4^{3-} a las soluciones ácidas de molibdato lleva a cabo una activación del molibdeno con la consiguiente entrada en la reacción redox. La bencidina (II), que no es afectada por el ácido molibdico libre y los molibdatos normales, es oxidada instantáneamente en solución de ácido acético por el ácido fosfomolibdico y aun por su sal insoluble de amonio. Esta oxidación se aplica en la prueba para los fosfatos. La reacción es extremadamente sensible, pues se forman dos productos azules, a saber, el azul de bencidina (II)(= producto de oxidación de la bencidina) y el azul de molibdeno (= producto de reducción del ácido molibdico). Límite de identificación: 1.25 µg de P_2O_5 .



- NO_3^- . *Prueba con sulfato ferroso y ácido sulfúrico.* Cuando un cristal de sulfato ferroso se pone en contacto con una solución de nitrato y se agrega muy cuidadosamente ácido sulfúrico concentrado, se forma una zona parda alrededor del cristal. El color se debe a un compuesto de adición, $\text{FeNO} \cdot \text{SO}_4$. Límite de identificación: 2.5 μg de ácido nítrico. (Anger y Fritz, 1980)



3.2.2.2. *Detección de cenizas volcánicas*

El test de FNa realizado por Fieldes y Perrot en 1966 (tomado de García, 1984) es un método rápido y sencillo para la localización de los componentes de bajo grado de orden, desarrollado en principio para la detección de alofán en suelos sobre cenizas volcánicas, básicamente es indicador de los grupos reactivos aluminio-hidroxilo que están presentes en el alofán (Hewitt, 1992).

Esta prueba pertenece al grupo de métodos de identificación de componentes pobremente cristalinos o no cristalinos, cuya utilidad es mayor como índice de presencia que con fines cuantitativos (García, 1984)

3.2.3. Color.

El color de una masa de suelo puede variar con la humedad o con su composición química. Es una de las características más importantes de identificación de minerales presentes en suelos. Los minerales forman un mosaico de grises, amarillos, cafés, rojos, negros, e incluso verdes y púrpuras brillantes. Virtualmente todos los posibles colores del espectro de luz visible están presentes. A parte de los minerales los colores en los suelos son también el resultado de la materia orgánica. El humus presente, junto con los minerales, confiere al suelo colores oscuros.

El suelo es una mezcla de materiales de varios tamaños y composiciones, conteniendo minerales individuales de diferentes colores. Si el suelo es fraccionado dentro de varios tamaños –arena gruesa, arena media, arena fina, limo y arcilla, hay una tendencia para las partículas más finas a exhibir colores más rojos o cafés rojizos en contraposición a los amarillos y verdes de las fracciones más gruesas. Las partículas más finas (arcillas) presentan más uniformidad en su color y también en su composición mineral. (Murray y Tedrow, 1975)

En el estudio del suelo para propósitos forenses la muestra es secada a 110⁰C y observada bajo la luz natural utilizando las cartas de Munsell Color Company, estos están establecidos sobre tres factores: *hue*, *value* y *chroma*, *Hue* es el color espectral dominante, *value* indica el brillo del color claro-oscuro y *chroma* es la pureza relativa del color espectral. Por ejemplo un suelo de color café grisáceo se representa por un código de la tabla Munsell así: 2.5Y 5/2, en

donde 2.5Y se refiere al *hue*, 5 al *value* y 2 al *chroma*. (Murray y Tedrow, 1975). Las cartas de Munsell muestran correlación entre el color y la composición química del suelo, esto es, el *hue* tiene una alta relación con el porcentaje de titanio y de hierro, mientras que las arcillas y la materia orgánica son reconocidas en el componente *value* de la carta. (Junger, 1996)

3.2.4. pH.

El grado de acidez o alcalinidad del suelo y materiales geológicos es expresado en valores de pH, el cual es una medida de la concentración de los iones libres de hidrógeno en solución. Los valores de pH del suelo están generalmente entre 3.5 a 8.5 y en algunas ocasiones un poco más alto o más bajo.

El poder de discriminación de esta propiedad del suelo puede ser usado en análisis forenses ya que puede ser aplicada a pequeñas cantidades de muestra, mediante métodos sencillos y reproducibles.

Los diversos métodos para la determinación del pH van desde la utilización de indicadores colorimétricos, papeles indicadores hasta el método potenciométrico.

Con los indicadores colorimétricos se puede determinar el pH del suelo de una manera rápida y sencilla, en intervalos de 0.5 unidades en pequeños volúmenes (5ml -100 μ l). También se ha determinado que el indicador para suelo BDH y el púrpura de bromocresol arrojan resultados muy cercanos a los

obtenidos por un potenciómetro. La estimación del pH usando papel indicador en un rango estrecho, como un test discriminatorio preliminar ha sido recomendado por algunos autores, pero su uso no ha sido ampliamente aplicado por los científicos forenses por la falta de información y la fiabilidad de los resultados cuando es utilizado sobre pequeñas muestras, como las requeridas para fines forenses (Dudley, 1976)

Utilizando solución indicadora universal pH 4.0 a 10.0, puede determinarse el pH con una cantidad muy pequeña de suelo (200 mg), donde se compara el color de la solución con una tabla patrón de diferentes colores de pH. Igualmente se realizan lecturas usando el método potenciométrico, para las mezclas de suelo: agua en proporción 1: 2,5. Los resultados obtenidos potenciométricamente se encuentran entre el intervalo de pH determinado con la solución indicadora. (Molina y Moreno, 1995).

3.2.5. Distribución del gradiente de densidad.

La densidad de una partícula individual o de un aglomerado de partículas es otra característica física del suelo que puede ser establecida durante un examen forense. La densidad será diferente para cada partícula dependiendo de los minerales presentes y de la composición química de la misma. Para los minerales individuales más comunes, la densidad varía en un amplio rango desde 20 g/cm^3 para el oro hasta 1.7 g/cm^3 para la carnalita.

Para establecer la densidad de las partículas de una muestra de suelo, debe realizarse una columna con un gradiente de densidad usando capas sucesivas de líquidos de densidad decreciente en un tubo estrecho. Las capas individuales son mezclas de líquidos de densidades diferentes. La muestra de suelo es suspendida en la capa superior que es la menos densa. Las partículas se hunden hasta alcanzar la capa cuya densidad es la más cercana a la suya. Este método solo puede ser usado para comparación entre la muestra dubitada y la de control, no como una determinación absoluta de la densidad.

Las sustancias utilizadas en la columna varían de un laboratorio a otro. Sin embargo las más comúnmente usadas son el bromoformo ($\delta=2.89$) y el bromobenceno ($\delta=1.49$). La distribución de las partículas en los tubos es examinada y usualmente fotografiada.

El método del gradiente de densidad para la comparación de suelos es ampliamente usado en los laboratorios de ciencia forense y ha sido de confianza en la identificación de la identidad de las muestras de suelo mientras los resultados sean tratados con cuidado, puesto que en ocasiones la reproducibilidad del método se torna difícil.

Chaperlin y Howarth en 1983 desarrollaron un trabajo para revisar y evaluar el método del gradiente de densidad, en el cual determinaron que los resultados son muy dependientes del observador, proponiendo la utilización de un

densitómetro óptico para registrar el resultado de una manera conveniente y almacenarlo en un computador.

3.2.6. Distribución de tamaño de partícula de suelo y sedimentos.

La distribución del tamaño de partícula es una característica muy significativa que puede ser usada para la determinación de la clase de suelo. La determinación exacta del tamaño de partícula ha sido usada por un largo tiempo en los estudios del suelo y algunas veces requiere un gran esfuerzo para la caracterización de una muestra de suelo particular. (Demmelmeyer y Adam, 1995). Un diagrama mostrando la distribución del tamaño de los granos puede ser usado como un método comparativo y en algunos casos puede ser de valor evidencial. (Murray y Tedrow, 1975).

El propósito del análisis mecánico del suelo es determinar el porcentaje de cada fracción de suelo de acuerdo al tamaño de las partículas. Mediante este análisis el suelo es categorizado en tres fracciones separadas. Estas fracciones son: arena (1 –0.02mm), limo (0.02 –0.002mm) y arcilla (menor que 0.002mm) (METRO DADE POLICE DEPARTMENT 1988).

Los métodos frecuentemente usados para la determinación del tamaño de partícula son: fraccionamiento por tamizaje, comparación de patrones, sedimentación, difracción láser y dispersión.

En el método descrito por Dudley y Smalldon, 1978, para la comparación de dos distribuciones de tamaños de partícula, se obtiene un poder de discriminación entre el 0.97 y 0.99 para un nivel de confianza del 95%, lo que demuestra su factibilidad para la comparación de suelos.

El método más utilizado por las ciencias forenses es el fraccionamiento por tamizaje, ya que es el más fácil. El rango de tamaño de partículas puede ser repartido por tamizado incluyendo las fracciones de arena y de grava (> 65 μ m). Con el uso de la técnica de tamizaje húmedo, posibilita la utilización de sondas sónicas que proveen una mejor dispersión, las fracciones más grandes de los componentes del limo pueden ser también examinadas. La posibilidad de errores por tamizaje en seco es más alta, particularmente si la muestra contiene aglomerados de partículas finas que no han sido completamente dispersadas. (Demmelmeier y Adam, 1995).

El uso de patrones para la determinación de tamaño de partícula ha jugado un papel muy limitado dentro de las ciencias forenses, aunque una completa observación en el microscopio y con la ayuda de varios software disponibles, el análisis exacto del tamaño de partículas de un suelo puede ser ciertamente posible. (Demmelmeier y Adam, 1995).

El método de la pipeta es un método de sedimentación. El método se basa en el principio de que la tasa de asentamiento depende del material mineral de la partícula y del tamaño de la misma, de tal forma que las partículas más

grandes y densas se asientan en menor tiempo. El procedimiento está basado en la Ley de Stokes:

$$V = \frac{2}{9} [g \cdot r^2 (d-d')/n]$$

donde:

$V \rightarrow$ velocidad de caída en cm/s

$g \rightarrow$ aceleración de la gravedad

$r \rightarrow$ radio de la partícula en cm

$d \rightarrow$ densidad de la partícula en g/cm³

$d' \rightarrow$ densidad del fluido en g/cm³

$n \rightarrow$ viscosidad del fluido en equilibrio

La muestra debe ser colocada en presencia de una solución dispersante y calcularse el tiempo para el asentamiento de los diferentes tamaños de partículas que están en suspensión. Para el agua a una temperatura de 25°C, una muestra puede ser tomada a los 226 segundos (partículas menores de 0.02mm) y después de 6.25 horas (partículas menores de 0.002 mm). (METRO DADE POLICE DEPARTMENT 1988)

La difracción con láser es otra técnica muy útil en los análisis forenses puesto que requiere muy poca cantidad de muestra (1-2 μ g); la muestra debe estar bien dispersa para óptimos resultados.

3.2.7. Caracterización de arcillas.

Se da el nombre de arcillas a un material natural, fino granular, de aspecto terroso, constituido por un grupo de sustancias cristalinas, conocidas como minerales arcillosos, y fragmentos de rocas y otros minerales. Las arcillas son plásticas cuando están húmedas, rígidas cuando se secan y vítreas cuando se someten a la acción del fuego. (Ingeominas, 1987)

La mineralogía de los minerales arcillosos es muy compleja; esto se refleja, lógicamente, en la composición de las arcillas encontradas en la naturaleza, ya que algunas son formadas por uno solo de los minerales del grupo, mientras que otras son una mezcla de diversos minerales arcillosos. (Ingeominas, 1987)

El estudio y reconocimiento de los minerales arcillosos se realiza, normalmente, por técnicas diferentes al simple microscopio petrográfico convencional. Para este fin se emplea difracción de rayos X, análisis termodiferencial o DTA, microscopio electrónico y análisis por infrarrojo. (Ingeominas, 1987)

La difracción de rayos X es uno de los métodos de identificación de suelos más confiables e importantes. El método se basa en el arreglo de los átomos, iones y moléculas dentro de la especie. La muestra es analizada pasando los rayos X a través de un cristal y midiendo el ángulo de los rayos X difractados. La difracción de rayos X es utilizada como la principal herramienta moderna en la identificación de minerales arcillosos. La composición química de las arcillas generalmente nos dice muy poco acerca de la naturaleza de las arcillas, pero

las posibilidades de identificación de arcillas por difracción de rayos X son casi ilimitadas. (Murray y Tedrow, 1975).

El análisis termodiferencial se basa en la observación y medida del calor absorbido o desprendido por un material que experimenta cambios físicos o químicos al ser calentado o enfriado. Muchos constituyentes del suelo al ser calentados sufren reacciones térmicas, las cuales pueden servir como propiedad diagnóstica para su caracterización. La identificación de los minerales arcillosos por ATD es posible gracias a su naturaleza hidratada, que los hace térmicamente activos en el límite de variación normal de temperatura de un ATD (ambiente a 1000 -1500°C). Para propósitos comparativos los termogramas pueden ser superpuestos para observar similitudes o diferencias, comparándolas con patrones estándar o curvas de minerales bien reconocidos, obtenidas en condiciones similares (Malagón y Pulido, 1995).

La microscopía electrónica ha sido ampliamente usada para propósitos forenses ya que con ella es posible examinar partículas con una gran magnificación, lo cual brinda detalles que pueden ser omitidos por otros métodos. El microscopio electrónico se emplea para análisis de fracciones finas de los minerales arcillosos y permite determinar la forma y el tamaño de los granos y su proporción en la muestra. Mediante el microscopio electrónico de barrido se pueden estudiar fragmentos de muestra sin ninguna preparación previa; esto brinda la posibilidad de observar granos de minerales arcillosos no deformados por su dispersión en agua o por otros pretratamientos. (Malagón y Pulido, 1995)

La espectroscopia de absorción infrarroja es un método físico universal, rápido, económico y no destructivo aplicable al análisis estructural. Esta es una técnica simple que merece ser más ampliamente usada en mineralogía de arcillas y ciencias del suelo. Puede ser utilizada para identificar tanto materiales orgánicos como inorgánicos. La técnica de absorción infrarroja puede ser considerada como un método fiable para la comparación de muestras de suelo.

El espectro de absorción obtenido al pasar la muestra por el espectrofotómetro IR constituye una curva del porcentaje de absorción contra el número de onda en cm^{-1} . En la curva se definen bandas, picos y hombros, al apartarse esta de la línea base correspondiente. Para el análisis se procede en forma similar al análisis de difracción de rayos X; se determina los números de onda en que se encuentren cada una de las bandas, picos y hombros y luego se compara con patrones o tablas para su identificación respectiva. Para la interpretación de los espectros existen varias publicaciones de compilación de datos y archivos digitales de espectros de los minerales arcillosos.

La identificación mineralógica de las arcillas de suelos volcánicos es a menudo difícil, a causa de estar constituidas por varios componentes, incluyendo altas propiedades de minerales amorfos. Numerosos trabajos han confirmado que los espectros de absorción y de reflexión infrarroja, son lo bastante característicos para constituir un método de identificación rápido y fácil (Besoain y otros, 1964).

Stepanov (1974) (tomado de Malagón y Pulido, 1995) presenta tablas para la interpretación de los espectros de minerales arcillosos en suelos (Tablas 1, 2 y 3).

REGION DEL ESPECTRO NUMERO DE ONDA cm^{-1}	GRUPO ATOMICO VIBRACIONAL ASIGNADO	MAXIMOS DE LAS BANDAS DE ABSORCION CARACTERISTICAS (cm^{-1})	GRUPO ATOMICO SUBSTANCIA COMPONENTE O MINERAL
3800-3500	Vibraciones de grupos OH de minerales arcillosos	3710-3700	OH caolinita, halloisita
		3680-3670	OH caolinita
		3665-3655	OH caolinita, biotita
		3640-3630	OH muscovita
		3630-3620	OH montmorillonita, clorita, caolinita, halloisita
		3620-3610	OH gibsitita
		3570-3560	OH nontronita
		3560-3550	OH vermiculita - biotita
		3535-3525	OH gibsitita
		3530-3520	OH clorita
		3520-3500	OH goetita
		3500-3000	Vibraciones de dígitos de moléculas de agua, de grupos OH de minerales arcillosos y de grupos OH y NH de sustancias húmicas
3470-3460	OH goetita		
3455-3445	OH gibsitita		
3430-3380	OH sustancias húmicas		
3420-3400	H-O-H montmorillonita, yeso, nontronita - halloisita		
3410-3390	H-O-H gibsitita		
3390-3380	H-O-H vermiculita		
3350-3340	OH clorita		
3400-3100	NH sustancias húmicas		
3000-2800	Vibraciones de grupos CH, CH ₂ y OH	Triplete 2970 (2930, 2870, 2880)	Metil OH minerales arcillosos
		Dupleta 2930-2865	CH ₂ CH ₃ sustancias húmicas

Tabla 1. Número de onda de las bandas de absorción características observadas en el espectro IR de los suelos, en la región desde 3800 hasta 2800 cm^{-1} (Stepanov, 1974, tomado de Malagón y Pulido, 1995)

Uno de los principales problemas en la aplicación de la espectrometría infrarroja son los fenómenos de distorsión y absorción de la luz debidos a dispersión de la luz por las partículas minerales. Por ello lo más aconsejable es reducir el tamaño de la fracción a menos $2\mu\text{m}$, lo que no es problemático en el caso de arcillas, pero sí crea dificultades cuando en el suelo hay fracciones mayores.

REGIÓN DEL ESPECTRO NÚMERO INFR ONIA, cm^{-1}	GRUPO ATÓMICO VIBRACIONAL ASIGNADO	MAXIMOS DE LAS BANDAS DE ABSORCIÓN CARACTERÍSTICAS (cm^{-1})	GRUPO ATÓMICO SUSTANCIA COMPONENTE O MINERAL
1850-1500	Vibraciones de los grupos funcionales de sustancias húmicas y vibraciones deformacionales de moléculas de H ₂ O	1820-1800	CO ₂ síndete
		1750-1700	COOH ácidos carboxílicos
		1680-1600	(H ₂ O) minerales arcillosos
		1650-1640 (doblete)	H-O-H minerales arcillosos, yeso sustancias amorfas
		1625-1500	HOH en "puentes" de agrupamientos de tipo -C-O-
		1550(doblete)	-H-O-H...O-Ma-cation
1500-1300	Vibraciones deformacionales de grupos OH de minerales arcillosos, de grupos CH y NH de sustancias húmicas y de vibraciones valenciales de grupos CO ₂ y HCO ₃ de carbonatos y bicarbonatos.	1470-1430	-OH cationes absorbidos en minerales arcillosos
		1470-1430	-CH en CH ₂ y CH ₃ de sustancias húmicas
		1470-1450	CO ₂ y HCO ₃ de carbonatos y bicarbonatos
		1420-1400 (doblete)	NH sustancias húmicas
		1420-1400	COO ácidos carboxílicos
		1625-1600 (tripleto)	CO IR/Me cation en sustancias húmicas minerales
		1470-1420 1380	NO ₃ - nitratos
		1390-1370	HCO ₃ - bicarbonatos
1300-950	Vibraciones valenciales de grupos Si-O de minerales	1175-1165	O-Si-O cuarzo
		1200-1100	SO ₄ - yeso, mirabilita
		1140-1130	Si-O montmorilona
		1130-1120	Si-O muscovita
		1120-1110	Si-O caolinita, halloisita, montmorillonita, gibbíta, microclina, ortoclasa
		1100-1085	Si-O cuarzo
		1070-1050	Si-O montmorilona
		1050-1030	Si-O caolinita, halloisita, montmorillonita, muscovita
		1020-1000	Si-O caolinita halloisita clorita - biotita
		990-970	Si-O vermiculita, gibbíta
		975-955	P-O-P fosfatos

Tabla 2. Número de onda de las bandas de absorción características observadas en el espectro IR de los suelos, en la región desde 1850 hasta 950 cm^{-1} (Stepanov, 1974, tomado de Malagón y Pulido, 1995)

Para obtener una caracterización adecuada de los minerales arcillosos por espectrofotometría infrarroja, el espectro debe ser tomado en el rango de 4000 a 250 cm^{-1} , y si es posible hasta 200 cm^{-1} . Dicha cobertura garantiza que la mayoría de las vibraciones activas útiles en el infrarrojo sean incluidas, sin embargo, algunos minerales, tales como micas, carbonatos y sulfuros, exhiben unas pequeñas bandas características en la región inferior a 200 cm^{-1} . También se pueden facilitar las lecturas de los espectros al expandir la escala del número de onda de regiones espectrales particulares para obtener buena

resolución de bandas muy poco espaciadas, por ejemplo en la región de estrechamiento de OH de la Caolinita (Russell y Fraser, 1994)

REGION DEL ESPECTRO NUMERO DE ONDA cm^{-1}	GRUPO ATOMICO VIBRACIONAL ASIGNADO	MAXIMOS DE LAS BANDAS DE ABSORCION CARACTERISTICAS (cm^{-1})	GRUPO ATOMICO SUSTANCIA COMPONENTE O MINERAL
850-750	Vibraciones de deformacionales de grupos $\text{Me}^{\text{II}}\text{-OH}$, Si-O , CO_2 de minerales	845-835	$\text{Al}^{\text{III}}\text{-OH}$, O caolinita $\text{Mg}^{\text{II}}\text{-OH}$, O clorita
		830-810	$\text{Al}^{\text{III}}\text{-OH}$, O caolinita, hallosita, montmorillonita
		805-805	$(\text{Al,Fe})^{\text{III}}\text{-OH}$, O nontronita, montmorillonita
		800-800	CO_2 carbonatos
		855-845	$(\text{Al,Mg})^{\text{II}}\text{-OH}$, O clorita, montmorillonita
		845-835	$(\text{Fe,Mg})^{\text{II}}\text{-OH}$, O clorita, nontronita HCO_3 , bicarbonatos
		Doblete 805-785	Si-O-Si Cuarzo
		800-780	Si-O cristobalita, ácido silícico amorfó, caolinita, montmorillonita
		770-760	Si-O caolinita, muscovita, microclina
		750-575	Vibraciones de deformacionales de grupos Si-O , SO_4 y $\text{Si-O-Me}^{\text{II}}$ de minerales
700-680	Si-O cuarzo, caolinita, talco		
680-650	Si-O cuarzo, sepiolita		
670-650	SO_4 , yeso, mirabilita		
630-620	$\text{Al}^{\text{III}}\text{-O-Si}$ montmorillonita		
620-610	$\text{Si-O-(Al,Mg)}^{\text{II}}$ biotita		
640-600	Si-O cuarzo SO_4 , yeso		
575-400	Vibraciones de deformacionales de grupos $\text{Si-O-Me}^{\text{II}}$, $\text{Me}^{\text{II}}\text{-OH}$ y Si-O de minerales	550-540	$\text{Si-O-Al}^{\text{III}}$ caolinita, hallosita
		540-520	$\text{Si-O-(Al,Mg)}^{\text{II}}$ montmorillonita
		530-520	Si-O cuarzo $\text{Si-O-Al}^{\text{III}}$ muscovita
		500-480	$\text{Si-O-Fe}^{\text{II}}$ nontronita, biotita
		480-470	Si-O cuarzo, caolinita, clorita, muscovita, montmorillonita
		470-440	Si-O sepiolita, talco
		440-420 (doblete)	$\text{Me}^{\text{II}}\text{-OH}$ caolinita, nontronita, montmorillonita, mica
		405-400	Si-O cuarzo

Tabla 3. Número de onda de las bandas de absorción características observadas en el espectro IR de los suelos, en la región desde 950 hasta 400 cm^{-1} (Stepanov, 1974, tomado de Malagón y Pulido, 1995)

La reducción del tamaño de las partículas se puede realizar por molido o por separación granulométrica mediante sedimentación o ultrasonido.

Si el suelo contiene cantidades significantes de materia orgánica, puede ser ventajoso removerla, para minimizar las complicaciones en la interpretación del espectro IR. Esto puede hacerse por calentamiento con peróxido de hidrógeno, o por tratamiento con hipobromito alcalino.

3.2.7.1. *Espectrofotometría infrarroja con transformada de Fourier (FT-IR)*

Un espectrofotómetro FT-IR consta básicamente de dos partes: un sistema óptico con un interferómetro y un sistema de computación. El computador controla los componentes ópticos, colecta y almacena los datos y despliega los espectros. Los software han revolucionado el uso potencial de los FT-IR. (Malagón y Pulido, 1995)

En principio un interferómetro tiene varias ventajas básicas sobre un instrumento dispersivo. A saber:

- Todas las frecuencias son medidas simultáneamente en un interferómetro, mientras en un espectrómetro dispersivo son medidas sucesivamente. Un espectro completo puede ser obtenido muy rápidamente y muchos barridos pueden ser promediados en el tiempo tomado para un solo barrido por un espectrómetro dispersivo.
- Para la misma resolución, la energía de focalización en un interferómetro puede ser más alta que en un espectrómetro dispersivo, donde ésta es restringida por las rendijas. En combinación con la ventaja anterior, esto lleva a una de las características más importantes de un espectrómetro FT-IR: la habilidad de realizar la misma relación señal/ruido como un instrumento dispersivo en mucho menos tiempo.
- La escala de frecuencias de un interferómetro es derivada de un láser helio-neón que actúa como una referencia interna para cada barrido, la frecuencia de este láser es muy precisa y estable. Como resultado la calibración de los interferómetros es mucho más exacta y tiene mucha mejor estabilidad térmica que la calibración de instrumentos dispersivos.

- La resolución es similar en todas las longitudes de onda en el rango espectral definido ya que no utiliza rendijas para definir la resolución.
- Como no hay rendijas o cambios de filtro, no hay discontinuidades en el espectro.

Hay ciertas condiciones de lectura en el FT-IR que son de importancia para la obtención de un buen espectro.

- Resolución óptica. Describe la habilidad del instrumento para distinguir entre frecuencias adyacentes en el espectro. La resolución óptica depende principalmente de la máxima retardación (OPD) y es aproximadamente el recíproco de la máxima OPD.
- Apodización. Es una función que multiplica el interferograma aprovechando la máxima OPD y disminuyendo los artefactos, que pueden estar en la forma de "sidelobes" o "ripple", los cuales aparecen si el espectro energético real contiene transiciones que son más agudas que la resolución correspondiente a la máxima OPD,
- Ganancia. La señal del detector es amplificada antes de comenzar a ser digitalizada. La ganancia del amplificador puede ser cambiada para asegurar que el convertidor análogo-digital no esté sobrecargado por alta transmisión de las muestras y que sea usado eficientemente por muestras que absorban fuertemente.
- Velocidad de OPD. La velocidad de OPD, o velocidad de barrido, para un interferograma es la proporción con la cual la OPD es variada. La retardación (OPD) es la diferencia entre los paquetes ópticos entre dos haces en el interferómetro. La resolución óptica determina la máxima OPD

medida por el interferómetro. La máxima OPD, es aproximadamente el recíproco de la resolución. (Perkin Elmer, 1993)

4. METODOLOGÍA

4.1. MUESTREO DE LOS SUELOS

Se recolectaron muestras de suelo pertenecientes a una de las zonas con mayor índice de criminalidad de la ciudad de Armenia, como lo es La Comuna 4, que de acuerdo a la información estadística suministrada por el Instituto Nacional de Medicina Legal y Ciencias Forenses presenta el 19.7% de los homicidios en la ciudad.

Para elaborar el muestreo de suelos con fines forenses en la mayoría de los casos se trabaja con la parte más superficial del suelo (0 a 2 cm), que generalmente es la que queda adherida a la ropa, zapatos, vehículo del sospechoso o víctima en un incidente, pero en algunos casos cuando se presentan fragmentos de roca sobre el suelo este debe ser realizado tomando hasta 4 cm de profundidad. (Peña y Peña, 1998)

Por lo anteriormente mencionado el muestreo se realizó tomando los primeros 2 cm del suelo con una pequeña pala de acero inoxidable para evitar la contaminación de la muestra con óxidos de hierro u otro elemento exógeno que pudiera dificultar los posteriores análisis a realizarse. Las muestras se recolectaron cada 200, 100 y 50m, según las condiciones del terreno, en un área de diámetro aproximado de 5 m para evitar variaciones locales, y se homogenizaron en un balde.

Se efectuó un reconocimiento inicial del terreno en su totalidad, para ubicar los sitios del muestreo, el cual se realizó con la ayuda de las planchas topográficas (escala 1:2000) facilitadas por el Instituto Geográfico Agustín Codazzi.

4.2. ANÁLISIS DE LABORATORIO

4.2.1. Observaciones con el estereomicroscopio

La muestra de suelo se secó a temperatura ambiente. Se realizaron cuarteos para obtener una porción representativa del suelo. Luego se observó en el estereomicroscopio, removiéndola con la ayuda de una espátula de acero inoxidable y se describió su aspecto general, incluyendo la presencia de vegetación y materia orgánica. Para determinar la forma de las partículas se

reportó la esfericidad y redondez con base en las escalas visuales de Powers y Krumbein. (Ver tabla No. 2)

Se anoto la presencia de los elementos extraños a la composición del suelo, tales como fibras, cabellos, desechos de actividad humana, restos de insectos y material vegetal con lo que se obtiene una idea más general del suelo y una orientación acerca del lugar que proviene.

4.2.2. Pruebas a la gota.

La muestra se pasó por tamiz de 1 mm. Para obtener la solución de prueba, se pesaron 500mg de suelo y se transfirieron a un tubo de centrífuga, enseguida se añadieron 2 mL de una solución de acetato de amonio 1N, se tapó el tubo y se agitó la suspensión, posteriormente se centrifugó el suelo hasta que el líquido sobrenadante quedó claro, lo que tomó 5 minutos. Se efectuaron las pruebas de cationes con el sobrenadante. También se realizaron soluciones de prueba de la misma forma descrita anteriormente sustituyendo el acetato de amonio por ácido nítrico, y se efectuaron pruebas para cationes y cloruros. La solución de prueba para fosfatos se efectuó extrayendo la muestra con BRAY. Para la prueba de nitratos se realizó la extracción con ácido clorhídrico.

4.2.2.1. Cationes.

- Co^{+2} . Se adicionó una gota de la solución de prueba a varios cg de tiosulfato de sodio sólido
- Fe^{+2} . Prueba con α, α' -dipiridilo y compuestos emparentados. Una gota de la solución de prueba se trató con una gota de la solución de reactivo en una placa para reacciones a la gota (piedra de toque).
- Fe^{+3} . *Prueba con ferrocianuro de potasio.* La prueba se efectuó colocando una gota de la solución por probar y una gota de solución de ferrocianuro de potasio sobre una piedra de toque.
- Fe^{+3} . *Prueba con tiocianato de potasio.* Una gota de la solución por probar se mezcló, en una piedra de toque, con una gota de solución de tiocianato de potasio a 1%.
- Mg^{+2} . Prueba con hipoyodito de álcali. Una gota de la solución neutra o ácida por probar se colocó en una piedra de toque junto con una gota de hidróxido de potasio 1 N, seguida de una gota de solución de yodo; la mezcla se agitó con una varilla de vidrio. La solución debía ser parda; de no ser así se agregó más yodo, para obtener dicho color. Después de un minuto se aumentó el contenido de hidróxido de potasio hasta que la solución tomara un color amarillo limón.
- Mg^{+2} . *Prueba con quinalizarina.* Una gota de la solución por probar se colocó en una piedra de toque y se mezcló con 2 gotas de una solución alcohólica de quinalizarina a 0.01—0.02%. Se adicionó gota a gota

hidróxido de sodio 2 N hasta que se observó un cambio al violeta y luego se agregó un exceso de hidróxido de sodio de $\frac{1}{2}$ del volumen.

- Mn^{+2} . *Prueba con formaldoxima*. Una gota de reactivo de formaldoxima, una gota de amoníaco acuoso (1:1), una gota de EDTA 0.2 M y otra de clorhidrato de hidroxilamina a 10% se adicionaron a una gota de la solución por probar.
- Zn^{+2} . *Prueba con ditizona*. Una gota de la solución de prueba y una gota de una solución de ditizona en tetracloruro de carbono se agitaron juntas en un pequeño tubo de ensayo tapado.

4.2.2.2. Aniones

- Cl^- . *Prueba por precipitación de cloruro de plata en presencia de otras iones de halógenos*. La prueba se realizó en un tubo para microensayo. Una gota de la solución por probar se calentó con una gota de la solución de oxina, una gota de solución de peróxido de hidrógeno y una gota de ácido nítrico durante cerca de 4 minutos. Entonces se agregó una gota de solución de $AgNO_3$ a 1%.
- $PO_4^{=}$. *Prueba con molibdato de amonio y bencidina*. Una gota de la solución por probar (acidulada) se colocó sobre papel filtro cuantitativo, seguida de una gota de molibdato y una gota de solución de bencidina. Entonces el papel se sostuvo sobre amoníaco.
- NO_3^- . *Prueba con sulfato ferroso y ácido sulfúrico*. Un cristal de sulfato ferroso se colocó sobre una piedra de toque junto con una gota de la

solución por probar. Una gota de ácido sulfúrico concentrado se adicionó por las paredes.

4.2.2.3. *Prueba para ceniza volcánica.* Se colocaron unos miligramos de suelo en un papel filtro, luego se adicionaron unas gotas de fenolftaleína y posteriormente unas gotas de una solución de fluoruro de sodio al 4%.

4.2.3. Color.

La muestra de suelo se secó a 110°C durante 1 hora, con el fin de remover el agua que pudiera tener el suelo y homogenizar el color. Se dejó enfriar a temperatura ambiente. Se pasó por tamiz de 0.053 mm. La determinación del color se realizó por comparación directa con la tabla Munsell para definir *hue*, *value* y *chroma*.

4.2.4. pH.

El pH se determinó por el método potenciométrico, utilizando 130 mg de suelo que paso por tamiz de 1 mm. Se adicionó agua en relación 1:2,5, peso – volumen y se agitó la solución cada 5 minutos por un periodo de 20 minutos. Posteriormente se centrifugó por 5 minutos y se separó el sobrenadante, al cual se le realizaron las lecturas con el microelectrodo de vidrio (previamente calibrado con soluciones buffer de pH 4 y 7).

4.2.5. Gradiente de densidad.

Se prepararon las columnas para gradiente de densidad utilizando una serie de soluciones de densidades conocidas por mezcla de bromoformo y etanol entre 1,500 y 2,890. Se realizaron ensayos con 10 y 5 mg de suelo que hubiera pasado por tamiz de 0.125 mm y fuera retenido por tamiz de 0.053 mm, para optimizar el tamaño de la muestra. Las observaciones de la ubicación de sus partículas en cada una de las capas de diferente densidad se llevaron a cabo a 1, 3 y 8 horas.

Posteriormente se compararon columnas realizadas con bromoformo –etanol y bromoformo –bromobenceno con una muestra escogida al azar, y se observó el efecto de la sustitución del bromobenceno con el etanol.

Se efectuaron ensayos adicionales aumentando la cantidad de gradientes a 10 y variando los valores de densidad para observar su efecto en la discriminación de las muestras.

4.2.6. Textura

El suelo se pasó por tamiz de 2 mm y se llevó a la estufa a 110°C por 1 hora.

Se prepararon soluciones dispersantes de hexametáfosfato de sodio 0,02 M y de carbonato de sodio 0,03 M. Se tomaron 2,5 mL de cada una de las soluciones anteriormente mencionadas y se diluyeron en 20 mL de agua en una probeta especialmente diseñada para este propósito, luego se introdujeron

50 mg de suelo. La solución se agitó en un homogenizador durante 40 seg y se dejó reposar por espacio de 1 minuto, esta operación se repitió 10 veces.

Luego de dejar en reposo se tomaron alícuotas de 10 mL cada una a los 226 seg y 6h 15 min. Estas alícuotas se llevaron a sequedad en la estufa. Se determinaron los porcentajes en peso de arena, limo, y arcilla presentes en el suelo con base en la Ley de Stokes.

4.2.7. Análisis de los minerales arcillosos.

La muestra de suelo se pasó por tamiz de 0.038 mm. Se realizaron ensayos con 50, 20 y 10 mg de suelo para determinar la cantidad mínima necesaria y obtener una porción suficiente de arcilla. Una solución de la muestra en proporción peso a volumen de agua 1:20 se llevó a un limpiador ultrasónico por diferentes periodos de tiempo (1 y 1.5 horas). Se separó la fracción arcilla con la ayuda de una jeringa y se secó.

Se realizaron lecturas en el espectrofotómetro FTIR, en el rango 4000 a 400 cm^{-1} , de muestras finamente pulverizada con KBr (relación suelo: KBr 1:100).

Condiciones de lectura del FT-IR

Resolución: 4.00 cm^{-1}

Apodización: Strong

Ganancia: 8

Velocidad OPD: 1.0 cm/seg

Número de barridos: 15

5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

5.1. DESCRIPCIÓN DEL LUGAR DE MUESTREO DEL SUELO

La observación preliminar se realizó directamente en el lugar donde se tomó la muestra, anotando las características generales del sitio y los alrededores.

Las muestras fueron recolectadas en zonas del perímetro urbano de la ciudad de Armenia, en caminos, carreteras y barrios subnormales. No fue posible muestrear toda la comuna 4 debido a que ciertas áreas se encontraban construidas. En total se tomaron 64 muestras (Tabla 4)

Mediante la observación inicial de la zona de muestreo se pudo determinar la heterogeneidad entre los diferentes suelos de los sectores estudiados, en cuanto a la consistencia, humedad y presencia o ausencia de vegetación, evidencia de actividad humana y topografía del terreno.

Las muestras de la 43 a la 48 (tomadas en las antiguas vías del ferrocarril), mostraron una consistencia muy dura por lo que su recolección fue difícil, esto

puede atribuirse al hecho de que cuando hubo tránsito de trenes por el sector el suelo quedó compactado en la parte superficial (Figura 5)

Tabla 4
Descripción del lugar de muestreo de los suelos

No. DE MUESTRA	COORDENADA X	COORDENADA Y	ALTURA	DESCRIPCIÓN DEL LUGAR	CUADRANTE
A-01	54.580	91.272	1330	A 60 m del río, zona de pastos, vegetación de bajo tamaño de poca densidad, a 2 m de una pista de motocross. Consistencia blanda.	K-3
A-02	54.583	91.430	1340	Zona de escaso pasto a 70 m del río Quindío. Consistencia blanda	J-3
A-03	54.618	91.518	1340	Zona estéril, sin vegetación, a 50 m del río, rocas de tamaño medio, pista de motocross, consistencia blanda	J-4
A-04	54.818	91.652	1330	Zona de vegetación nativa, de baja altura, a 10 m del río, junto a un camino sin pavimentar y a un guadual. Consistencia media.	I-5
A-05	54.767	91.738	1360	Guadual, consistencia del suelo dura, muy poca vegetación, humedad, rocas grandes, suelo negro con presencia de pequeñas rocas, junto a un camino en gradas, terreno pendiente (Foto 1)	I-4
A-06	54.664	91.570	1330	Carretera sin pavimentar, vegetación alrededor y en el medio de bajo tamaño y escasa, rocas de regular tamaño, consistencia dura.	J-4
A-07	54.542	91.704	1360	Poca presencia de pastos, junto a pista de motocross, consistencia blanda, grano fino.	I-3
A-08	54.462	91.549	1360	Pastos de baja altura, muchas raíces, rocas pequeñas, húmeda, junto a una carretera sin pavimentar, consistencia dura	J-3
A-09	54.423	91.402	1370	Carretera destapada, restos líticos, muy poca vegetación (pastos), muchas rocas de diversos tamaños, consistencia dura, terreno pendiente.	J-3
A-10	54.372	91.260	1370	Junto a la carretera de acceso al parque La Secreta, consistencia blanda, vegetación nativa de mediano tamaño mas o menos escasa, terreno pendiente e irregular, en proceso de erosión (Foto 2)	K-2
A-11	54.140	91.466	1440	Carretera destapada, rocas de tamaño medio, vegetación escasa, a 30 m de una calle transitada, junto a un montallantas, consistencia media, suelo húmedo y pedregoso.	J-1
A-12	54.244	91.486	1420	Junto a la carretera de acceso al parque La Secreta, vivero La Secreta, zona de pastos de bajo tamaño y mediana densidad, consistencia blanda, pequeñas rocas. (Foto 3)	J-2

No. DE MUESTRA	COORDENADA X	COORDENADA Y	ALTURA	DESCRIPCIÓN DEL LUGAR	CUADRANTE
B-13	54.570	91.938	1470	Parque mirador a 7 m de una carrera muy transitada, vegetación de poca altura y mediana densidad (grama), junto a un barranco, consistencia blanda (Foto 4)	H-4
B-14	54.640	91.964	1470	Parque mirador a 8 m de una carrera transitada, vegetación escasa y de poca altura, algunas rocas, consistencia media (Foto 4)	H-4
B-15	54.680	91.990	1470	Parque mirador, camino de acceso vehicular al parque, poca vegetación, gran cantidad de rocas de todos los tamaños, consistencia media. (Foto 4)	H-3
C-16	54.513	92.260	1460	Consistencia blanda, grano fino y aspecto uniforme, a 5 m de la calle 40, terreno pendiente, vegetación nativa alrededor de mediano tamaño y abundante, cimientos de casas, camino de gradas.	F-3
C-17	54.518	92.230	1440	Consistencia dura, compacta, muy húmeda con presencia de musgo, sin vegetación, cultivos de café y plátano alrededor, junto a una casa	F-3
C-18	54.536	92.162	1460	Consistencia blanda, fina, terreno pendiente, en medio de un cultivo de café y plátano, camino de escalas, sin vegetación.	G-3
C-19	54.439	92.235	1440	Vegetación nativa y árboles frutales, consistencia blanda, terreno pendiente, a 30 m de un muro de contención. (Foto 5)	F-3
C-20	54.394	92.228	1440	Consistencia dura, zona de pastos no muy abundantes, antes invasión, escombros, 30 m del muro de contención	F-2
C-21	54.362	92.195	1440	Consistencia blanda, zona de pastos, 35 de un barrio en construcción, árboles de higuera alrededor, a 10 m hacia el este barranco de vegetación muy densa.	G-2
C-22	54.324	92.160	1440	Consistencia regular, camino peatonal, escombros, a 20 m de muro de contención, alrededor vegetación nativa de bajo tamaño.	G-2
C-23	54.311	92.111	1440	Escombros, vegetación nativa densa de regular tamaño, consistencia dura, presencia de basura, junto a una cañada canalizada, a 10 m de un barranco de vegetación densa.	G-2
C-24	54.294	92.078	1430	Escombros, junto a un deslizamiento de tierra, asentamiento de casas, consistencia dura, vegetación nativa, junto a un recolector de aguas negras.	G-2
C-25	54.244	92.042	1430	Escombros, depresión, junto a un hoyo de 2.5 m de profundidad, vegetación nativa de poca densidad a 10 m de un deslizamiento de tierra.	G-2
C-26	54.175	92.080	1430	Terreno plano, arenoso, sin vegetación a 25 m de un asentamiento, alrededor vegetación nativa de gran tamaño (guadual), a 15 m de una carretera poco transitada. (Foto 6)	G-1

No. DE MUESTRA	COORDENADA X	COORDENADA Y	ALTURA	DESCRIPCIÓN DEL LUGAR	CUADRANTE
D-27	54.496	92.333	1450	Camino peatonal, cultivos alrededor (plátano y café), consistencia dura, dos colores, a 15 m de una casa, terreno pendiente.	F-3
D-28	54.453	92.332	1450	Camino peatonal, cultivos de café y plátano, consistencia blanda, húmeda, presencia de líquenes, junto a una casa, terreno pendiente, poca vegetación.	F-3
D-29	54.382	92.335	1450	Junto a un polideportivo, asentamiento humano, consistencia dura, arenosa, sin vegetación, algunas rocas	F-2
D-30	54.319	92.321	1440	Junto a un pozo, plataneras alrededor, vegetación nativa, consistencia media, escombros, paso peatonal, vegetación abundante alrededor y de gran tamaño. (Foto 7)	F-2
D-31	54.627	92.392	1450	Camino peatonal, arenosa, vegetación nativa, escombros, a 10 m de unas casas (invasión), a 50 m de la Avenida 19.	F-4
D-32	54.565	92.348	1460	Consistencia blanda junto a casas y a una calle, intersección de dos caminos peatonales, árboles, vegetación nativa de bajo tamaño. (Foto 8)	F-3
D-33	54.566	92.587	1450	Presencia de escombros, junto a invasión, colector de aguas negras, vegetación abundante, plataneras y plantas de caña.	E-3
D-34	54.530	92.594	1460	Camino peatonal, junto a una carretera, consistencia dura, pastos abundantes alrededor, frente a una invasión, comienzo de una pendiente, camino de escaleras.	E-3
D-35	54.447	92.558	1450	Junto a un camino pavimentado, consistencia blanda, junto a casas, vegetación nativa alrededor.	E-3
D-36	54.434	92.597	1440	Paso peatonal, junto a casas, consistencia dura, sin vegetación, pastos alrededor, enseguida de un colector de aguas negras, camino angosto a 50 m de una carretera.	E-3
D-37	54.382	92.612	1440	Camino peatonal, consistencia dura, escombros, junto a un barranco de pastos altos.	D-2
D-38	54.334	92.627	1440	Consistencia dura, camino peatonal, sin vegetación, frente a un barranco de vegetación densa (pastos), junto a una casa, restos de concreto (Foto 9)	D-2
D-39	54.324	92.588	1450	Consistencia blanda, intersección de dos caminos, entrada al barrio Santander por la cra. 25 cil 33, alrededor vegetación de tamaño medio, restos de camino pavimentado, terreno pendiente. (Foto No. 9)	E-2
D-40	54.252	92.642	1430	Consistencia blanda, escombros de casas, intersección de tres caminos, sin vegetación, escaleras al norte y al sur, vegetación alrededor (pastos altos y plataneras), invasión, límite del barrio Santander bajo y Pradito.	D-2

No. DE MUESTRA	COORDENADA X	COORDENADA Y	ALTURA	DESCRIPCIÓN DEL LUGAR	CUADRANTE
D-41	54.248	92.604	1450	Consistencia dura, arenosa, junto a una calle, terminación de unas escaleras, casas y vegetación alrededor (pastos), grano fino, deslizamientos de tierra	D-2
D-42	54.246	92.705	1450	Terreno baldío, escombros, límites de los barrios Belencito y Pradito, consistencia blanda y vegetación escasa alrededor	D-2
E-43	54.101	92.803	1440	Fin de carretera pavimentada, camino de tránsito vehicular, frente a un barranco, casas alrededor, vegetación escasa, restos líticos, escombros.	C-1
E-44	54.215	92.840	1440	Camino de tránsito vehicular, arenoso, consistencia dura, vegetación nativa, alrededor, de regular tamaño, rocas, caserío, a 25 m de una cañada	C-2
E-45	54.319	92.838	1440	Camino de tránsito vehicular, basalto, caserío a 30 m de los rieles del antiguo ferrocarril, vegetación abundante alrededor, consistencia dura, seca, gran cantidad de polvo, pequeñas rocas.	C-2
E-46	54.385	92.904	1440	Antigua vía del ferrocarril, consistencia muy dura, frente a un barranco, casas alrededor, sin vegetación, junto a un pozo de agua, pastos alrededor, rocas pequeñas, restos vítreos.	C-2
E-47	54.330	93.018	1450	A 10 m del túnel del ferrocarril, bajo al puente de la cll 30 cra 37, cancha de barrio, casas alrededor, escasa vegetación, entre barrancos.	B-2
E-48	54.378	93.113	1440	Vegetación nativa de densidad media, gran cantidad de basura a 5 m, consistencia blanda, a 10 m del barrio Miraflores Bajo, escombros, antigua vía del ferrocarril, entre dos barrancos, deslizamientos de tierra. (Foto 10)	B-2
E-49	54.484	93.117	1450	Camino peatonal ancho, poca vegetación, apariencia arenosa, a 70 m de una cañada, a 10 m de la carrera 26, deslizamientos del terreno, muchas rocas	B-3
E-50	54.598	93.113	1450	Camino de tránsito vehicular (motos y carretillas), terreno seco, arenoso, gran cantidad de rocas, a 10 m de un muro de contención y 50 m de una cañada, frente a un barranco, caserío alrededor, consistencia media, poca vegetación	B-3
E-51	54.705	93.107	1450	Camino, rocas, terreno seco, vegetación alrededor, cultivos de caña, junto a un barranco y unas escaleras de acceso al barrio Miraflores.	B-4
E-52	54.824	93.100	1450	Consistencia dura, rocas, consistencia rocosa, frente a un barranco de vegetación nativa de gran tamaño, casas alrededor, a 20 m de la cll 30	B-5
E-53	54.970	93.113	1460	Antiguos Rieles del ferrocarril, a 100 m de la trilladora fundadores, camino, asentamiento, a 70 m de la estación del ferrocarril, terreno arenoso, rocas, muy poca vegetación.	B-5

No. DE MUESTRA	COORDENADA X	COORDENADA Y	ALTURA	DESCRIPCIÓN DEL LUGAR	CUADRANTE
E-54	55.079	93.180	1460	Antigua estación del ferrocarril, a 15 m de la comisaría de familia, parqueadero de carros y maquinaria pesada de las empresas públicas y la alcaldía provisional, sin vegetación	B-6
E-55	55.216	93.196	1460	Rocas, vía de salida del parqueadero, junto a una antigua locomotora, frente a la alcaldía provisional (biblioteca municipal), consistencia media, sin vegetación.	B-7
E-56	55.003	93.038	1470	Terreno baldío, pastos de mediano tamaño, junto a las escaleras de acceso a la cra 19ª por la calle 29, consistencia blanda, casas alrededor, escombros	B-6
F-57	55.146	92.328	1360	Guadual, a 20 m de una cañada, intersección de dos caminos, consistencia blanda, junto a un pozo, rocas de tamaño medio.	F-6
F-58	55.109	92.348	1380	Junto a una casa, terreno arenoso, cafetal, guadual y árboles frutales alrededor, rocas, consistencia blanda, a 200 m del río Quindío. (Foto 11)	F-6
F-59	55.098	92.376	1390	Camino peatonal, consistencia dura, entre dos casas, frente a cafetal y platanal, vegetación escasa, pocas rocas (Foto 11)	F-6
F-60	55.112	92.404	1400	Camino peatonal, consistencia dura, pendiente, alrededor vegetación nativa de gran tamaño, a 100 m de una cañada, a 200 m de una vía alterna a Calarcá	E-6
F-61	55.098	92.436	1420	Junto a una carretera pavimentada, escombros, vegetación nativa y densa, consistencia blanda, frente a un guadual y una platanera	E-6
F-62	55.100	92.480	1430	Vegetación nativa de mediano tamaño, consistencia blanda, escombros de casas, a 15 m de un tiradero de basura, a 10 m de una carretera	E-6
F-63	55.074	92.530	1440	Terreno baldío, pendiente, vegetación nativa de mediano tamaño, consistencia blanda, árboles frutales y plataneras alrededor, a 10 m de una casa, escombros (Foto 12)	E-6
F64	55.110	92.602	1460	Caserío, junto a una calle, vegetación escasa, pendiente, consistencia blanda, arenosa.	D-6

Se seleccionaron 45 muestras, que fueran representativas de todos los sectores para realizar los análisis de laboratorio.

5.2. OBSERVACIONES CON EL ESTEREOMICROSCOPIO

Las observaciones al estereomicroscopio muestran que el suelo de la comuna 4 de la ciudad de Armenia tiene materia orgánica, tanto animal como vegetal, en grandes proporciones. Es de anotar que hay cantidades importantes de material debido a la acción humana, como son trozos de vidrio de diferentes colores, fibras, plásticos y restos de materiales de construcción.

La forma de las partículas en cuanto a su redondez y esfericidad se determinó por medio de la tabla patrón de Powers y Krumbein. Se ve claramente que las muestras son heterogéneas respecto a la forma de sus partículas, lo que hace que esta determinación sea muy importante para el examen inicial de las muestras y sea necesaria su realización como punto de partida para emprender el análisis del suelo.

Se observó una tendencia general de las partículas a ser altamente esféricas (E) entre 0.9 y 0.7, mientras que la redondez (R) es media entre 0.7 y 0.5.

Algunas muestras pueden diferenciarse claramente por una observación detallada con el estereomicroscopio, por ejemplo la muestras A4 con E53 son fácilmente diferenciables, puesto que la primera contiene gran cantidad de materia orgánica, sus partículas son grandes y se encuentran agrupadas en terrones, mientras la E53 presenta partículas pequeñas secas y sueltas y la materia orgánica se encuentra en muy poca cantidad, éstas representan los

grupos en los que se podrían caracterizar las muestras según su apariencia general.

En un primer grupo se encontrarían suelos como A1–D37, E43, E48, F57 y F59, ricas en materia orgánica, cuyas partículas son grandes y están muy agrupadas. En un segundo grupo se ubicarían muestras tales como D39, D40, E45–E47, E49–E56, con aspecto similar al polvo, granos muy finos, sueltos y secos. (Tabla 5)

Tabla 5
Observaciones con el estereomicroscopio de los suelos de la Comuna 4

No. DE MUESTRA	OBSERVACIONES	ESFERICIDAD Y REDONDEZ
A-01	Partículas agregadas, muchas raíces, retículos muy amplios, gusanos, tallos, restos de insectos y hojas, terrones de consistencia media, partículas doradas, plateadas, negras y transparentes, restos de rocas naranjas.	E= 0.9 R= 0.5
A-02	Partículas muy agrupadas, restos vegetales (raíces) restos líticos brillantes (plateadas, transparentes blancas, negras y amarillas), tallos, hojas y semillas, retículos amplios, terrones grandes y blandos	E= 0.9 R= 0.9-0.7
A-03	Partículas agregadas y grandes, fragmentos líticos brillantes (negras y blancas), retículos amplios, terrones blandos, restos de tallos, raíces y semillas, restos de rocas geométricas negras, restos de insectos (alas)	E= 0.7 R= 0.5
A-04	Partículas agregadas muy grandes, raíces, restos vegetales (hojas, tallos y pequeños troncos) y animales (lombrices blanquecinas), fragmentos líticos brillantes (negras, transparentes y plateados), terrones blandos y retículos muy grandes	E= 0.7 R= 0.5
A-05	Partículas más o menos sueltas, restos orgánicos (plantas, raíces, lombrices), fibras, partículas brillantes, algunas restos líticos (grises, negros)	E= 0.5-0.7 R= 0.3
A-06	Partículas agregadas, fragmentos líticos (rojizos, naranjas, negros y blancos), algunas raíces, animalitos, muy húmeda, restos de hojas.	E= 0.7 R= 0.5
A-07	Partículas sueltas, aspecto uniforme, partículas muy pequeñas, raíces, restos líticos negros y blancos, presencia de terrones blandos y húmedos, hay partículas blancas características de toda la muestra, presencia de partículas vítreas y otras de color plateado	E= 0.7-0.9 R= 0.3
A-08	Gran cantidad de materia orgánica (raíces y tallos), partículas agrupadas y húmedas, rocas blancas y lisas, muchas raíces largas y gruesas (algunas secas), apariencia uniforme.	E= 0.7-0.9 R= 0.5
A-09	Partículas agrupadas, no hay presencia de materia orgánica, restos de rocas de tamaño medio, se presentan rocas lisas con combinación de colores, alargadas, negras, blancas y brillantes	E= 0.3 R= 0.7
A-10	Partículas relativamente sueltas, pequeños trozos de rocas blancas (transparentes) y negras opacas, raíces largas translúcidas, pequeñas semillas, restos de insectos (alas y patas)	E= 0.9 R= 0.7
A-11	Partículas más o menos sueltas, restos de rocas de tamaño medio, trozos de plantas secas, trozos minerales negros brillantes, gran cantidad de pedazos de rocas negras adheridas a los terrones, hay presencia de raíces muy largas, insectos, trocitos de vidrio	E= 0.9 R= 0.5-0.7
A-12	Partículas agrupadas, restos de rocas (naranjas grandes, pequeñas negras y opacas, y algunas translúcidas), rocas adheridas unas con otras (blanquecinas grandes), pequeños restos de estructuras óseas, lombrices blancuzcas.	E= 0.5 R= 0.5
B-13	Partículas agrupadas, fragmentos líticos (naranjas, transparentes y brillantes), raíces, restos vegetales, fibras rojas	E= 0.3 R= 0.5
B-14	Partículas pequeñas, restos vegetales, fragmentos líticos pequeñas de color naranja, insectos (gusanos y larvas)	E= 0.7 R= 0.7

No. DE MUESTRA	OBSERVACIONES	ESFERICIDAD Y REDONDEZ
B-15	Partículas agrupadas, espacios muy amplios entre los grupos de partículas, materia orgánica (tallos y raíces), restos líticos de tamaño medio, y pequeños de color negro, blanco y transparente, partículas plateadas y restos de material de construcción.	E= 0.9 R= 0.7
C-16	Partículas agregadas, retículos grandes, restos líticos negras, blancas y naranjas, trozos de material vegetal	E= 0.3-0.5 R= 0.9
C-18	Partículas agrupadas formando retículos amplios, fragmentos líticos negras y blancas, algunas raíces pequeñas, restos de tallos y hojas	E= 0.7-0.9 R= 0.5
C-20	Partículas grandes y agrupadas, espacios grandes entre los grupos de partículas, restos de material vegetal, restos líticos negros y blancos con negro, fragmentos de material de construcción	E= 0.9 R= 0.3-0.5
C-22	Partículas agrupadas y grandes, retículos con muchos espacios, restos vegetales (tallos y raíces), presencia de fibras rojas, restos líticos negros y transparentes	E= 0.9 R= 0.5-0.7
C-24	Partículas muy agrupadas, retículos amplios, restos líticos de diferentes colores (negros, naranjas, blancos, transparentes y grises), fibras (rojas y rosadas), raíces, restos de tallos, partículas plateadas, restos de material de construcción	E= 0.9-0.7 R= 0.7
C-26	Partículas grandes y agrupadas, retículos medianamente amplios, fragmentos líticos grandes con incrustaciones negras, restos de hojas.	E= 0.7-0.9 R= 0.5
D-28	Partículas agrupadas, retículos medianos, gran cantidad de materia orgánica (semillas germinando, raíces tallos, hojas) fibras (azules y blancas) muchas fragmentos líticos negros, algunos transparentes	E= 0.9 R= 0.7-0.9
D-30	Partículas muy grandes y agrupadas, retículos amplios, fragmentos de material de construcción, restos líticos grandes y pequeños de colores (negras, grises, amarillas, blancas, transparentes y naranjas), restos vegetales de hojas y tallos, suelo muy húmedo	E= 0.7-0.9 R= 0.9
D-32	Partículas grandes, agrupadas, retículos regulares, restos vegetales (hojas, semillas germinando y tallos), color uniforme de las partículas (café claro), algunos fragmentos líticos pequeños negros y naranjas, medianos grises, trozos de vidrio y fibras.	E= 0.9 R= 0.5-0.7
D-34	Partículas grandes retículos amplios, restos líticos blancos negros y transparentes, raíces, restos de hojas y tallos, fragmentos pequeños de material de construcción	E= 0.7-0.9 R=0.5
D-35	Partículas de tamaño medio, agrupadas formando retículos amplios, fragmentos líticos (negros, naranjas, transparentes, blancos, amarillos, plateados, grises), animales (cucarrones)	E= 0.5-0.7 R= 0.5
D-37	Partículas grandes y agrupadas formando retículos muy amplios, gran cantidad de material vegetal (tallos, hojas y raíces) y animal (pulgas y piojos, pequeños gusanos), restos de ladrillo y fibras, restos líticos grises y blancos	E= 0.7-0.9 R= 0.7
D-39	Partículas muy pequeñas más o menos agrupadas, retículos estrechos, restos de raíces, hojas, tallos y semillas germinando, rocas grandes de color gris, presencia de fibras	E= 0.5-0.7 R= 0.5
D-40	Partículas muy pequeñas y agrupadas, retículos estrechos, restos vegetales (tallos y hojas), trozos de ladrillo, fibras (rijas azules y blancas), trozos líticos (plateadas, negras, grises y transparentes), rocas grandes (grises y blancas)	E= 0.7 R= 0.7
E-43	Partículas medianas, retículos amplios, fibras (rojas), restos vegetales (tallos, hojas de pasto y rojas, raíces), terrones de consistencia dura de color naranja-amarillo ocre; terrones de consistencia blanda amarillo claro-crema, trozos de material de construcción, fragmentos líticos (plateados, negros, transparentes, restos de material animal (patas, ojos)	E= 0.9 R= 0.7-0.9
E-45	Partículas sueltas muy pequeñas, aspecto uniforme, restos de material vegetal seco, fragmentos líticos transparentes y negros	E= 0.7 R= 0.5
E-47	Partículas sueltas, retículos estrechos, restos vegetales secos, restos líticos negros y blancos	E= 0.9 R=0.9
E-48	Partículas medianas, más o menos agrupadas, retículos de tamaño medio, gran cantidad de restos vegetales (raíces, hojas y tallos), trocitos de material de construcción, fragmentos líticos grises y transparentes, negros y amarillo ocre, restos de material plástico	E= 0.5-0.7 R= 0.5
E-49	Partículas sueltas, restos de animales, fragmentos líticos (transparentes, blancos, negros y naranjas)	E= 0.7 R=0.7
E-50	Partículas aisladas (seltas), trozos líticos de diferentes tamaños y colores (algunos con inclusiones de color blanco), partículas doradas (brillantes), aspecto uniforme, trozos de vidrio (blanco) restos de material de construcción.	E= 0.5-0.7 R=0.5
E-51	Partículas muy finas y sueltas, poco espacio entre ellas, fragmentos líticos grandes y pequeños en su mayoría transparentes, trozos de vidrio, restos de material vegetal seco.	E= 0.9 R= 0.3
E-52	Partículas muy pequeñas y sueltas, trozos de vidrio (ámbar), restos vegetales secos, restos líticos negros y transparentes, aspecto uniforme	E= 0.9 R= 0.7-0.5
E-53	Partículas muy finas y sueltas, partículas de brillo metálico, retículos estrechos, fragmentos líticos negros y blancas. Pocos restos vegetales secos (tallos y raíces)	E= 0.9 R= 0.5-0.7
E-54	Partículas finas, retículos muy estrechos, muy poca evidencia de materia orgánica, restos líticos grandes y medianas (grises), restos de vidrio, rocas pequeñas transparentes y naranjas	E= 0.5 R= 0.3
E-55	Partículas sueltas, pequeñas, formando retículos estrechos, rocas grandes, y pequeñas de color naranja; no se aprecian restos de materia orgánica	E= 0.7 R= 0.7-0.9

No. DE MUESTRA	OBSERVACIONES	ESFERICIDAD Y REDONDEZ
E-56	Partículas pequeñas, sueltas, retículos de tamaño medio, gran cantidad de rocas pequeñas (blancas, negras, naranjas y transparentes), algunos restos de material vegetal seco.	E= 0.3-0.5 R= 0.5
F-57	Partículas grandes, agrupadas formando retículos amplios, restos animales (alas y patas de insecto, babosas, pequeños gusanos blanquecinos, piojos, niguas) fragmentos líticos transparentes brillantes, naranjas negros y blancos, restos vegetales (hojas, tallos, raíces y troncos), terrones de consistencia dura	E= 0.3-0.5 R= 0.5
F-59	Partículas grandes, agrupadas, formando retículos estrechos, restos vegetales (tallos, hojas y flores) terrones de consistencia muy dura, insectos (niguas, piojos), restos óseos, restos líticos transparentes, negros y blancos.	E= 0.7-0.9 R=0.5
F-61	Partículas grandes más o menos sueltas, retículos pequeños, trozos de ladrillo, restos de hojas y tallos, fragmentos líticos grandes grises y blancos y pequeños blancos, amarillo ocre, transparentes y negros	E= 0.7-0.9 R= 0.9
F-63	Partículas medianas más o menos sueltas, retículos de tamaño medio, restos líticos medianas en su mayoría transparentes y grises, restos de vidrio (blanco y ámbar), fibras, material vegetal (pedazos de hojas y raíces), trozos de ladrillo.	E= 0.7-0.9 R= 0.3

5.3. PRUEBAS A LA GOTA

Para las pruebas a la gota se realizaron pruebas en blanco y con patrones para cada catión, asegurando que los positivos sean debido solo al catión contenido en la muestra y no a contaminaciones en los reactivos empleados para disolver.

Luego de realizar las pruebas se determinó que los cationes de Fe (+2 y +3) solo son extraídos por el ácido nítrico, el magnesio se extrajo en mayor cantidad también con dicho ácido, por lo que la prueba es menos sensible en acetato de amonio (Tablas 6, 7, 8 y 9). La prueba del reactivo triple para el plomo, resultó positiva solo para la muestra 47 extraída con acetato de plomo (Tabla 7).

Las pruebas cuyo límite de detección es más alto, son preferibles para propósitos forenses ya que son más selectivas, como lo es la prueba de tiocianato de potasio para Fe^{+3} , cuyo límite de detección es más alto que el del ferrocianuro de potasio, que dio positiva para todas las muestras, por lo que no se puede tomar como criterio de discriminación.

El Zn^{+2} y el Fe^{+2} pueden considerarse en nuestro caso como pruebas cuyos resultados pueden tener utilidad como criterio para comparar suelos con fines forenses, ya que estos cationes están presentes en muy pocas de las muestras estudiadas. El Zn^{+2} sólo fue extraído con acetato de amonio (Tabla No. 6 y 7), mientras que el Fe^{+2} únicamente pudo ser determinado en la solución de ácido nítrico (Tablas No. 8 y 9).

Debido a los resultados que se obtuvieron con la determinación de los aniones, se concluyó que no es una prueba recomendable, puesto que, para este caso concreto, dichos aniones son comunes a todos los suelos o están ausentes en todas las muestras analizadas (Tablas 10 y 11). El mismo caso se presentó con la prueba para identificar presencia o ausencia de ceniza volcánica ya que fue positiva para todas las muestras (Tablas 12 y 13).

Sin embargo no debe entenderse que tanto las pruebas para aniones como la de ceniza volcánica deban ser descartadas para análisis futuros, ya que por ejemplo suelos de Cundinamarca (Molina y Moreno, 1995) presentaron resultados negativos con el reactivo para la identificación de cenizas

volcánicas, lo que significa que esta prueba puede resultar útil para la discriminación de suelos con origen diferente.

5.3.1. Cationes

5.3.1.1. *Extraídos con acetato de amonio*

Tabla 6
Pruebas para cationes extraídos con acetato de amonio de las muestras de suelo A-1 a D-30

No. Muestra			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	18	20	22	24	26	28	30	
	Prueba	Catión	Color																							
Tiosulfato de sodio	Co ⁺²	Azul	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
α, α Dipiridilio	Fe ⁺²	Rojo	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Tiocianato de Potasio	Fe ⁺³	Rojo	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Ferrocianuro de Potasio	Fe ⁺³	Azul	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Hipoyodito de Sodio	Mg ⁺²	Pardo	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Quinalizarina	Mg ⁺²	Azul	+	+	-	+	+	+	-	+	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	-	-	-	+	+	-
Formaldoxima	Mn ⁺²	Rojo-naranja	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Reactivo triple	Pb	Cristales cuadrados	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Ditizona	Zn ⁺²	Púrpura	+	+	+	+	+	+	-	-	+	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Tabla 7
Pruebas para cationes extraídos con acetato de amonio de las muestras de suelo D-32 a F-63

No. Muestra			32	34	35	37	39	40	43	45	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	59	61	63		
	Prueba	Catión	Color																							
Tiosulfato de sodio	Co ⁺²	Azul	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
α, α Dipiridilio	Fe ⁺²	Rojo	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
Tiocianato de Potasio	Fe ⁺³	Rojo	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
Ferrocianuro de Potasio	Fe ⁺³	Azul	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
Hipoyodito de Sodio	Mg ⁺²	Pardo	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
Quinalizarina	Mg ⁺²	Azul	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	
Formaldoxima	Mn ⁺²	Rojo-naranja	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
Reactivo triple	Pb	Cristales cuadrados	-	-	-	-	-	-	-	-	+	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
Ditizona	Zn ⁺²	Púrpura	-	-	-	-	-	-	-	+	-	-	-	-	-	-	-	+	-	-	-	-	-	-	-	

5.4. COLOR

La determinación del color se realizó por la comparación directa de la muestra de suelo (fracción < 0.053 mm) con la tabla Munsell, en diferentes condiciones de luz (horas de la tarde o de la mañana y días diferentes). En las muestras analizadas los colores predominantes fueron el café oliva claro (35.5 %) y el café amarillo claro (20%). La hora en que se realizó la observación no incidió en los resultados obtenidos, presentando una buena reproducibilidad para el mismo observador. Al cambiar de observador algunas mediciones fueron diferentes (Tabla 14).

En general, el suelo de la comuna 4 es bastante homogéneo en cuanto a color, ya que el 91% de las muestras presentaron un color espectral predominante de 2.5Y, y un 25% del total de las muestras mostraron exactamente el mismo color, 2.5Y 5/3 (Figura 7), incluso perteneciendo a diferentes zonas de propiedades aparentemente distintas.

Es importante notar que se obtuvieron colores diferentes de muestras tomadas en muy cortas distancias como fue el caso de las muestras B-14 (2.5Y 4/2) y B-15 (5Y 5/3) que están a 50 m de distancia entre sí. Otro caso que ilustra este hecho es el de las muestras F-57 (2.5Y 4/2), F-61 (2.5Y 5/4) y F-63 (2.5Y 4/3) recolectadas a 100 m. Pero al observar muestras recogidas a distancias considerables se observó repetición en la medición del color, como en el caso de las muestras A-1 y C-26 (2.5Y 6/3) las cuales están separadas por 1000 m.

Por lo expuesto anteriormente, para el caso concreto de los suelos tomados en la comuna 4 de la ciudad de Armenia, la determinación del color arroja información valiosa para la discriminación del suelo en cortas distancias, sin embargo no puede ser tomado como criterio definitivo para la diferenciación de suelos puesto que en ocasiones el color de dos zonas diferentes puede resultar igual.

Las muestras pueden separarse en tres grupos de acuerdo a la similitud entre las determinaciones:

En el primero se ubican aquellas en las que las tres observaciones fueron iguales.

En el segundo tenemos dos determinaciones con resultados iguales y una diferente; este grupo puede dividirse a su vez en dos subgrupos:

- a. Dos notaciones de color observadas pertenecientes a un mismo nombre de color
- b. Dos notaciones de color observadas pertenecientes a un diferente nombre de color

Y un tercer grupo con las tres observaciones distintas, en este trabajo solo se presentaron los dos primeros grupos.

Tabla 14

Determinación del color de los suelos de la Comuna 4 por comparación directa con la tabla Munsell

No. muestra	Observador 1		Observador 2		Observador 1	
	Notación	Color	Notación	Color	Notación	Color
	Mañana		Tarde		Tarde	
A-1	2.5Y 6/3	CAC	2.5Y 6/3	CAC	2.5Y 6/3	CAC
A-2	2.5Y 5/3	COC	2.5Y 5/3	COC	2.5Y 5/3	COC
A-3	2.5Y 5/4	COC	2.5Y 5/4	COC	2.5Y 5/4	COC
A-4	2.5Y 4/2	CGO	2.5Y 4/2	CGO	2.5Y 4/2	CGO
A-5	2.5Y 5/2	CG	2.5Y 5/2	CG	2.5Y 5/2	CG
A-6	2.5Y 6/3	CAC	2.5Y 6/3	CAC	2.5Y 6/3	CAC
A-7	2.5Y 5/4	COC	2.5Y 5/4	COC	2.5Y 5/4	COC
A-8	2.5Y 5/3	COC	2.5Y 5/3	COC	2.5Y 5/3	COC
	Tarde					
A-9*	2.5Y 5/3	COC	2.5Y 5/4	COC	2.5Y 5/3	COC
A-10	2.5Y 6/4	CAC	2.5Y 6/4	CAC	2.5Y 6/4	CAC
A-11*	2.5Y 6/4	CAC	2.5Y 6/6	CO	2.5Y 6/4	CAC
A-12*	2.5Y 5/2	CG	2.5Y 4/2	CGO	2.5Y 5/2	CG
B-13*	2.5Y 4/2	CGO	5Y 4/3	O	2.5Y 4/2	CGO
B-14	2.5Y 4/2	CGO	2.5Y 4/2	CGO	2.5Y 4/2	CGO
B-15*	5Y 5/3	O	2.5Y 6/2	CGC	5Y 5/3	O
C-16*	2.5Y 6/3	CAC	2.5Y 5/3	COC	2.5Y 6/3	CAC
C-18*	2.5Y 5/4	COC	2.5Y 6/3	CAC	2.5Y 5/4	COC
C-20*	2.5Y 5/3	COC	2.5Y 5/4	COC	2.5Y 5/3	COC
C-22*	2.5Y 5/2	CG	2.5Y 5/3	CAC	2.5Y 5/2	CG
C-24*	2.5Y 5/3	COC	2.5Y 5/4	COC	2.5Y 5/3	COC
C-26*	2.5Y 6/3	CAC	2.5Y 5/4	COC	2.5Y 6/3	CAC
D-28	2.5Y 4/3	CO	2.5Y 4/3	CO	2.5Y 4/3	CO
D-30	2.5Y 5/3	COC	2.5Y 5/3	COC	2.5Y 5/3	COC
	Mañana		Mañana		Tarde	
D-32*	2.5Y 5/3	COC	2.5Y 6/3	CAC	2.5Y 5/3	COC
D-34*	2.5Y 4/3	CO	2.5Y 5/3	COC	2.5Y 4/3	CO
D-35	2.5Y 5/3	COC	2.5Y 5/3	COC	2.5Y 5/3	COC
D-37*	2.5Y 4/4	CO	2.5Y 4/3	CO	2.5Y 4/4	CO
D-39	2.5Y 6/4	CAC	2.5Y 6/4	CAC	2.5Y 6/4	CAC
D-40	2.5Y 4/4	CO	2.5Y 4/4	CO	2.5Y 4/4	CO
E-43	2.5Y 5/4	COC	2.5Y 5/4	COC	2.5Y 5/4	COC
E-45	2.5Y 4/2	CGO	2.5Y 4/2	CGO	2.5Y 4/2	CGO
E-47	2.5Y 6/4	CAC	2.5Y 6/4	CAC	2.5Y 6/4	CAC
E-48	2.5Y 5/3	COC	2.5Y 5/3	COC	2.5Y 5/3	COC
E-49	2.5Y 5/3	COC	2.5Y 5/3	COC	2.5Y 5/3	COC
E-50	2.5Y 6/3	CAC	2.5Y 6/3	CAC	2.5Y 6/3	CAC
E-51	5Y 5/2	GO	5Y 5/2	GO	5Y 5/2	GO
E-52	5Y 4/2	GO	5Y 4/2	GO	5Y 4/2	GO
E-53	2.5Y 4/2	CGO	2.5Y 4/2	CGO	2.5Y 4/2	CGO
E-54	5Y 5/3	O	5Y 5/3	O	5Y 5/3	O
E-55*	2.5Y 4/3	CO	2.5Y 5/3	COC	2.5Y 4/3	CO
E-56	2.5Y 5/3	COC	2.5Y 5/3	COC	2.5Y 5/3	COC
F-57	2.5Y 4/2	CGO	2.5Y 4/2	CGO	2.5Y 4/2	CGO
F-59	2.5Y 4/4	CO	2.5Y 4/4	CO	2.5Y 4/4	CO
F-61	2.5Y 5/4	COC	2.5Y 5/4	COC	2.5Y 5/4	COC
F-63	2.5Y 4/3	CO	2.5Y 4/3	CO	2.5Y 4/3	CO

* Muestras que presentaron diferencias en la determinación del color al cambiar el observador.

CAC= Café Amarillo Claro, COC= Café Oliva Oscuro, CGO= Café Grisáceo Oscuro, CG= Café Grisáceo, CO= Café Oliva, GO= Gris Oliva, O= Oliva

El histograma obtenido después de agrupar las muestras (Grupos 1, 2-a y 2-b) permite observar claramente la buena reproducibilidad del método, ya que el grupo con mayor frecuencia es el 1, es decir al que pertenecen las muestras cuyas tres observaciones resultaron iguales. (Figura 8)

5.5. pH

El método utilizado para la determinación de pH mediante microelectrodo de vidrio, presentó una buena reproducibilidad y un alto grado de discriminación entre los suelos analizados, según muestra el análisis de varianza en donde la fuente de variación principal es entre las muestras, y la variación debida a la diferencia entre las repeticiones (dentro de los grupos) es mínima. (Anexo D)

El suelo de la comuna 4 puede definirse como un suelo neutro, según la clasificación realizada por Ortega 1994 (tomado de Malagón, 1995), ya que el 51% de las muestras analizadas presentaron un pH entre 6.6 - 7.39. Mostrando cierta tendencia a la acidez, como se puede observar en la figura 9, donde los datos tienden a agruparse hacia el lado izquierdo de la gráfica, es decir, hacia valores más ácidos.

Los datos obtenidos para pH, corresponden a lo esperado para el tipo de suelo que se recolectó, ya que en la descripción general de la zona de muestreo se reportó que en la gran mayoría de lugares en los que se tomaron muestras había presencia de vegetación, principalmente pastos, los cuales necesitan un suelo neutro a ligeramente ácido para su crecimiento.

Tabla 15
Valores de pH de los suelos de la comuna 4 medidos con microelectrodo de vidrio

Muestra	p H			Promedio
	I	II	III	
A-1	6,47	6,38	6,37	6.41
A-2	8,52	8,10	8,54	8.39
A-3	6,35	6,62	6,33	6.43
A-4	8,22	8,27	7,70	8.06
A-5	6,36	5,72	6,16	6.08
A-6	7,78	7,30	7,22	7.43
A-7	6,54	6,74	6,24	6.51
A-8	7,87	7,66	7,84	7.79
A-9	6,63	6,58	6,44	6.55
A-10	6,45	6,68	6,50	6.54
A-11	7,60	7,17	7,45	7.41
A-12	7,49	7,41	7,55	7.48
B-13	6,31	6,30	6,40	6.34
B-14	7,16	6,91	7,04	7.04
B-15	6,88	6,78	6,82	6.83
C-16	7,34	7,46	7,36	7.39
C-18	6,63	6,55	6,52	6.57
C-20	7,12	7,23	7,18	7.18
C-22	7,03	6,95	7,04	7.01
C-24	6,86	7,11	7,02	7.00
C-26	7,18	7,05	7,12	7.12
D-28	6,79	6,63	6,62	6.68
D-30	6,57	6,94	6,84	6.78
D-32	6,84	6,89	6,87	6.87
D-34	6,69	6,62	6,42	6.58
D-35	7,16	7,51	7,60	7.42
D-37	6,66	6,60	6,47	6.58
D-39	7,13	6,97	7,12	7.07
D-40	6,64	6,77	6,60	6.67
E-43	6,92	6,97	6,87	6.92
E-45	6,92	6,89	7,02	6.94
E-47	6,85	6,95	7,01	6.94
E-48	6,18	6,64	6,68	6.50
E-49	7,46	7,22	7,15	7.28
E-50	7,06	7,04	7,17	7.09
E-51	6,99	7,16	7,18	7.11
E-52	6,62	6,83	6,80	6.75
E-53	7,04	7,00	7,11	7.05
E-54	7,25	7,22	7,34	7.27
E-55	7,77	7,80	7,95	7.84
E-56	7,73	7,81	7,86	7.80
F-57	6,79	6,92	6,68	6.80
F-59	6,48	6,40	6,35	6.41
F-61	7,61	7,69	7,92	7.74
F-63	6,98	7,15	6,81	6.98

I= Primera réplica, II= Segunda réplica, III = Tercera réplica

Se debe destacar que las muestras que presentaron valores extremos de pH pertenecen a un mismo sector, y están separadas por 300 m, que son A-2 con un pH de 8.39 y A-5 con un pH de 6.08 (Tabla 15). Estas diferencias en el pH del suelo pueden deberse a que la muestra A-5 pertenece a un guadual, los cuales requieren un pH ligeramente ácido, entre 5.5 y 6.0 para su desarrollo,

por el contrario la muestra A-2 fue tomada en una zona de escasa vegetación y poca humedad, lo que eleva los valores en el pH.

5.6. GRADIENTE DE DENSIDAD

Los gradientes de densidad se prepararon con una mezcla de bromoformo-etanol (este último sustituyendo al bromobenceno). Se modificó la cantidad de muestra a utilizar de 10 mg y se determinó que 5 mg era suficiente para obtener resultados reproducibles (Tabla 20)

El análisis del gradiente de densidad de las partículas de suelo, presentó reproducibilidad entre los duplicados (Foto 13) y un buen grado de discriminación para todas las muestras, excepto para dos grupos de tres muestras que presentaron idéntica distribución de partículas en la columna de densidad. Grupo 1: A-2, A-7 y D-39 ; Grupo 2: C-16, C-22 y D-35 (Tabla 16)

El etanol resultó ser un buen sustituyente del bromobenceno, al ser miscible con el bromoformo en todas la proporciones y no reaccionar con éste o las partículas de suelo, con la ventaja de ser más barato, menos contaminante y menos nocivo para la salud. Se observó que con esta mezcla se puede elaborar una columna de gradiente de densidad en la cual las partículas se ubiquen en la capa equivalente a su densidad, permitiendo diferenciar una

muestra de otra. Para realizar una comparación objetiva entre las columnas preparadas con bromoformo–bromobenceno y bromoformo–etanol, se fotografiaron los resultados, después de tres horas, de una misma muestra y se observó una distribución igual en las columnas (Foto 14). También se determinó que las partículas se estabilizan más rápidamente en las columnas realizadas con bromoformo–etanol (Foto 15 y 16)

Al observar los gradientes de densidad después de una, tres y ocho horas de reposo, se pudo determinar que solo era necesario tres horas para que se estabilizara la columna, puesto que la distribución de las partículas después de este tiempo permanece igual. (Foto 17, 18 y 19)

Inicialmente se realizaron los gradientes con las densidades establecidas por METRO DADE POLICE DEPARTMENT (Tabla 21), pero se observó una clara tendencia de las partículas a ubicarse en las mismas fracciones, por lo cual se decidió adicionar otras para mejorar la separación en las columnas. Con este nuevo gradiente se corrieron todas las muestras (Tabla 16)

La tendencia general de las partículas de los suelos analizados es la de tener una densidad entre 2.1 - 2.6, y mostrar pocas partículas en la fracción de 1.5, esto puede deberse a que la mayoría de minerales presentes en estos suelos de origen volcánico tienen densidades en estos rangos; como el cuarzo $d= 2.65$, los feldespatos $d= 2.6$, hallosita $d= 2.0 -2.2$ y caolinita $d= 2.6$, entre otros.

Tabla 16
Densidad relativa de las partículas después de 1 y 3 horas de reposo

Densidad No. Muestra	1, 5			1, 7			1, 9			2, 1			2, 3			2, 5			2, 6			2, 7			2, 8			2, 8 9															
	1 h	3 h	h	1 h	3 h	h	1 h	3 h	h	1 h	3 h	h	1 h	3 h	H	1 h	3 h	h	1 h	3 h	h	1 h	3 h	h	1 h	3 h	h																
A1	0	0	0	0	1	1	1	1	2	2	2	2	3	3	2	2	3	3	3	3	3	3	3	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	2	2	2						
A2*	1	1	0	0	1	1	1	1	2	2	2	2	3	3	3	3	3	3	3	2	2	2	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1					
A3	1	1	0	0	1	1	1	1	2	2	2	2	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	2	2	2	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1					
A4	1	1	1	1	2	2	2	2	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	1	1	1	1	1	1	1	1	2	1	2	1	1	1	1	1					
A5	0	0	0	0	1	1	1	1	0	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	2	2	2	2	1	1	1	1	1	1	1	1	2	2	2	2					
A6	0	0	0	0	1	1	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	2	2	2	2	1	1	1	1	2	2	2	2					
A7*	1	1	0	0	1	1	1	1	2	2	2	2	3	3	3	3	3	3	3	2	2	2	2	2	2	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1					
A8	0	0	0	0	1	1	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	1	1	1	1	1	1	2	2	2	2					
A9	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	2	2	2	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3					
A10	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	3	3	3	3	2	2	2	2	2	2	2	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1				
A11	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2	3	3	3	3	3	3	2	2	1	1	1	1	1	1	1	1				
A12	0	0	0	0	2	2	1	1	2	2	2	2	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	2	2	2	2	2	2	2	3	3	3	3					
B13	1	1	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2				
B14	1	1	1	1	1	1	1	1	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	1	1	1	1				
B15	0	0	0	0	1	1	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	3	3	3	3	3	3	3	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2			
C16**	0	0	0	0	1	1	1	1	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	2	2	2	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1			
C18	0	0	0	0	1	1	1	1	3	3	3	3	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	1	1	2	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1			
C20	0	0	0	0	1	1	1	1	3	3	3	3	3	3	3	3	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	1	1	1	1			
C22**	0	0	0	0	1	1	1	1	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	2	2	2	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1			
C24	0	0	0	0	1	1	0	0	1	1	1	1	3	3	3	3	1	1	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	1	1	0	0	1	1	1	1	1	1			
C26	1	1	1	1	1	1	1	1	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	2	2	1	2	2	2	1	1	1	1	1				
D28	1	1	1	1	2	2	2	2	3	3	3	3	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1			
D30	0	0	0	0	1	1	1	1	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2			
D32	0	0	0	0	1	1	1	1	2	2	2	2	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	2	2	2	2	2	2	2	2	2	1	1	1	1	1	1		
D34	0	0	0	0	1	1	1	1	2	2	2	2	3	3	3	3	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	1	1	1	1	1	1	1		
D35**	0	0	0	0	1	1	1	1	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	2	2	2	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1		
D37	1	1	1	1	2	2	2	2	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	2	2	2	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1		
D39*	1	1	0	0	1	1	1	1	2	2	2	2	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	2	2	2	2	2	2	2	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1		
D40	1	1	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2	3	3	3	3	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1		
E43	1	1	0	0	2	2	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	2	2	2	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1		
E45	1	1	1	1	1	1	1	1	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	2	2	2	2	1	1	1	1	2	2	2	2		
E47	1	1	1	1	1	1	1	1	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	2	2	2	2	2	2	1	1	1	1	1	1	1		
E48	1	1	1	1	2	2	2	2	3	3	3	3	3	3	3	3	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	1	1	1	1	1	1
E49	1	1	1	1	2	2	2	2	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	1	1	1	1	1	1
E50	1	1	0	0	1	1	1	1	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	2	2	2	2	2	1	1	1	1	2	2	2	2	2	
E51	1	1	1	1	2	2	2	2	1	1	2	1	1	1	1	1	2	2	1	1	3	3	2	2	2	2	2	2	2	2	1	1	1	1	1	1	1	1	2	2	2	2	
E52	1	1	1	1	3	3	2	2	2	2	2	2	1	1	1	1	2	2	2	2	3	3	3	3	2	2	2	2	2	1	1	1	1	1	1	1	1	2	2	2	2	2	
E53	0	0	0	0	1	1	1	1	3	3	3	3	2	2	2	2	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	2	2	2	2	2	2	2	2	2	1	1	1	1	1	1	1	1
E54	1	1	1	1	2	2	2	2	3	3	3	3	2	2	2	2	3	3	2	2	3	3	2	2	2	2	2	2	2	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	
E55	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	3	3	3	3	2	2	2	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	2	2	2	2	
E56	1	1	0	0	1	1	1	1	2	2	2	2	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
F57	1	1	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	2	2	2	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
F59	1	1	1	1	1	1	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2	3	3	3	3	3	3	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
F61	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	2	2	2	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
F63	1	1	0	0	1	1	2	2	2	2	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	2	2	2	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1

* igual distribución del gradiente de densidad (Grupo 1)

** igual distribución del gradiente de densidad (Grupo 2)

0= ausencia de partículas, 1= cantidad mínima de partículas, 2= cantidad media de partículas, 3= máxima cantidad de partículas

Para algunas de las muestras se aumentó el número de fracciones en el gradiente (E-55 a F-63) obteniendo mejoras en la separación de las partículas, esto puede entenderse como un aumento en el poder de discriminación, ya que al tener mas fracciones en la columna hay menos probabilidad de una coincidencia exacta entre dos o más muestras (Tabla 23)

Otros ensayos se realizaron con las muestras E-48 a E-54 variando la densidad de las fracciones, la distribución de las partículas fue muy similar a la de la Tabla No. 13, lo que sugiere que un cambio en la densidad de las fracciones no tiene gran incidencia en la capacidad de discriminación del método (Tabla 22)

5.7. ANÁLISIS DE TEXTURA DEL SUELO

Las muestras de suelo analizadas resultaron ser heterogéneas respecto a la textura, los porcentajes para arena se encontraron en el rango de 77.3347 - 66.7245, para arcilla 29.9005 -19.3560 y para limo 5,5753 -0.1980. Sin embargo en cuanto a la clase textural todas las muestras, excepto la F-57, son del tipo Franco arcillo –arenosos (Tabla 17). Esto puede deberse a que todas las muestras pertenecen a una misma formación geológica.

Este método tiene una buena reproducibilidad y presenta un alto grado de discriminación entre las muestras, adicionalmente, en suelos de orígenes distintos se observan marcadas diferencias en la textura del suelo. Tal es el

caso de los suelos de Funza y Zabinski en el departamento de Cundinamarca, que en promedio tienen un porcentaje de arena del 35% y de arcilla del 63% aproximadamente (Molina y Moreno, 1995), siendo evidente la diferencia con los suelos de la comuna 4 de la ciudad de Armenia que presenta unos porcentajes de arena alrededor del 70% y de arcilla del 25%.

El Limo no aparece como un buen indicador para diferenciar estas muestras, puesto que el rango de sus valores es muy pequeño y la similitud entre los porcentajes de los suelos de ambas zonas es muy alta.

Según el análisis de varianza de las variables arena, arcilla y limo, se observa claramente que la fuente de variación es causada por las diferencias entre las medias de las muestras y que el error introducido por el método es pequeño (Anexo F). Aunque para el Limo la variación introducida por el error es mayor que para las otras dos variables. Además puede observarse una fuerte relación lineal entre estas tres variables, sobre todo entre la arcilla y la arena, ya que, como lo habíamos dicho anteriormente, el limo tiene un comportamiento ligeramente diferente (Figura 13)

Tabla 17
 Promedios de los porcentajes del tamaño de partícula y clase textural de suelo
 Fa-Ar: Franco arcillo-Arenoso F-Ar: Franco-Arenoso

Muestra	Promedio Arena	Promedio Arcilla	Promedio Limo	Clase textural
A-1	71.2003	26.3510	2.4487	Fa-Ar
A-2	71.2338	25.2472	3.5190	Fa-Ar
A-3	69.6771	26.6631	3.6598	Fa-Ar
A-4	69.6562	28.8277	1.5161	Fa-Ar
A-5	70.9349	27.0080	2.0571	Fa-Ar
A-6	72.3145	24.4370	3.2485	Fa-Ar
A-7	69.5707	28.2973	2.1320	Fa-Ar
A-8	69.9769	28.8313	1.1918	Fa-Ar
A-9	68.3187	27.8258	3.8555	Fa-Ar
A-10	69.9801	27.4464	2.5735	Fa-Ar
A-11	66.7245	29.9005	3.3750	Fa-Ar
A-12	70.8504	25.9043	3.2453	Fa-Ar
B-13	72.0623	27.1427	0.7950	Fa-Ar
B-14	73.1252	25.8843	0.9905	Fa-Ar
B-15	69.7182	26.1618	4.1201	Fa-Ar
C-16	69.0480	28.7610	2.1910	Fa-Ar
C-18	69.4457	28.6975	1.8567	Fa-Ar
C-20	70.1449	27.9974	1.8577	Fa-Ar
C-22	68.3395	26.4113	5.2491	Fa-Ar
C-24	73.6553	23.6931	2.6516	Fa-Ar
C-26	73.8089	24.2056	1.9855	Fa-Ar
D-28	72.0260	25.0512	2.9229	Fa-Ar
D-30	74.5352	23.6738	1.7910	Fa-Ar
D-32	74.0035	24.9984	0.9980	Fa-Ar
D-34	73.1741	23.0473	3.7785	Fa-Ar
D-35	75.2325	24.5046	0.2629	Fa-Ar
D-37	74.0174	25.2572	0.7255	Fa-Ar
D-39	73.8718	25.0671	1.0611	Fa-Ar
D-40	74.3002	24.2363	1.4635	Fa-Ar
E-43	74.3977	24.8511	0.7512	Fa-Ar
E-45	70.9634	26.2694	2.7672	Fa-Ar
E-47	70.8470	26.7167	2.4363	Fa-Ar
E-48	71.8863	27.5224	0.5912	Fa-Ar
E-49	73.5561	25.8463	0.5976	Fa-Ar
E-50	70.0278	26.3811	3.5911	Fa-Ar
E-51	72.8771	25.0001	2.1227	Fa-Ar
E-52	70.6867	25.6640	3.6493	Fa-Ar
E-53	72.6881	25.7823	1.5296	Fa-Ar
E-54	70.8555	26.8816	2.2629	Fa-Ar
E-55	73.1406	23.1498	3.7096	Fa-Ar
E-56	77.3347	21.3374	1.3279	Fa-Ar
F-57	75.0686	19.3560	5.5753	F-Ar
F-59	69.1151	28.6295	2.2554	Fa-Ar
F-61	73.4948	25.9132	0.5920	Fa-Ar
F-63	71.6983	28.1037	0.1980	Fa-Ar

5.8. ANÁLISIS DE MINERALES ARCILLOSOS

Luego de realizar el tratamiento a las muestras de suelo a 1 y 1.5 horas en el ultrasonido, y con un tamaño de muestra de 50, 20 y 10 mg. se determinó que para la separación de la fracción arcilla es suficiente el tiempo de 1 hora y 20 mg de muestra con lo que se obtiene la cantidad necesaria para leer en el espectrofotómetro FTIR. Al utilizar 10 mg de muestra la cantidad de fracción arcilla extraída no fue la suficiente para tomar un espectro.

Para determinar la repercusión del limo en la determinación de minerales arcillosos, se realizaron algunos ensayos utilizando únicamente la fracción < 0.038 mm, el espectro resultante fue igual al obtenido de la fracción arcilla. Esto puede ser explicado por el hecho de que al haber muy poca cantidad de limo en las muestras estudiadas su incidencia en los espectros es mínima (Figura 62)

En la literatura se recomienda eliminar el agua por calentamiento de la muestra en una estufa a 160°C por un espacio de 16 horas, las pruebas que se realizaron demostraron que esto influye específicamente en la banda entre 4000 y 3000 cm^{-1} , resolviendo algunas bandas de dicha región (Figuras 65, 66 y 67)

Se realizaron ensayos para determinar el efecto de las altas temperaturas (800°C) en la resolución de los espectros, al eliminar el agua presente en la

fracción arcilla, observándose una clara disminución en la intensidad de la banda entre 4000 y 3000 cm^{-1} , la cual tiene picos característicos para los minerales hidratados, por lo que no se recomienda hacer tratamientos drásticos de temperatura a la muestra, puesto que se pierden detalles espectrales de dicha región (Figuras 63 y 64)

Otra prueba efectuada consistió en el tratamiento con peróxido de hidrógeno al 10% para eliminar la materia orgánica, ya que su presencia puede dificultar la interpretación de los espectros infrarrojos, pero se observó que su influencia es pequeña ya que los cambios que se observaron en los espectros son mínimos y no desenmascaran bandas características de minerales (Figuras 60 y 61).

Se encontró una variedad limitada de minerales en las muestras analizadas, siendo el componente principal de la arcilla de esta zona la Hallosita (66%), seguida por cuarzo, alofán, caolinita, gibsita y calcita (Tabla 18).

En la mayoría de los casos se presentaron mezclas de minerales, por lo que la interpretación de los espectros debió realizarse de una manera minuciosa, y se hizo necesario revisar en detalle los espectros, ampliando algunas regiones con la ayuda del software del espectrofotómetro FTIR, para determinar la presencia o ausencia de bandas y hombros que pudieran permitir la identificación de los minerales que se encontraban en pequeñas cantidades y podían estar enmascarados por las bandas de los otros minerales de mayor proporción (Tabla 18)

La gran cantidad de alofán y hallosita presentes en el suelo de la comuna 4 de la ciudad de Armenia se puede entender fácilmente debido a que en la meteorización de las cenizas volcánicas, la transformación de los minerales primarios sigue una dirección tal que un mismo producto, el alofán, tiende a ser formado. En esta secuencia, el alofán encabeza una serie mineralógica que progresa hacia términos cristalinos como la hallosita, en primera instancia, seguida de la caolinita (Besoain, 1974)

Tabla 18
Bandas de absorción en las regiones IR 4000-3000 cm^{-1} , 1200-400 cm^{-1} para fracción arcilla de los suelos de la comuna 4 (Figuras 14 a 58) y minerales identificados

No. Muestra	Bandas de absorción en el IR												Mineral identificado
A-1	3694	3623		1085	1035	914		792	751	683	538	469 463	Hallosita
A-2	3696	3624		1089	1035 1011	915		796	742	687	538	468 435	Hallosita
A-3	3691	3622		1089	1034	912		796 779	747	683	540	469 435	Hallosita- Cuarzo
A-4	3696	3621 h3570		1089	1028	914	827	794	751	680 635	534	468 432	Hallosita
A-5	3696	3623		1092	1033 1010	914		792	752	685 639	535	468 433	Hallosita
A-6	3696	3624		1089	1034	913		795	748	681	537	469 433	Hallosita
A-7	3697	3623		1089	1031	912		795 780	742	683	542	469 432	Hallosita- Alofán-Cuarzo
A-8	3695	3623		1089	1033	913		793	750	684	536	468 433	Hallosita
A-9	3697	3625		1089	1033	913	834	793	751	681 650	535	469 433	Hallosita
A-10				1089	1003			796 777		680	576 503	470- 433	Cuarzo-Alofán
A-11	3698	3620		1100	1030 1005	913		790 776	746 720	690 648	591 530	466 427	Caolinita
A-12				1089	1019			796	743	678	580 539	467	Alofán- Hallosita
B-13	3694	3620		1090	1032 1010	914		796 779	750	690	536	468 436	Hallosita- Cuarzo
B-14	3692 3676	3650 3622		1085	1011			785	758	685 647	525	462 433	Hallosita
B-15	3694 3676	3654 3622		1089	1012	914		785	756	687 647	527	464 430	Hallosita
C-16				1098	1015			795 777		680	573 547	466 437	Cuarzo-Alofán
C-18				1089	1014			794		683	578 545	467 433	Alofán
C-20	3695 3676	3650 3622		1089	1012			794 779		690	571 547	464	Cuarzo-Alofán Hallosita- Vermicuita
C-22	3675			1089	1014			795 780		693	579 540	466	Cuarzo-Alofán Stevenita
C-24	3693 3676	3650		1089	1013			794		690 660	570 547	467 432	Alofán-Cuarzo Vermicuita
C-26				1089	1013		827	796 779		675	576 545	466 436	Cuarzo-Alofán -Hallosita

No. Muestra	Bandas de absorción en el IR												Mineral identificado
D-28				1091	1014			794 772		669	562 500	469 436	Alofán-Cuarzo
D-30	3694 3676	3650 3622	3525 3444 3391	1090	1032	912	825	797	745	669	540	469 433	Hallosita- Gibsita
D-32				1094	1016			796 779		683	573 544	469 436	Cuarzo-Alofán Hallosita
D-34				1089	1013			796 778		683	573 547	466 436	Cuarzo-Alofán
D-35				1089	1016		876	794 778		683 669	575 543	467 435	Cuarzo-Alofán
D-37	3696 3673	3679 3622	3527 3447 3394	1089	1034	912		796 780	742	670	540	468 435	Hallosita – Gibsita
D-39				1089	1010			796 778		690 670	575 517	465 430	Cuarzo-Alofán
D-40				1089	1034 1011	912		796 779		669	546	469 433	Cuarzo- Hallosita
E-43				1093	1013			794 779		669	576	468 433	Cuarzo-Alofán
E-45	3695 3674	3650 3622		1085	1032 1008	913	838	797 778		691	542	467 433	Cuarzo- Hallosita
E-47				1085	1011			796 778		683	573 547	468 433	Cuarzo-Alofán
E-48				1089	1013		824	794 776		687	574 547	467 436	Cuarzo-Alofán
E-49				1093	1013		824	794 779	740	690	575 543	467 433	Cuarzo-Alofán -Hallosita
E-50				1089	1041 1010	913	823	794 779	740	687	573 543 500	465 433	Cuarzo-Alofán -Hallosita
E-51				1089	1015			795 779	746	683	576	467 433	Hallosita- Cuarzo
E-52	3695	3622		1089	1013			795 776	754	687	573 543	468 435 406	Cuarzo-Alofán -Hallosita
E-53				1089	1031 1010	914	827	794 776	746	665	536	467 433	Cuarzo- Hallosita
E-54	3694	3622		1089	1034 1010	916		791	755	683 639	536	465 433	Caolinita- Cuarzo
E-55	3694	3623		1089	1012		876	794 779	756	648	531	465 436	Cuarzo-Calcita Hallosita
E-56				1093	1030		875	794 779		691 670	569 537	464 436	Calcita-Alofán Cuarzo Hallosita
F-57	3696 3678	3653 3621		1090	1033 1010	912		794	751	687	536	468 431	Caolinita
F-59	3697	3623		1090	1032 1010	912		793	748	685	537	469 432	Caolinita
F-61				1089	1017			796 778		683	576 543	468 436	Alofán-Cuarzo Hallosita
F-63	3698	3623		1089	1034 1010	914	824	793	748	683	538	469 436	Caolinita- Hallosita

Es interesante observar la presencia de Gibsita únicamente en las muestras D-30 y D-37. Esta información puede ser de gran utilidad en casos que involucren muestras de suelo como evidencia, ya que es un mineral escaso en esta zona, aunque no lo es en suelos de este tipo (Andisoles) en los cuales no

es raro encontrar Gibsita y altas proporciones de óxidos e hidróxidos de aluminio en su composición.

Al comparar algunas muestras de suelos recolectados en la Comuna 4 de Armenia con suelos de otros orígenes, por ejemplo de Cundinamarca, vemos que hay diferencias significativas entre ellos, sobre todo en las regiones entre $3700\text{-}3400\text{ cm}^{-1}$ y $1200\text{-}700\text{ cm}^{-1}$ (Figuras 1 y 2). Se observa que los suelos de Cundinamarca son más meteorizados y por tanto los minerales que lo componen están en un estado más cristalino, por lo que las bandas son más definidas, mientras que en la mayoría de los suelos de Armenia las bandas en los espectros son muy anchas debido a la presencia de minerales del tipo del alófano, propios de suelos en estado temprano de meteorización. Gracias a estas diferencias, suelos de orígenes diversos pueden ser fácilmente distinguidos utilizando un espectro infrarrojo de su fracción arcilla.

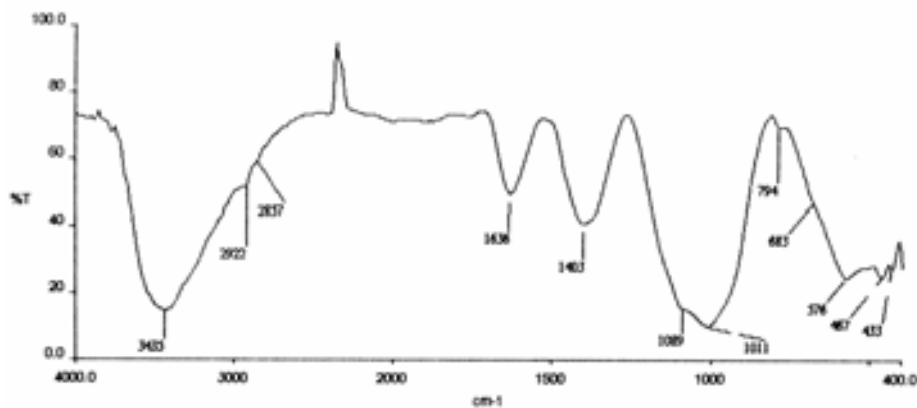


Figura 1
Espectro infrarrojo de una muestra de suelo tomada en Armenia

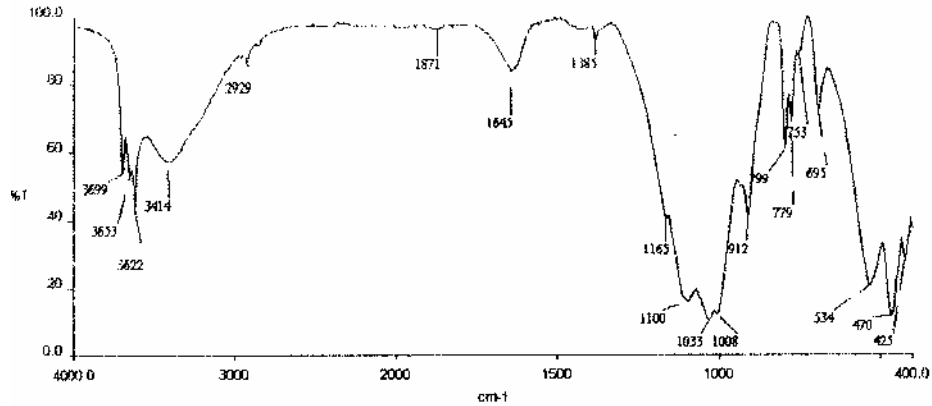


Figura 2
Espectro infrarrojo de una muestra de suelo tomada en Ciudad Bolívar (Bogotá D.C)

De acuerdo a los minerales encontrados por infrarrojo en la fracción arcilla de los suelos de la comuna 4 de Armenia podemos clasificarlos en 5 grupos a saber:

- Grupo 1: Suelos poco meteorizados cuyos componentes son el alófono y la hallosita
- Grupo 2: Suelos poco meteorizados con presencia de minerales primarios compuestos de alófono y cuarzo y/o calcita.
- Grupo 3: Suelos formados de minerales del grupo de los caolines (caolinita y/o hallosita)
- Grupo 4: Suelos conformados por caolines y minerales primarios (caolinita y/o hallosita, cuarzo y/o calcita)
- Grupo 5: Suelos con presencia de gibsita y minerales del grupo de los caolines.

5.8.1. Análisis de un espectro infrarrojo de la fracción arcilla

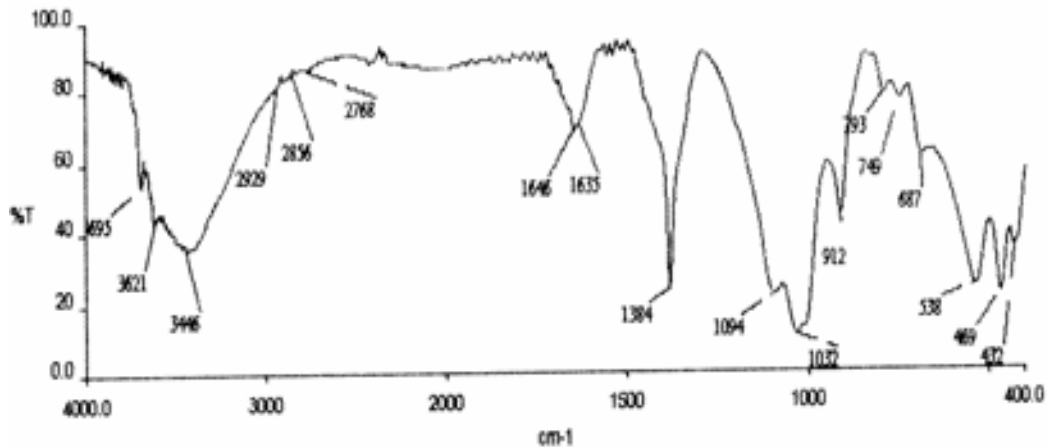


Figura 3
Espectro infrarrojo de la muestra 59

El espectro infrarrojo de la muestra 59 es un espectro característico de minerales de arcilla como la caolinita, y sus bandas de absorción pueden ser asignadas de la siguiente manera:

- Banda alrededor de 3620 cm^{-1} surge de la vibración de grupos internos OH, y la que se encuentra cerca de los 3700 cm^{-1} es debida a la superficie interna de los grupos OH.
- Las bandas deformacionales de los OH de la caolinita alrededor de los 938 y 915 cm^{-1} pertenecen a vibraciones de los OH más internos y superficiales respectivamente.
- Las bandas de agua absorbida aparecen a 3400 y 1630 cm^{-1} las cuales no presentan señales de utilidad en la identificación de minerales arcillosos, como tampoco las bandas de absorción de C-H a 2850 y 2960 cm^{-1} que son atribuidas a contaminantes orgánicos.
- 1094 , 1032 y 1010 cm^{-1} debidas a vibraciones valenciales de grupos Si-O de la caolinita.

- Las vibraciones deformacionales de los grupos Si-O de la caolinita se encuentran a 790, 750, 690 y 470 cm^{-1} .
- En los 540 cm^{-1} se encuentra una banda debida a vibraciones deformacionales de Si-O-Al^{VI} de la caolinita.
- La banda encontrada en los 430 cm^{-1} es asignada a vibraciones deformacionales de Al^{VI}-OH en la caolinita.

6.9. COMPARACIÓN ENTRE LOS MÉTODOS

Al comparar todos los métodos analíticos se pueden encontrar asociaciones o discriminaciones entre las muestras de suelo, ya sea para todo el conjunto de las muestras estudiadas o para una muestra particular. Pero al comparar todos los resultados se ve claramente que al asociar los parámetros no todos siguen un patrón que en determinado momento pudiera ser utilizado para predecir el comportamiento de otro lo cual es razonable, porque en ciencias forenses se trabaja con todos los métodos analíticos disponibles y es de todos los parámetros y no de uno solo que depende la solución de un caso, y de ahí la importancia de tener en cuenta tanto las propiedades químicas como físicas y mineralógicas.

En cuanto a la discriminación, particularizando, en un grupo de muestras se pueden establecer criterios de discriminación, cuando dos o mas muestras son las únicas de ese grupo que respecto a determinado parámetro se diferencian de las demás, tal como sucede con las muestras 51 y 52 donde el color es

diferente con respecto a todo el grupo y entre ellas mismas, pero son similares en su composición mineralógica, o se da el caso de muestras que con parámetros extremos diferentes, coincidan en otro como sucede con las muestras 2 y 5 con pH 8.39 y 6.08 respectivamente, pero con igual composición mineralógica (Tabla 29) y dieron positivo para los mismos cationes en pruebas a la gota.

Dos muestras que no se pueden diferenciar por un método pueden ser diferenciadas con otro parámetro como ocurre con las muestras 30 y 37 que tienen la misma composición mineralógica pero que en cuanto a pH y color presentan diferencias significativas.

Los métodos relacionados cuyos parámetros siguieron patrones lógicos fueron: Densidad y composición mineralógica. Al asociar éstos parámetros se observa que hay una tendencia de las muestras que tienen igual densidad a presentar una composición mineralógica similar, el caso más representativo es para las muestras con densidad media 2.33, donde los minerales que predominan son el cuarzo y el alófono. De igual manera las muestras con colores similares tienen un mineral representativo común y esto es evidente ya que el color del suelo depende de los minerales que están presentes en él. El caso más distintivo es para las muestras con color COC donde el mineral predominante es la hallosita y para las muestras con color CAC donde predomina el cuarzo y el alófono.

Las muestras con pH entre 7 y 8 tienden a tener en su composición los minerales cuarzo y alófono en contraposición con las muestras con pH inferiores a 7 cuyo mineral mas representativo es la hallosita.

6. CONCLUSIONES

1. El estereomicroscopio es una herramienta útil para realizar una observación preliminar de la muestra y tener una idea general de los elementos del suelo.
2. Las pruebas a la gota pueden dar, en ciertos casos, información valiosa respecto al suelo, y pueden ser llevadas a cabo siempre y cuando haya cantidad suficiente de muestra (mínimo 500 mg)
3. Mientras mayor sea el límite de detección de una prueba a la gota, el grado de discriminación que puede tener es mejor.
4. Es necesario que la observación del color la realice un mismo observador, puesto que cada persona tiene sensaciones visuales diferentes sin embargo, estas no varían significativamente.
5. Mediante la medición del color de la muestra no pueden diferenciarse suelos en cortas o grandes distancias, ya que es una propiedad que varía poco y pueden presentarse suelos del mismo color aunque provengan de distintos lugares, sin embargo es una prueba que puede dar información de

una manera rápida y sencilla y ser de utilidad en caso de cotejos judiciales.

6. Los métodos instrumentales pueden considerarse como los mas exactos y confiables, como es el caso de la determinación de pH con el microelectrodo de vidrio, con el que se pueden obtener datos confiables y reproducibles, además los valores de pH fueron diferentes incluso para muestras similares en otras propiedades, con esto se entiende el valor evidencial del pH.
7. El etanol se puede utilizar como sustituyente del bromobenceno para realizar las columnas de gradiente de densidad sin que interfiera en la distribución de las partículas, con la ventaja de ser menos contaminante y mas barato
8. Luego de tres horas de reposo para las columnas de gradiente de densidad se obtiene la misma distribución de las muestras que al pasar ocho horas de reposo.
9. El método de textura arrojó resultados reproducibles y con alto grado de discriminación sobre todo en la determinación de la fracción arena y arcilla. El error presente en la determinación de Limo fue más alto.
10. Ninguna prueba puede considerarse aislada para discriminar o asociar dos muestras, se debe realizar una combinación de métodos analíticos que

permita disponer de todos los parámetros físicos, químicos y mineralógicos.

11. Los suelos pueden presentar diferencias en cuanto a su composición y propiedades físicas, químicas y mineralógicas, aunque pertenezcan a una misma formación geológica.
12. Es importante tener en cuenta las características del terreno para realizar la toma de las muestras, puesto que, por ejemplo, en zonas de cultivos, el suelo está siendo constantemente modificado por la adición de fertilizantes, plaguicidas y siembra de diferentes productos, por tanto en estos casos no es de utilidad tener la información disponible sobre estos lugares en bases de datos.
13. Con la técnica de espectrofotometría infrarroja con transformada de Fourier para determinar minerales de la fracción arcilla se obtuvo un buen poder de discriminación, además de la facilidad en su aplicación y la poca cantidad de muestra necesaria para la toma de los espectros.
14. La materia orgánica presente en los suelos estudiados no interfiere en el análisis de minerales arcillosos por espectrofotometría infrarroja con transformada de Fourier.
15. Mediante la espectrofotometría infrarroja se pudieron diferenciar minerales del mismo grupo como la caolinita de la hallosita

7. RECOMENDACIONES

1. La determinación del color debe ser realizada por un solo observador para evitar ambigüedades en la lectura.
2. El método de gradiente de densidad puede arrojar resultados errados debido a la subjetividad del mismo, por lo que se recomienda consignar los resultados de las columnas mediante fotografías.
3. Las soluciones utilizadas para las columnas de gradiente de densidad y pruebas a la gota deben ser utilizadas en el menor tiempo posible, puesto que la densidad o las propiedades de la solución pueden alterarse con el tiempo, y los resultados obtenidos no van a ser los adecuados.
4. Se deben realizar un mínimo de pretratamientos para que las muestras se analicen tal y como se recolectaron.
5. Es recomendable calentar la fracción arcilla a 165°C durante 16 horas para eliminar el agua adsorbida para obtener un mayor detalle de los espectros infrarrojos.

6. Las soluciones deben ser agregadas a la columna del gradiente de densidad gota a gota, para evitar la mezcla entre las fracciones.

7. Para el estudio de minerales arcillosos por espectrofotometría infrarroja con transformada de Fourier se puede trabajar con la fracción <math><0.038\text{mm}</math>, obtenida por tamizaje.

8. No se deben realizar tratamientos drásticos de temperatura para la determinación de los minerales arcillosos

8. BIBLIOGRAFÍA

- ANGER V., FRITZ F. 1980. Pruebas a la gota en análisis inorgánico. Editorial El Manual Moderno, México DF.
- ADAM J., DEMMELMEYER H. 1995. Forensic investigation of soil and vegetable materials. *Forensic Science Review* 7 (2), 119-142.
- AGUILERA S.A., BORIE G., PEIRANO P. & GALINDO G. 1997. Organic matter in volcanic soils in Chile: chemical and biochemical characterization. *Commun. Soil. Sci. Plant Anal.* 28, 899 – 912.
- BALLESTEROS, M.I.; BETANCOURT, J.M. & MOLINA, C.M. 1998. Estudio de suelos con fines forenses por análisis físicos, químicos, mineralógicos y granulométricos.- *Geología Colombiana.* 23, 107-115.
- BESOAIN E., SERRATOSA J.M. & HIDALGO A. 1964. Espectros de absorción infrarroja de la fracción arcilla de suelos volcánicos de Chile. *Anales de Edafología y Agrobiología.* 23 (5-6), 293-303.
- BRUNELLE R., HOFFMAN C. & SNOW K. 1969. Forensic comparison of soils by neutron activation and atomic absorption analysis. *The Journal of Criminal Law, criminology and Police Science* 60 (3), 395-401.
- CHAPERLIN K., HOWART P.S. 1983. Soil comparison by density gradient method –a review and evaluation. *Forensic science International.* 23, 161-177.
- DUDLEY, R.J. 1976. A simple method for determining the pH of small soil sample and its use in forensic science. *Journal of Forensic Science Society* 16 (1), 21-27.
- _____, SMALLDON K.W. 1978. The evaluation of methods for soil analysis under simulated scenes of crime conditions. *Forensic Science International,* 12, 49-60.
- _____, _____ 4. 1978. The objetive comparison of the particle size distributions in soils whit particular reference to the sand fraction. *Med. Sci. Law.* 18 (4), 278-282.

- GARCÍA E., MACIAS F. & GUITIAN F. 1984. Reacción con el FNa de los suelos de Galicia. *Anales de Edafología y Agrobiología* 43 (5-6), 755-776.
- GOIN L.J., KIRK P.L. 1947. Application of microchemical techniques identity of soil samples. *American Journal of Police Science*, 38, 257-281.
- HIRAOKA Y. 1994. A possible approach to soil discrimination using X-ray fluorescence analysis. *Journal of Forensic Science* 39 (6), 1381-1392.
- HURLBUT C. & KLEIN C. 1988. *Manual de mineralogía de Dana*. Editorial Reverté S.A. Barcelona.
- INGEOMINAS, 1991. Mapa geológico generalizado del Departamento del Quindío. *Memorias explicativas*. Bogotá D.C.
- _____. 1987. Recursos naturales de Colombia. *Publicaciones geológicas especiales de Ingeominas*. Tomo II, Bogotá D.C.
- JUNGER, E.P. 1996. Assessing the unique characteristics of close-proximity soil samples: just how useful is soil evidence? *Journal of Forensic Science* 41 (1), 27-34.
- JACKSON M. L. 1964. *Análisis Químico de Suelos*. Ediciones Omega, S.A, Barcelona, España.
- LABORATORY OF PHYSICAL GEOLOGY AND SOIL SCIENCE. 1984. "A pedological study in volcanic ash deposits in the hilly area of Mosquera and the Sabana de Bogotá". *Weathering and pedogenesis in volcanic ashes under different climatological conditions*. Univesity of Amsterdam. The Netherlands.
- MARUMO Y., NAGATZUKA S. & OBA Y. 1986. Clay mineralogical analysis using the <0.05 mm fraction for forensic science investigation –its application to volcanic ash soils and yellow brown forest soils. *Journal of Forensic Sciences* 31 (1), 92-105.
- MARKUS J.A, McBRATNEY A.B. 1996. An urban soil study: heavy metals in Glebe, Australia. *Australian Journal of Soil Research* 34, 453-465.
- MALAGON D., PULIDO C., LLINAS R.D. & CHAMORRO C. 1995. *Suelos de Colombia*. IGAC, Santa Fe de Bogotá.
- McLAUGHLIN, M. J; SMART, M. K & ZARCINAS, B. A. 1996. The effect of acid digestion technique on the performance of nebulization systems used in inductively coupled plasma spectrometry. *Commun. Soil. Sci. Plant Anal.* 27 (5-8), 1331 – 1354.
- METRO DADE POLICE DEPARTMENT. 1988. *Crime Laboratory Bureau. Soil Examination*.

- MOLINA C.M & MORENO J. 1995. Elaboración de un modelo comparativo de suelos con base en análisis físicos, químicos y sedimentológicos para su aplicación en geología forense. Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Ciencias. Dpto. de Geociencias. Bogotá D. C.
- MUKOYAMA, H.; RIDERER, J.; SELIER, K.; SETA, S.; THATCHER, P.J. & THORTON, J.I. 1986. Forensic Soil Characterization. Forensic Science Progress. Berlin, Heidelberg, New York, Tokyo, 1-35.
- MUNSELL COLOR COMPANY. 1994. Munsell Soil Color Charts. Revised edition.
- MURRAY R. 2000. Devil in the Details. The Science of Forensic Geology. Geotimes
- _____ & TEDROW, J.F.C. 1975. Forensic Geology: Earth Science and Criminal Investigation. Rutgers University Press.
- ORTEGA O. F. 1994. Consideraciones generales para interpretar análisis químicos de suelos. IGAC, Bogotá D.C.
- PEÑA C., PEÑA H. 1998. Caracterización petrográfica y mineralógica de los suelos de un sector del sw de Ciudad Bolívar en Santa fe de Bogotá aplicada a la geología forense. Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Ciencias. Dpto. de Geociencias. Bogotá D. C.
- PERKIN ELMER. 1993. System 2000 FT IR, User's Manual. Technical Publications Perkin Elmer LTDA. Printed in the United Kingdom.
- PROST R., SPOSITO G. 1982. Structure of water adsorbed on smectites. Chemical reviews 82 (6), 553–573
- RUSSELL J. D. & FRASER A. R. 1994. Infrared methods. Introduction to clay minerals. "Clay mineralogy: spectroscopic and chemical determinative methods". Chapman and Hall. London.
- SOTO H. J. 2002. Aplicación de Técnicas de suelos para su caracterización parcial con fines forenses en una zona de Ciudad Bolívar en Bogotá D.C. Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Ciencias. Dpto. de Química. Bogotá D. C.

ANEXO A. Mapas de la zona de muestreo

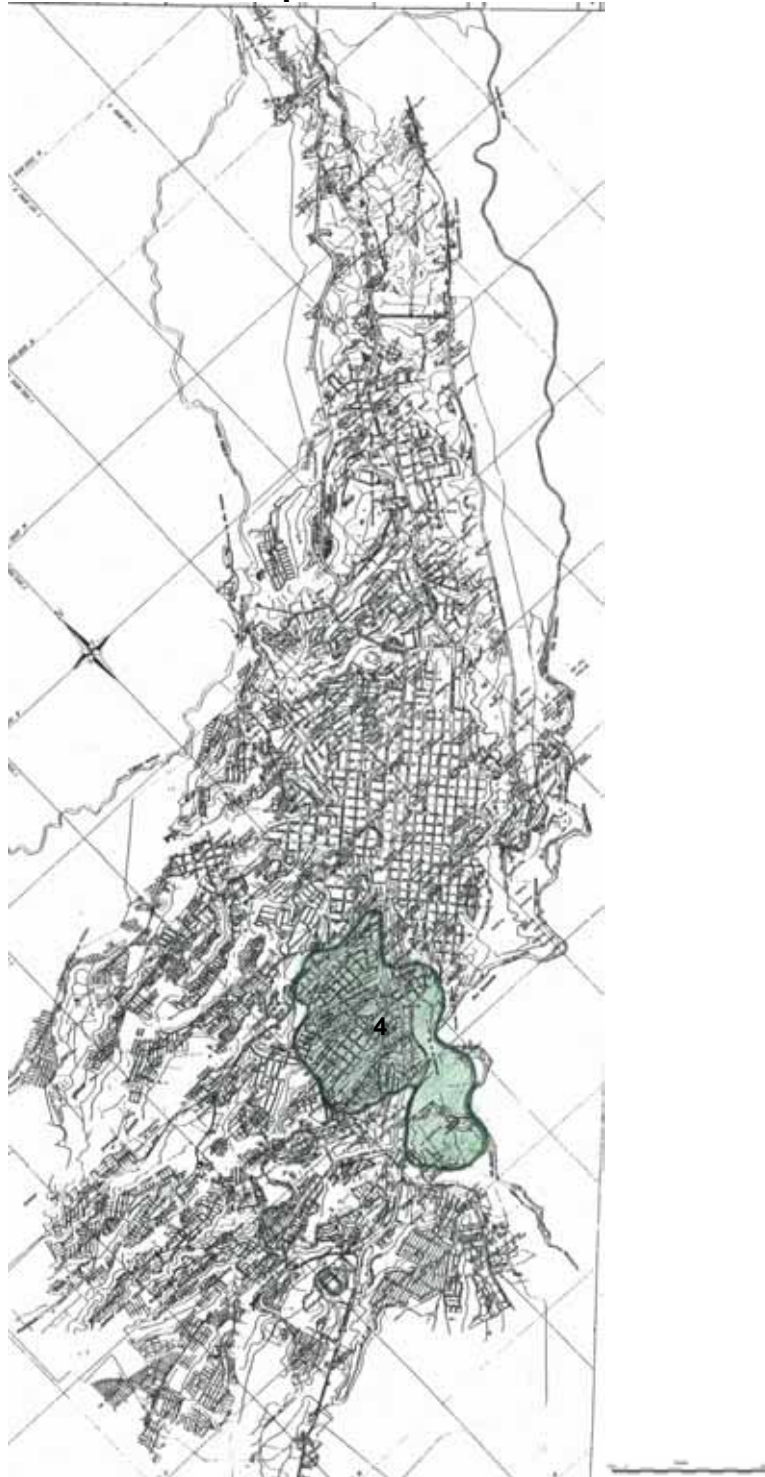


Figura 4

Ubicación de la Comuna 4 en la ciudad de Armenia

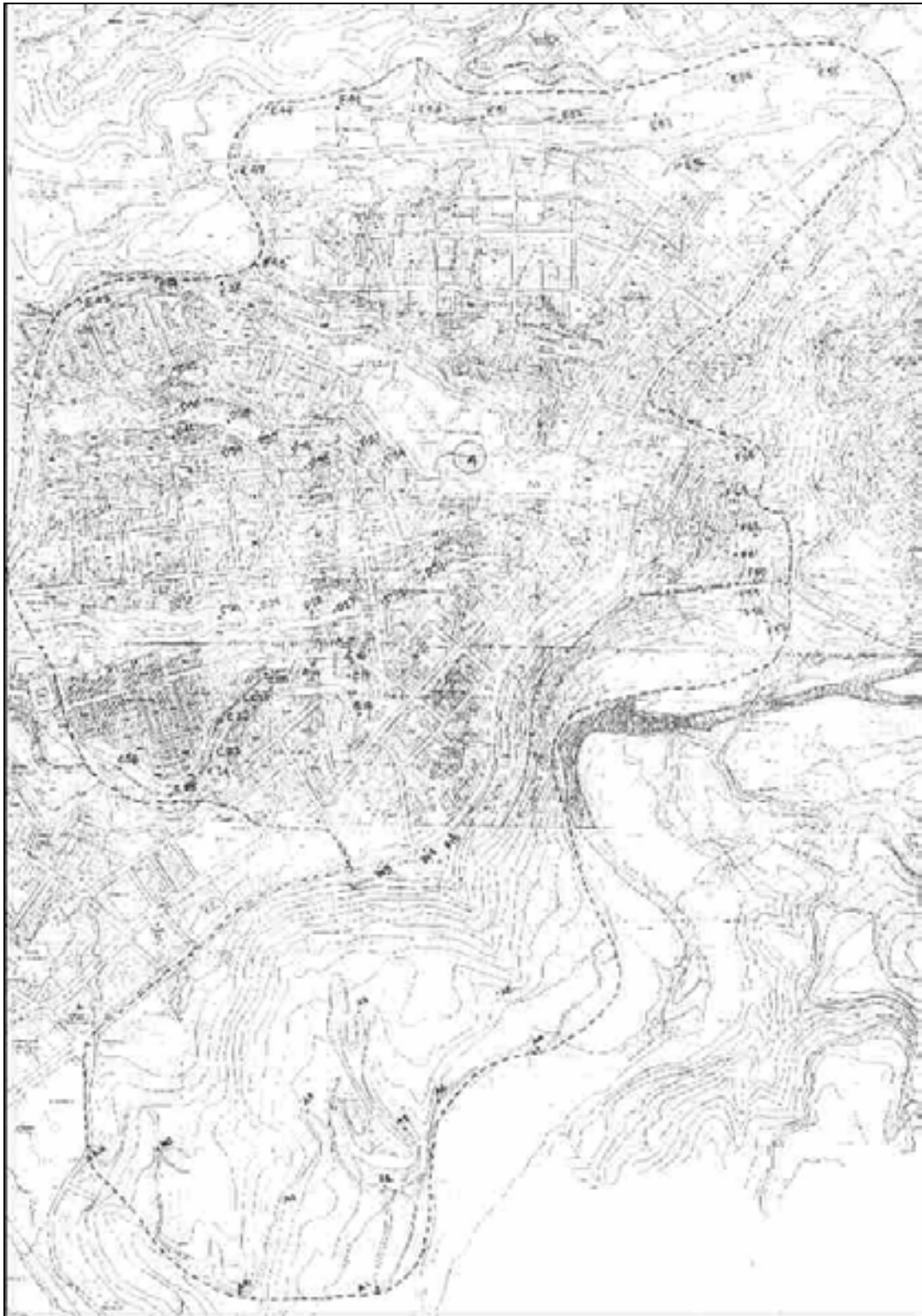


Figura 5
Ubicación del sitio de muestreo de los suelos

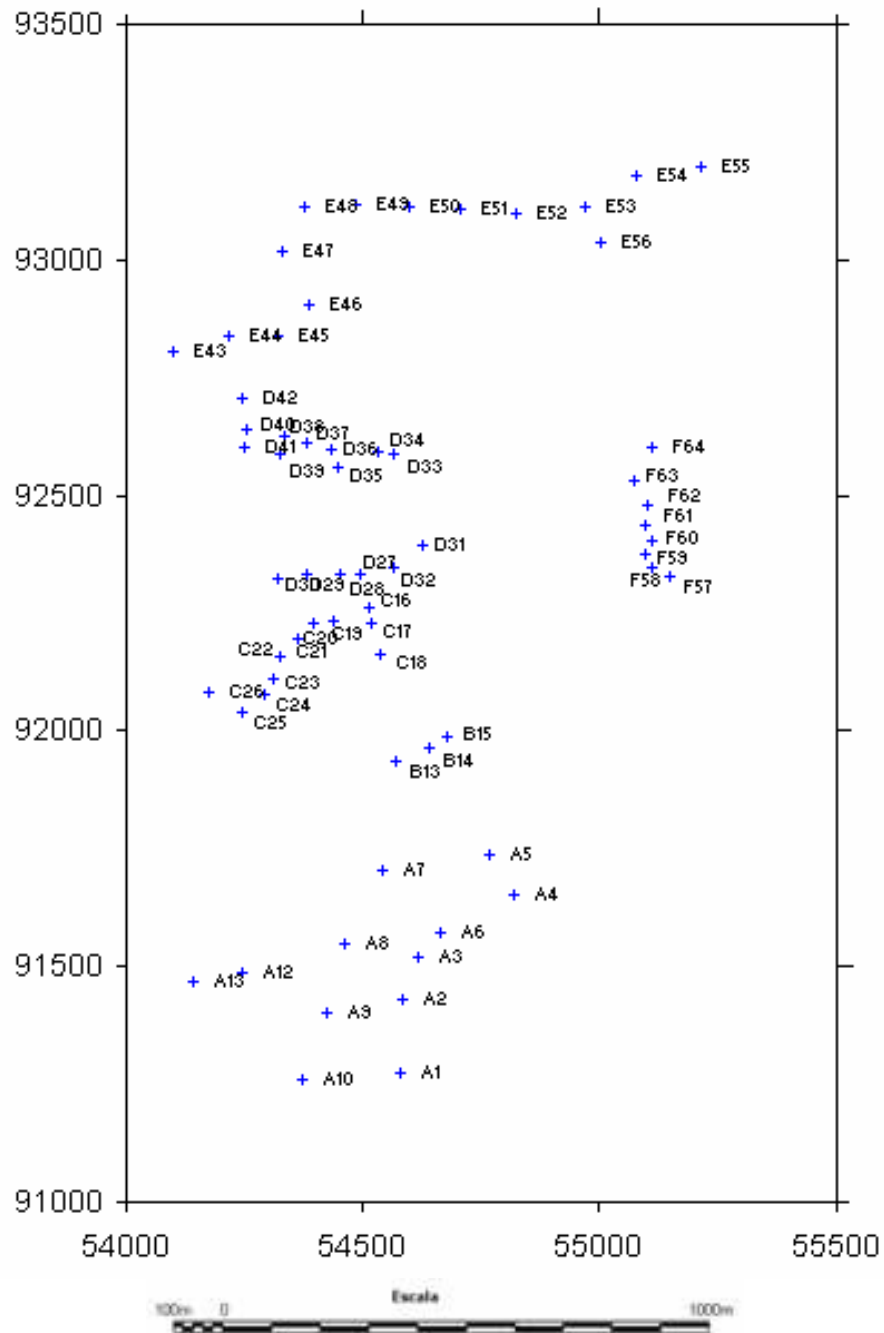


Figura 6
Ubicación de las muestras de suelo

ANEXO B. Lugar de toma de las muestras

<p>Foto 1 Muestra A-05</p>  A photograph showing a forest floor covered in a thick layer of dry, brown leaves and twigs. The background is dark, suggesting a dense forest.	<p>Foto 2 Muestra A-10</p>  A photograph of a forest floor with a mix of green and brown vegetation, including long, thin leaves and some dried plant matter.
<p>Foto 3 Muestra A-12</p>  A photograph of a dirt path or clearing in a forest, showing a mix of brown soil and green vegetation.	<p>Foto 4 Muestras B-13, 14 y 15</p>  A photograph of an open, grassy field with a small, simple building in the background under a cloudy sky.
<p>Foto 5 Muestras C-19 y 20</p>  A photograph of a hilly landscape with green vegetation and a dirt path or clearing in the foreground.	<p>Foto 6 Muestra C-26</p>  A photograph of a dirt road or path winding through a forest with dense green vegetation on the sides.

Foto 7 Muestra D-30



Muestra D-32
Foto 8



Muestra D-38 y 39

Foto 9



Muestra E-48

Foto 10



Muestra F-58 y 59

Foto 11



Muestra F-63

Foto 12



ANEXO C. Color

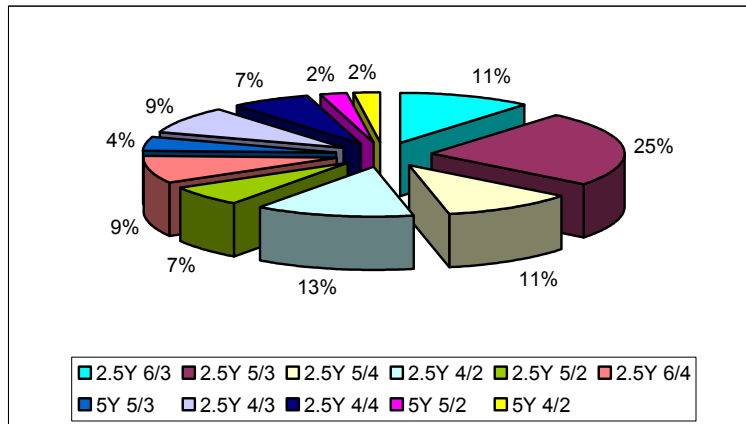


Figura 7
Distribución porcentual del color

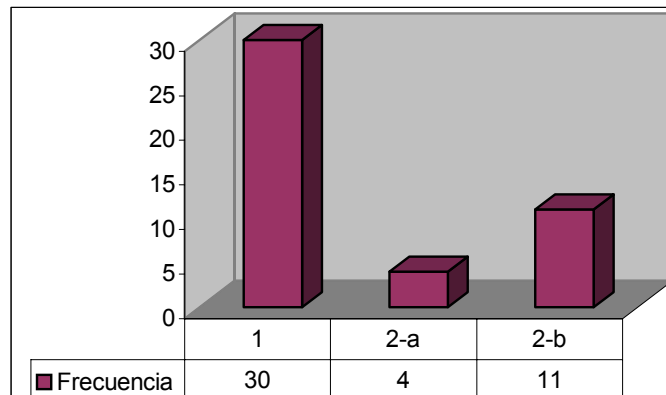


Figura 8
Histograma de color según la reproducibilidad entre las determinaciones

ANEXO D. pH

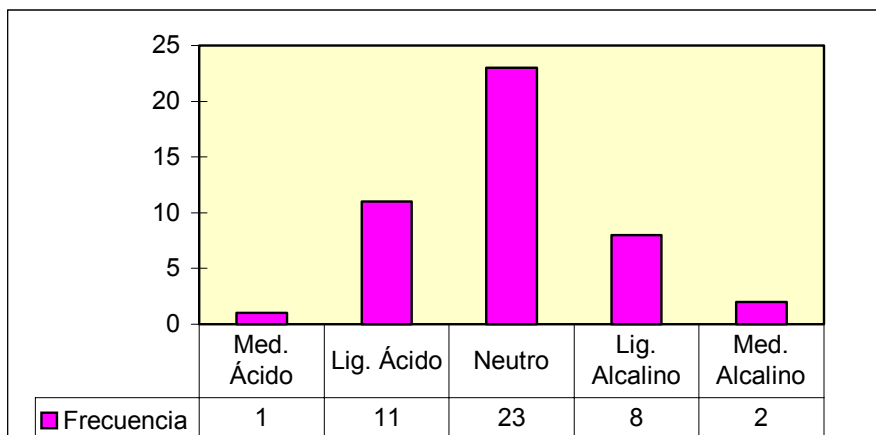


Figura 9
Histograma pH

Análisis de varianza

Tabla 19
Análisis de varianza de pH

<i>Origen de las variaciones</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Grados de libertad</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Valor crítico para F</i>
Entre grupos	32.6531	44	0.7421	33.989	1,511672565
Dentro de los grupos	1.9651	90	0.0218		
Total	34.6182	134			

ANEXO E. Distribución del gradiente de densidad



Foto 13

Duplicado de columnas realizadas con bromoformo-etanol

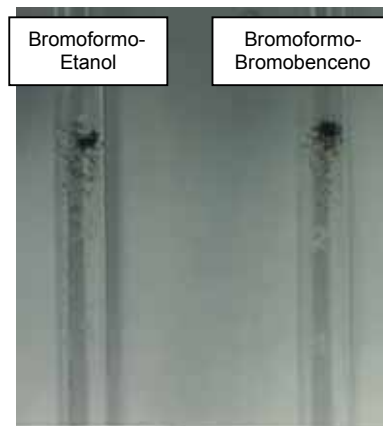
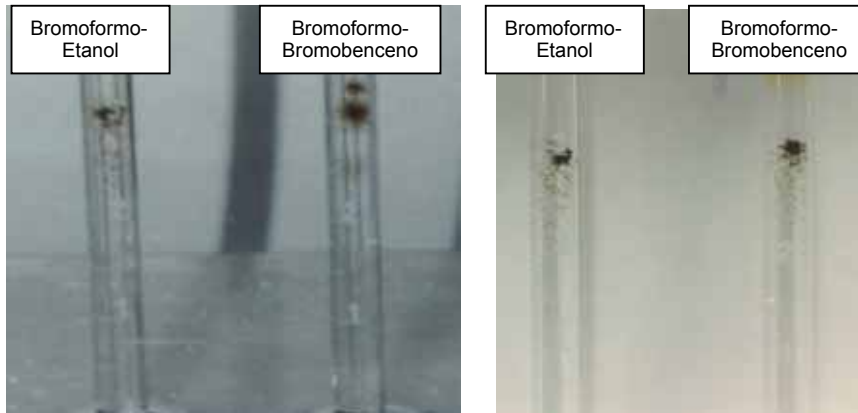


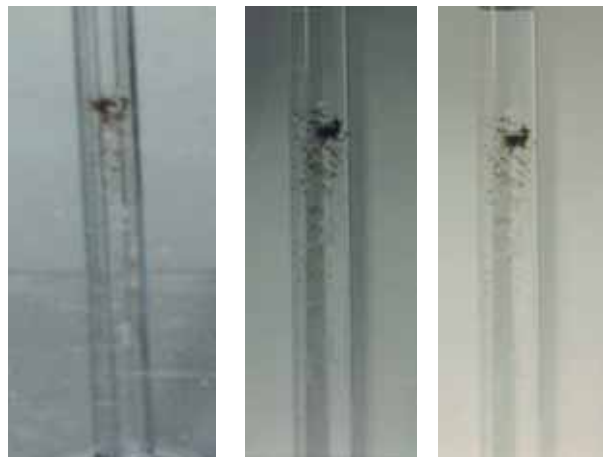
Foto 14

Distribución de las partículas de suelo en columnas de Bromoformo-etanol y bromoformo-bromobenceno



Fotos 15 y 16

Distribución de las partículas de suelo en columnas de Bromoformo-etanol y bromoformo-bromobenceno después de 1 y 3 horas de reposo



Fotos 17, 18 y 19

Distribución de las partículas de suelo en columnas de Bromoformo-etanol después de 1,3 y 8 horas de reposo

Tabla 20

Densidad relativa de las partículas después de 1 y 3 horas de reposo con 10 y 5 mg de muestra

Fracción No. Muestra	1, 5		1, 7		1, 9		2, 1		2, 3		2, 5		2, 7		2, 8 9																	
	1H	3h	1h	3h	1h	3h	1h	3h	1h	3h	1H	3h	1h	3h	1h	3h																
A1 (10 mg)	0	0	0	0	1	1	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2	3	3	3	3	3	3	3	3	2	2	2	2	1	1	2	2
A1 (5 mg)	0	0	0	0	1	1	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2	3	3	3	3	3	3	3	3	2	2	2	2	1	1	2	2

Tabla 21
Densidad relativa de las partículas después de 1 y 3 horas de reposo. Ensayos iniciales

Densidad No. Muestra	1, 5			1, 7			1, 9			2, 1			2, 3			2, 5			2, 7			2, 8 9										
	1 h	3 h	3 h	1 h	3 h	3 h	1 h	3 h	3 h	1 h	3 h	3 h	1 h	3 h	3 h	1 h	3 h	3 h	1 h	3 h	3 h	1 h	3 h	3 h								
A1	0	0	0	0	1	1	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2	3	3	3	3	3	3	3	3	2	2	2	2	1	1	2	2
A2	1	1	1	1	1	1	1	1	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	2	2	2	2	1	1	1	1	1	1	1	1
A3	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	3	3	3	3	3	3	3	3	2	2	3	3	2	2	2	2	1	1	1	1
A4	1	1	1	1	2	2	2	2	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	2	2	1	1	1	1	1	1	
A5	1	1	1	1	2	2	2	2	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	1	1	1	1	2	2	2	2	
A6	1	1	1	1	1	1	1	1	2	2	2	2	2	2	2	3	3	3	3	3	3	3	3	2	2	2	2	1	1	1	1	
A7	0	0	0	0	0	0	0	0	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	2	2	2	2	2	2	2	2	2	
A8	1	1	0	0	1	1	1	1	2	2	2	2	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	2	2	2	2	
A9	1	1	0	0	1	1	1	1	2	2	1	1	2	2	2	2	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	
A10	1	1	1	1	1	1	1	1	3	3	3	3	3	3	3	3	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	
A11	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	2	2	2	2	2	2	3	3	3	3	3	3	3	1	1	1	1	
A12	0	0	0	0	1	1	1	1	2	2	2	2	3	3	3	3	2	2	2	2	3	3	3	3	2	2	2	2	2	2	2	
B13	1	1	1	1	2	2	2	2	3	3	3	3	3	3	3	2	2	3	3	3	3	3	3	2	2	2	2	2	2	2	2	
B14	1	1	1	1	2	2	2	2	3	3	3	3	3	3	3	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	
B15	0	0	0	0	1	1	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	3	3	2	2	3	3	3	3	2	2	2	2	

Tabla 22
Densidad relativa de las partículas, variando la densidad de las fracciones, después de 1 y 3 horas de reposo

Densidad No. Muestra	1, 5			1, 7			1, 9			2, 0			2, 2			2, 3			2, 4			2, 5			2, 7			2, 8 9												
	1 h	3 h	3 h	1 h	3 h	3 h	1 h	3 h	3 h	1 h	3 h	3 h	1 h	3 h	3 h	1 h	3 h	3 h	1 h	3 h	3 h	1 h	3 h	3 h	1 h	3 h	3 h	1 h	3 h	3 h										
E48	1	1	1	1	2	2	2	2	3	3	3	3	3	3	3	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	0	1	1	1	1	1	1	1				
E49	1	1	1	1	2	2	2	2	3	3	3	3	3	3	3	3	2	2	2	2	3	3	3	3	3	3	3	2	2	2	2	1	1	1	1					
E50	1	1	0	0	1	1	1	1	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	2	2	2	2	2	2	2	2	2						
E51	1	1	1	1	2	2	2	2	1	1	2	1	1	1	1	1	1	1	1	2	2	1	1	2	2	2	2	3	3	2	2	3	3	3	3	2	2	2	2	
E52	1	1	1	1	3	3	2	2	2	2	2	2	1	1	1	1	2	2	2	2	2	2	1	1	2	2	2	2	3	3	3	3	2	2	2	2	2	2		
E53	0	0	0	0	1	1	1	1	3	3	3	3	2	2	2	2	3	3	3	3	3	3	3	2	2	2	2	2	2	2	2	2	3	3	3	3	1	1	1	1
E54	1	1	1	1	2	2	2	2	3	3	3	3	2	2	2	2	3	3	2	2	3	3	2	2	3	3	2	2	2	2	3	3	2	2	2	2	2	2		

Tabla 23
Densidad relativa de las partículas, aumentando el número de fracciones, después de 1 y 3 horas de reposo

Densid No. Mtra.	1, 5			1, 7			1, 9			2, 0			2, 1			2, 2			2, 3			2, 4			2, 5			2, 7			2, 8 9												
	1 h	3 h	3 h	1 h	3 h	3 h	1 h	3 h	3 h	1 h	3 h	3 h	1 h	3 h	3 h	1 h	3 h	3 h	1 h	3 h	3 h	1 h	3 h	3 h	1 h	3 h	3 h	1 h	3 h	3 h	1 h	3 h	3 h										
E55	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	2	2	2	3	3	3	3	2	2	2	2	2	2	2	2				
E56	1	1	0	0	1	1	1	1	2	2	2	2	2	2	3	3	3	3	3	3	2	2	2	2	2	2	2	3	3	3	3	1	2	1	1	1	1	1	1				
F57	1	1	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	3	3	3	3	3	3	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	1	1	1	1	1	1	1	1				
F59	1	1	1	1	1	1	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	3	3	3	3	3	3	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	1	1	1	1		
F61	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	2	2	2	2	3	3	3	3	3	3	3	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	1	1	1	1	2	2	2	2
F63	1	1	0	0	1	1	1	1	2	2	2	2	3	3	3	3	3	3	3	3	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	1	1	1	1	1	1	1	

Tabla 24
Densidad media de las partículas

Número de Muestra	Densidad media
A1	2,3850
A2	2,3419
A3	2,3524
A4	2,2363
A5	2,3574
A6	2,4253
A7	2,3419
A8	2,3953
A9	2,5139
A10	2,3562
A11	2,4521
A12	2,4495
B13	2,3565
B14	2,3290
B15	2,4605
C16	2,3278
C18	2,3100
C20	2,3388
C22	2,3278
C24	2,4109
C26	2,3418
D28	2,2213
D30	2,4050
D32	2,3717
D34	2,3433
D35	2,3278
D37	2,2206
D39	2,3419
D40	2,2338
E43	2,2317
E45	2,3455
E47	2,2842
E48	2,2550
E49	2,2852
E50	2,3745
E51	2,4118
E52	2,3342
E53	2,3795
E54	2,3180
E55	2,4253
E56	2,3675
F57	2,2594
F59	2,3150
F61	2,4087
F63	2,3433

ANEXO F. Análisis de textura del suelo

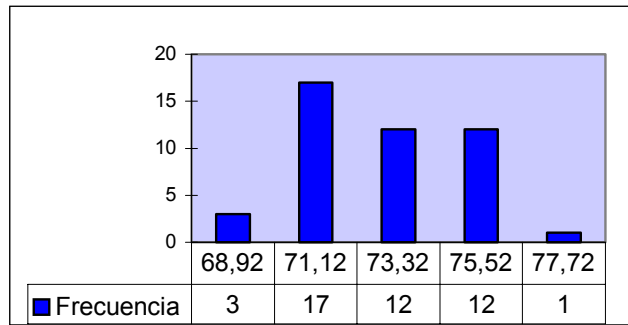


Figura 10
Histograma Arena

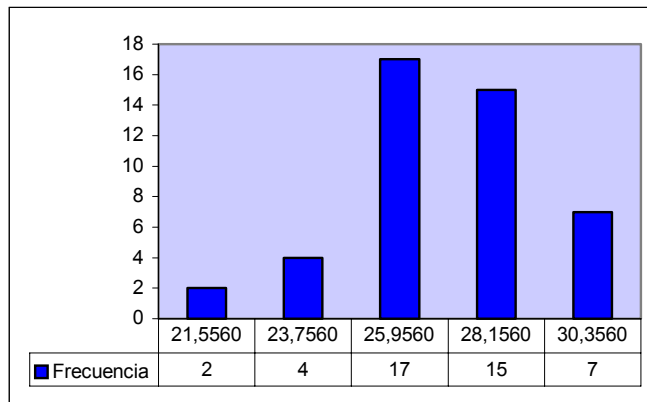


Figura 11
Histograma Arcilla

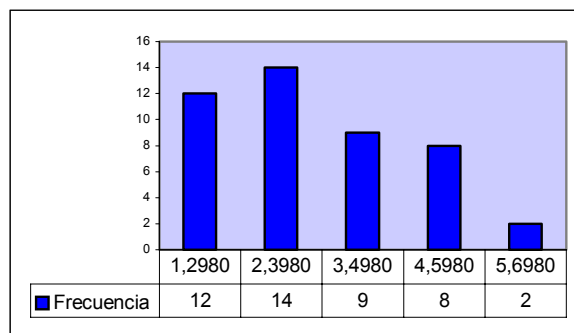


Figura No. 11
Histograma Limo

Tabla 25

Porcentajes del tamaño de partícula en triplicados de suelo determinados por el método de la pipeta

Tamaño partícula Muestra	I			II			III		
	%Arena	%Arcilla	%Limo	%Arena	%Arcilla	%Limo	%Arena	%Arcilla	%Limo
A-1	71,3125	25,5129	3,1746	71,6530	24,7684	3,5785	70,6353	28,7718	0,5929
A-2	72,0187	25,8074	2,1739	72,9371	24,6677	2,3952	68,7455	25,2665	5,9880
A-3	69,0069	27,0090	3,9841	70,7415	26,8633	2,3952	69,2830	26,1170	4,6000
A-4	72,2495	26,9553	0,7952	69,9043	27,7288	2,3669	66,8148	31,7990	1,3861
A-5	68,6709	28,3470	2,9821	71,9950	25,8138	2,1912	72,1387	26,8633	0,9980
A-6	70,6006	25,4154	3,9841	72,9534	24,4723	2,5743	73,3894	23,4233	3,1873
A-7	68,3463	29,6577	1,9960	68,8830	28,9170	2,2000	71,4830	26,3170	2,2000
A-8	70,1427	29,4581	0,3992	70,2614	28,9434	0,7952	69,5267	28,0923	2,3810
A-9	68,6591	30,3528	0,9881	69,0830	25,7170	5,2000	67,2141	27,4074	5,3785
A-10	68,4721	29,3410	2,1869	70,4377	26,2026	3,3597	71,0306	26,7955	2,1739
A-11	65,2912	30,3350	4,3738	66,2852	31,5279	2,1869	68,5970	27,8387	3,5644
A-12	71,0306	24,8192	4,1502	71,0830	24,5170	4,4000	70,4377	28,3765	1,1858
B-13	73,0830	26,5170	0,4000	71,9633	26,6505	1,3861	71,1407	28,2605	0,5988
B-14	73,9950	23,8311	2,1739	71,7395	27,6617	0,5988	73,6411	26,1601	0,1988
B-15	70,2614	25,7625	3,9761	68,2101	27,8058	3,9841	70,6830	24,9170	4,4000
C-16	69,7435	28,0609	2,1956	68,3463	28,6597	2,9940	69,0543	29,5623	1,3834
C-18	69,5267	27,8939	2,5794	69,4662	29,7386	0,7952	69,3443	28,4601	2,1956
C-20	70,1220	27,4971	2,3810	71,5673	28,2347	0,1980	68,7455	28,2605	2,9940
C-22	67,1487	25,6657	7,1856	72,2495	25,7625	1,9881	65,6205	27,8058	6,5737
C-24	72,4830	23,7170	3,8000	74,6855	24,1240	1,1905	73,7974	23,2382	2,9644
C-26	73,3495	24,6703	1,9802	74,0902	23,9256	1,9841	73,9870	24,0210	1,9920
D-28	71,2554	23,9732	4,7714	73,0830	24,3170	2,6000	71,7395	26,8633	1,3972
D-30	74,6855	22,9336	2,3810	73,9870	25,0170	0,9960	74,9331	23,0709	1,9960
D-32	75,8830	22,9170	1,2000	72,9910	25,8138	1,1952	73,1367	26,2645	0,5988
D-34	74,7838	20,8337	4,3825	70,0029	26,2122	3,7849	74,7356	22,0961	3,1683
D-35	75,2785	24,3278	0,3937	74,3448	25,4588	0,1965	76,0744	23,7272	0,1984
D-37	75,9637	23,2520	0,7843	73,2966	26,1082	0,5952	72,7918	26,4114	0,7968
D-39	73,3894	25,6146	0,9960	73,8918	24,7193	1,3889	74,3343	24,8673	0,7984
D-40	75,6292	24,1720	0,1988	72,3383	24,2685	3,3932	74,9331	24,2685	0,7984
E-43	72,5379	27,0629	0,3992	74,7998	23,5397	1,6605	75,8556	23,9506	0,1938
E-45	70,9478	26,0994	2,9528	70,4602	26,5577	2,9821	71,4822	26,1509	2,3669
E-47	69,2674	28,1482	2,5845	71,5383	25,9026	2,5591	71,7352	26,0994	2,1654
E-48	72,1061	27,4971	0,3968	71,3693	28,4327	0,1980	72,1837	26,6376	1,1788
E-49	74,3903	25,2145	0,3953	74,2830	24,9170	0,8000	71,9950	27,4074	0,5976
E-50	68,3463	26,8633	4,7904	69,1447	27,4621	3,3932	72,5926	24,8178	2,5896
E-51	71,4542	25,3649	3,1809	71,9950	25,2162	2,7888	75,1822	24,4194	0,3984
E-52	70,2614	25,5637	4,1750	69,4053	25,6146	4,9801	72,3934	25,8138	1,7928
E-53	73,1902	25,8138	0,9960	72,9910	25,2162	1,7928	71,8830	26,3170	1,8000
E-54	71,2830	26,7170	2,0000	70,6006	26,6106	2,7888	70,6830	27,3170	2,0000
E-55	72,4830	26,7170	0,8000	74,2375	19,9971	5,7654	72,7013	22,7352	4,5635
E-56	79,0920	20,1159	0,7921	75,6292	22,9792	1,3917	77,2830	20,9170	1,8000
F-57	73,8399	13,8340	12,3260	77,2830	21,3170	1,4000	74,0830	22,9170	3,0000
F-59	68,0745	30,5338	1,3917	69,0685	28,9434	1,9881	70,2022	26,4114	3,3865
F-61	73,6107	25,2128	1,1765	73,2435	26,5577	0,1988	73,6302	25,9690	0,4008
F-63	71,6830	28,1170	0,2000	72,1837	27,6199	0,1965	71,2282	28,5742	0,1976

Análisis de varianza

Tabla 26
Análisis de varianza de la fracción Arena

<i>Origen de las variaciones</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Grados de libertad</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Valor crítico para F</i>
Entre grupos	647.9960	44	14.7272	6.9918	1,511672565
Dentro de los grupos	189.5716	90	2.1064		
Total	837.5676	134			

Tabla 27
Análisis de varianza de la fracción Arcilla

<i>Origen de las variaciones</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Grados de libertad</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Valor crítico para F</i>
Entre grupos	569.7983	44	12.9500	4.9956	1,511672565
Dentro de los grupos	233.3040	90	2.5923		
Total	803.1023	134			

Tabla 28
Análisis de varianza de la fracción Limo

<i>Origen de las variaciones</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Grados de libertad</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Valor crítico para F</i>
Entre grupos	222.6403	44	5.0600	2.3825	1,511672565
Dentro de los grupos	191.1473	90	2.1239		
Total	413.7875	134			

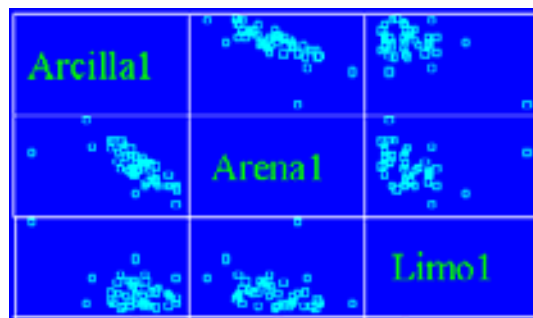


Figura 13
Relación lineal entre las variables Arena, Limo y Arcilla

ANEXO G. Comparación entre los métodos

Tabla 29

Análisis físicos, químicos y mineralógicos de las muestras seleccionadas para comparación de métodos.

Muestra	Notación	Color	Densidad media	Arena	Arcilla	Limo	pH	Composición mineralógica
2	2.5Y 5/3	COC	2,34	71,2338	25,2472	3,5190	8,39	Hallosita
5	2.5Y 5/2	CG	2,36	70,9349	27,0080	2,0571	6,08	Hallosita
7	2.5Y 5/4	COC	2,34	69,5707	28,2973	2,1320	6,51	Hallosita- alófano-cuarzo
16	2.5Y 6/3	CAC	2,33	69,0480	28,7610	2,1910	7,39	Cuarzo- alófano
22	2.5Y 5/2	CG	2,33	68,3395	26,4113	5,2491	7,01	Cuarzo- alófano
30	2.5Y 5/3	COC	2,41	74,5352	23,6738	1,7910	6,78	Hallosita-Gibsita
35	2.5Y 5/3	COC	2,33	75,2325	24,5046	0,2629	7,42	Cuarzo- alófano
37	2.5Y 4/4	CO	2,22	74,0174	25,2572	0,7255	6,58	Hallosita-Gibsita
39	2.5Y 6/4	CAC	2,34	73,8718	25,0671	1,0611	7,07	Cuarzo- alófano
51	5Y 5/2	GO	2,41	72,8771	25,0001	2,1227	7,11	Hallosita-cuarzo
52	5Y 4/2	GO	2,33	70,6867	25,6640	3,6493	6,75	Hallosita- alófano-cuarzo
57	2.5Y 4/2	CGO	2,26	75,0686	19,3560	5,5753	6,80	Caolinita

ANEXO H. Espectros infrarrojos de la fracción arcilla

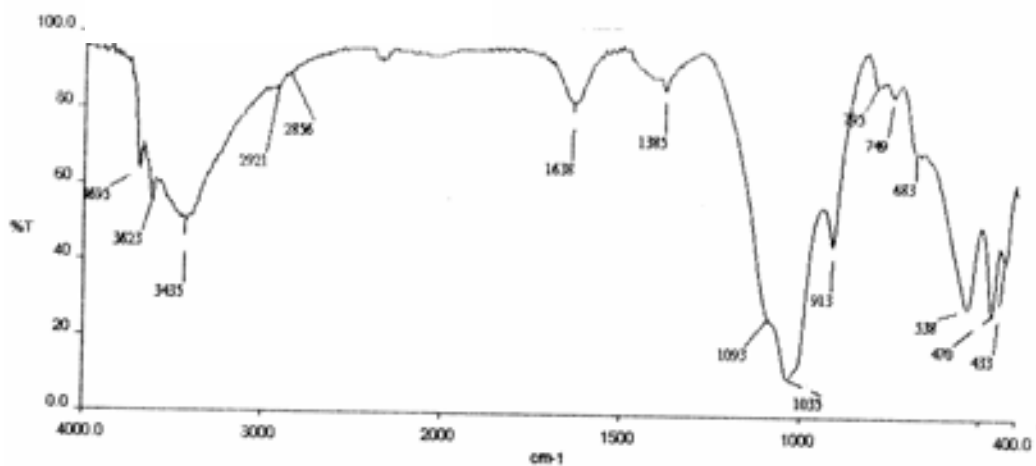


Figura 14
Espectro infrarrojo de la muestra 1

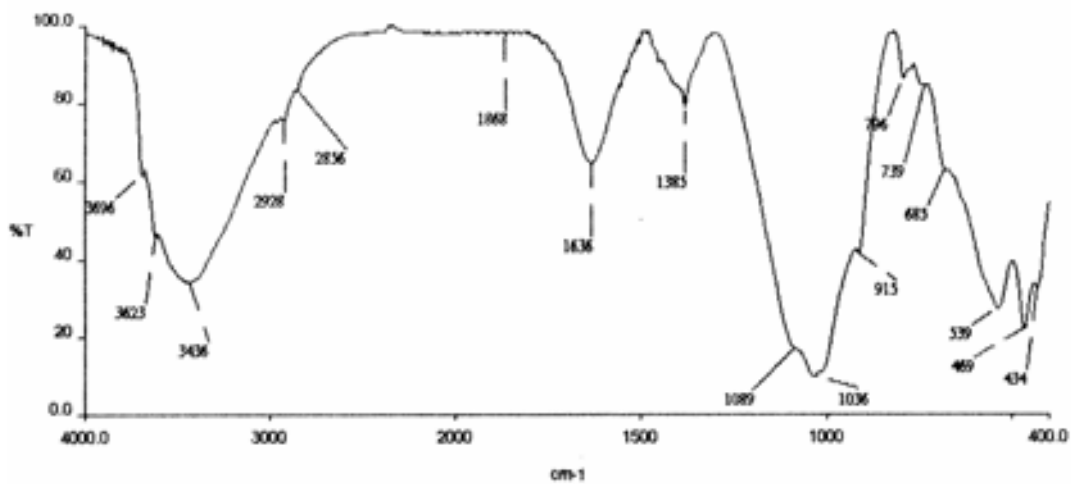


Figura 15
Espectro infrarrojo de la muestra 2

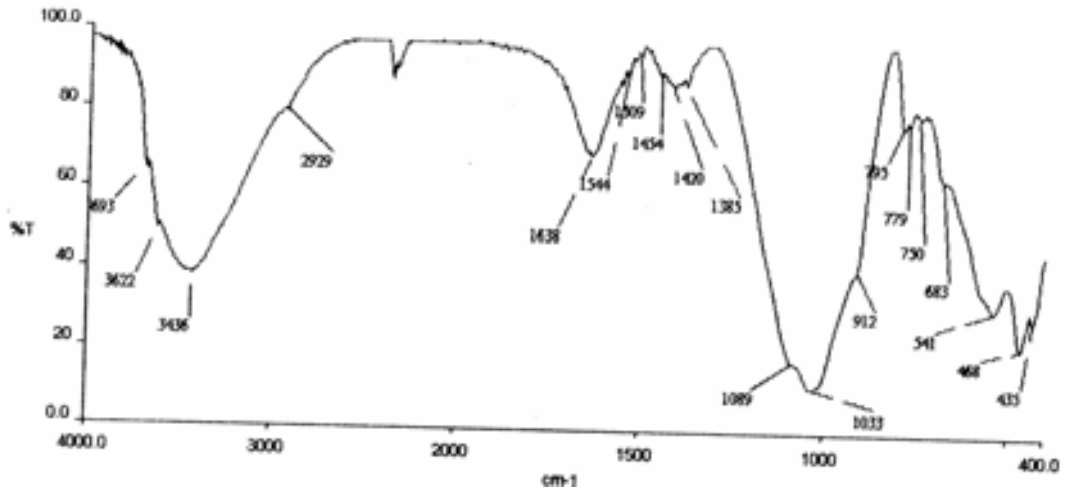


Figura 16
Espectro infrarrojo de la muestra 3

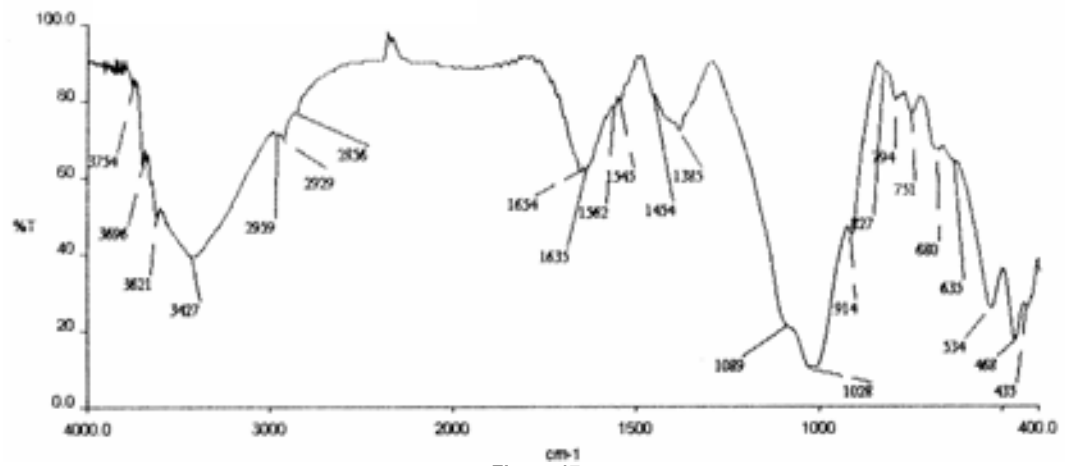


Figura 17
Espectro infrarrojo de la muestra 14

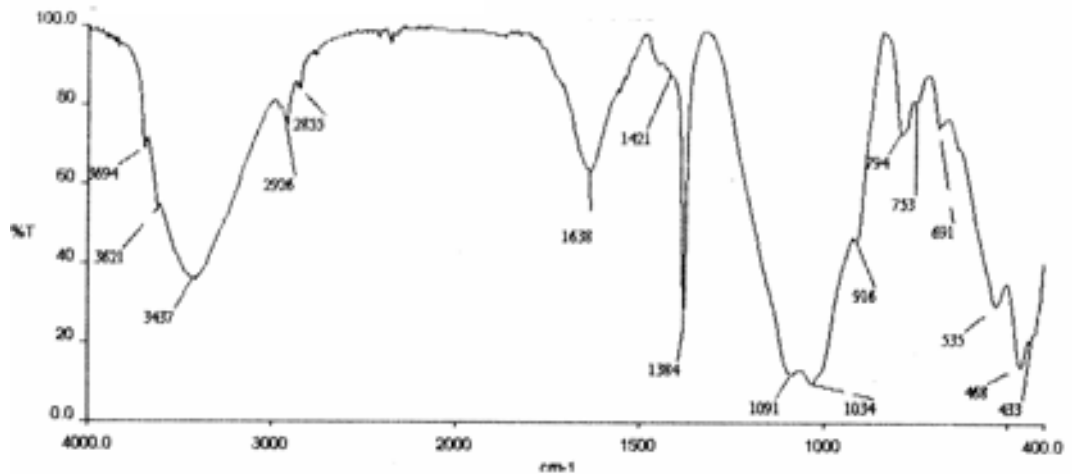


Figura 18
Espectro infrarrojo de la muestra 5

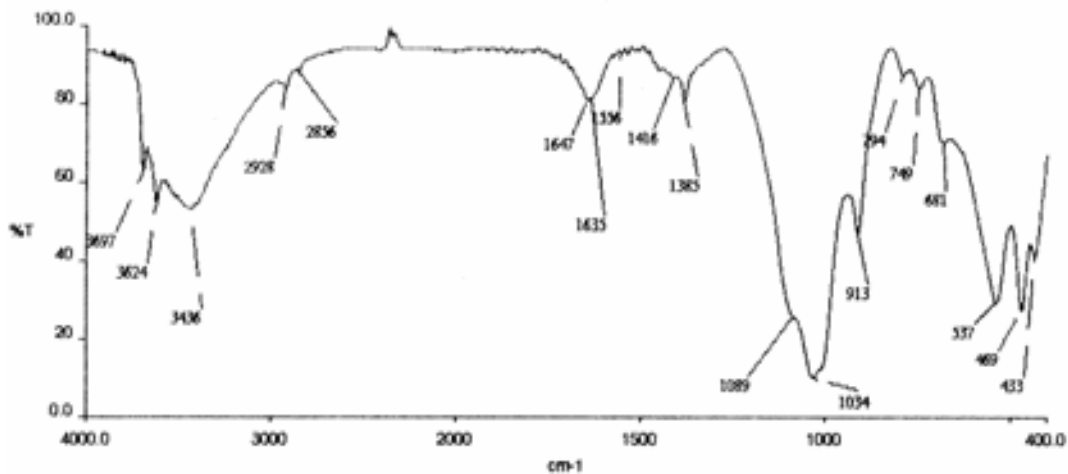


Figura 19
Espectro infrarrojo de la muestra 6

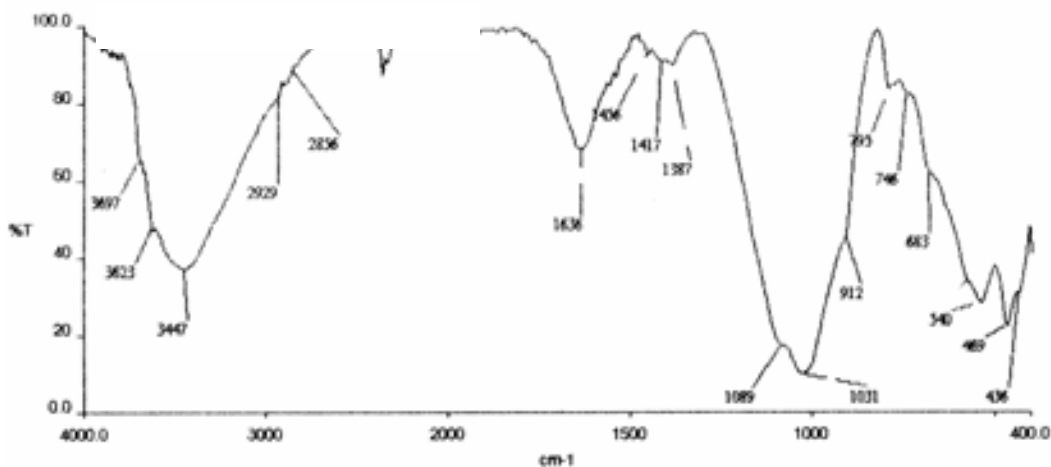


Figura 20
Espectro infrarrojo de la muestra 7

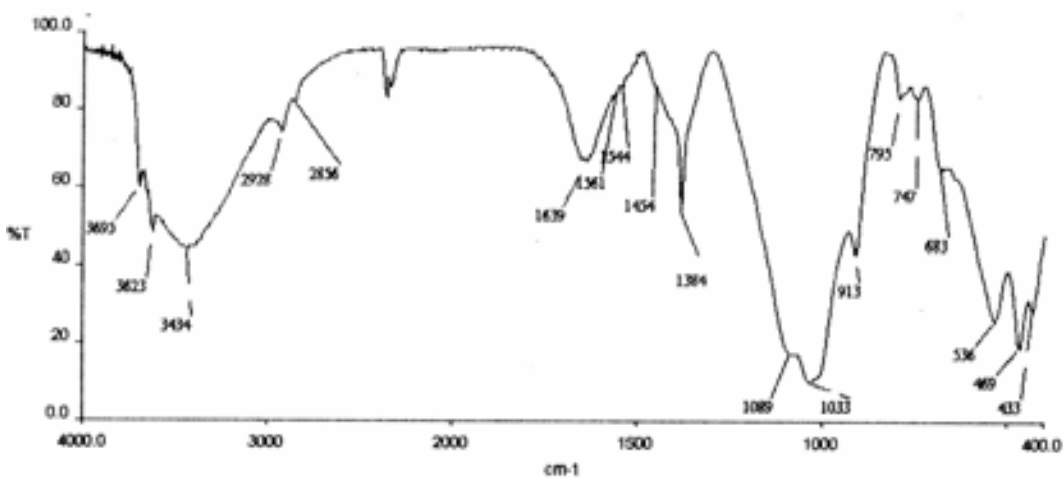


Figura 21
Espectro infrarrojo de la muestra 8

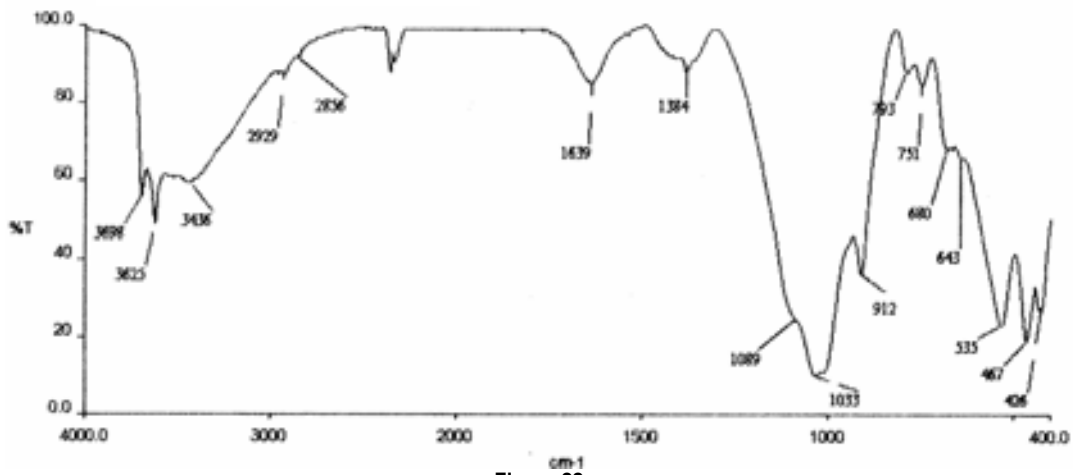


Figura 22
Espectro infrarrojo de la muestra 9

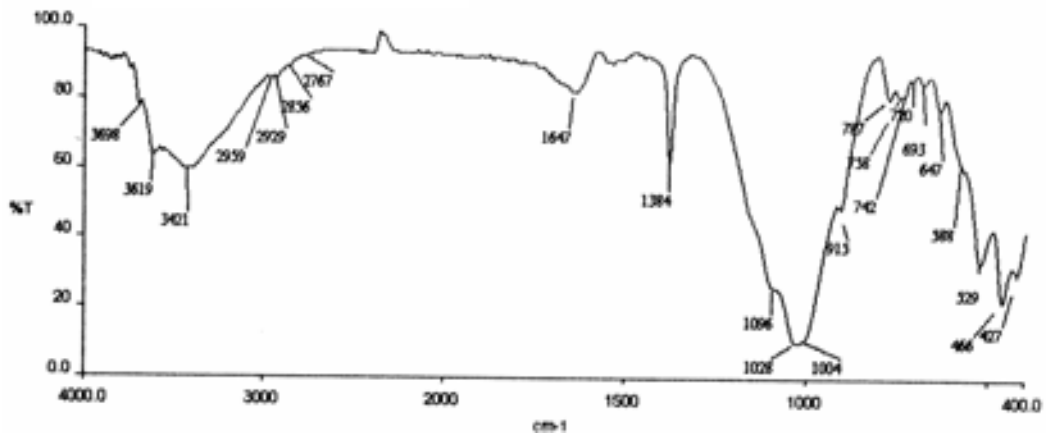


Figura 23
Espectro infrarrojo de la muestra 10

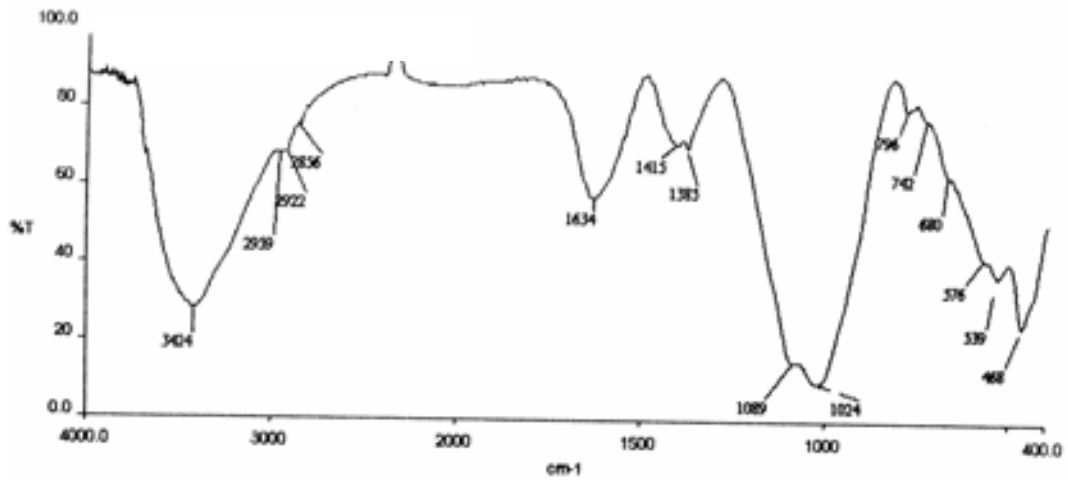


Figura 24
Espectro infrarrojo de la muestra 11

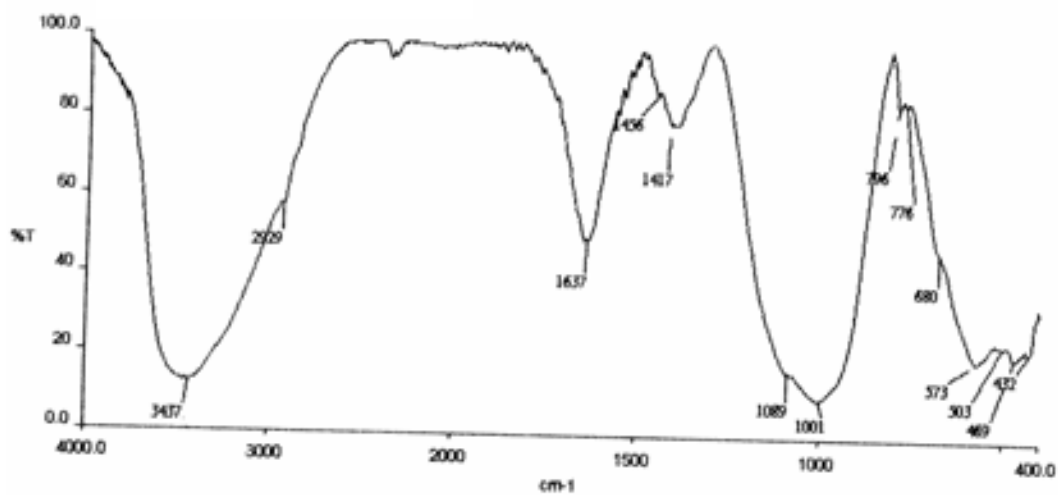


Figura 25
Espectro infrarrojo de la muestra 12

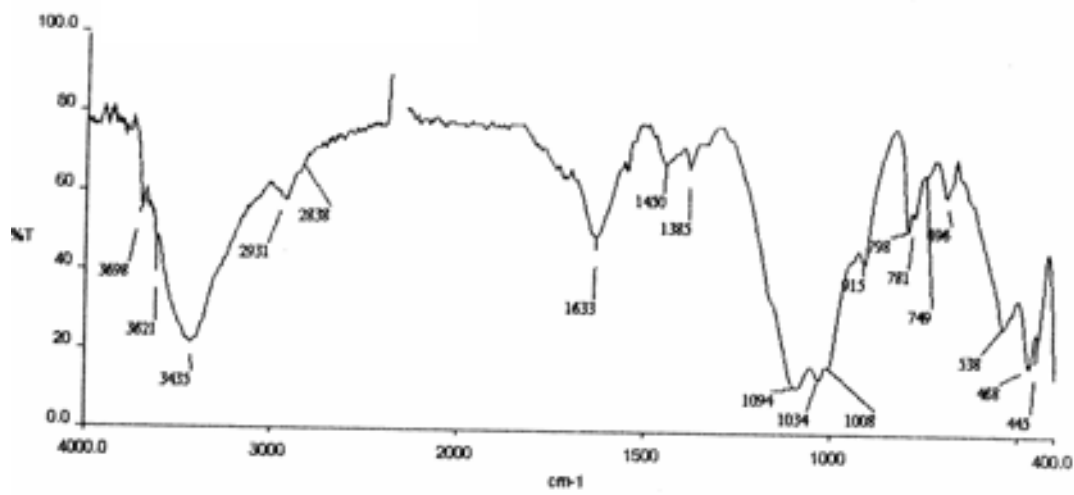


Figura 26
Espectro infrarrojo de la muestra 13

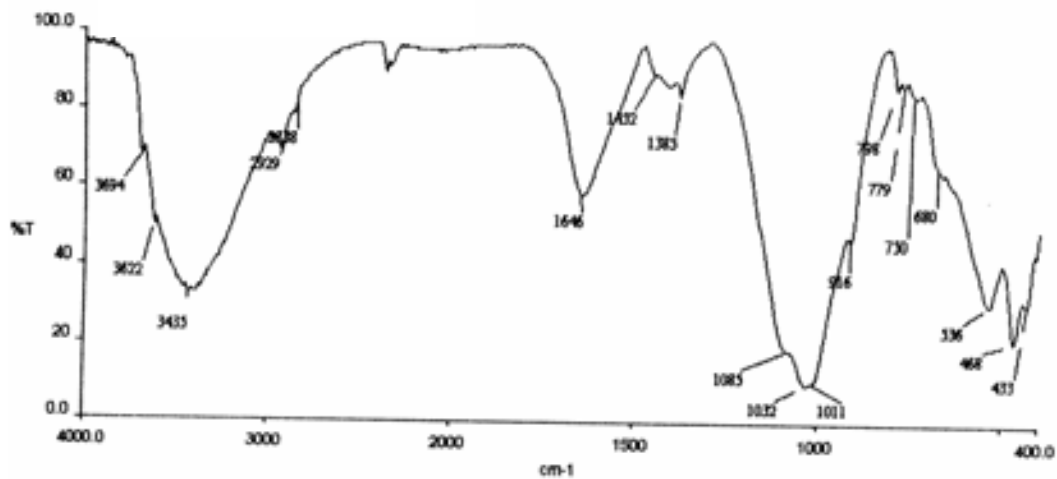


Figura 27
Espectro infrarrojo de la muestra 14

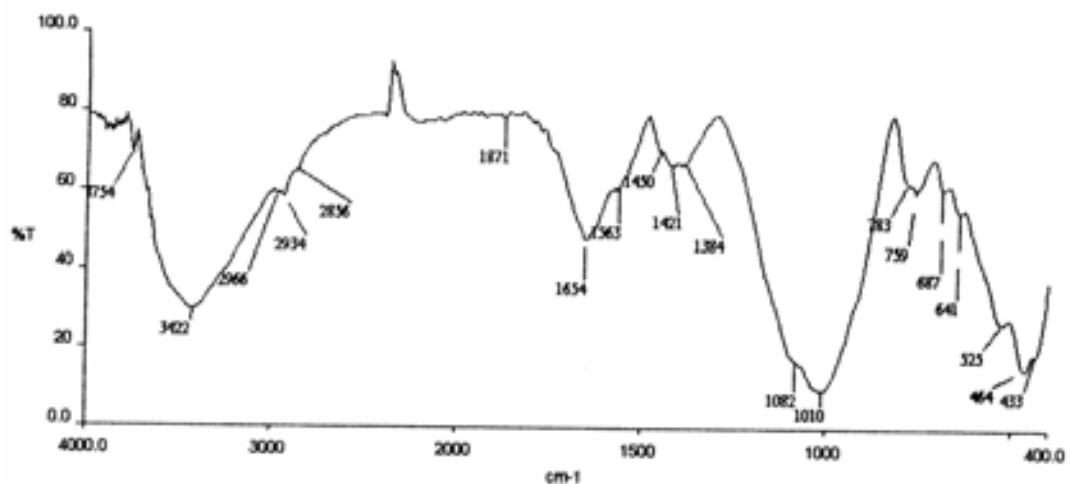


Figura 28
Espectro infrarrojo de la muestra 15

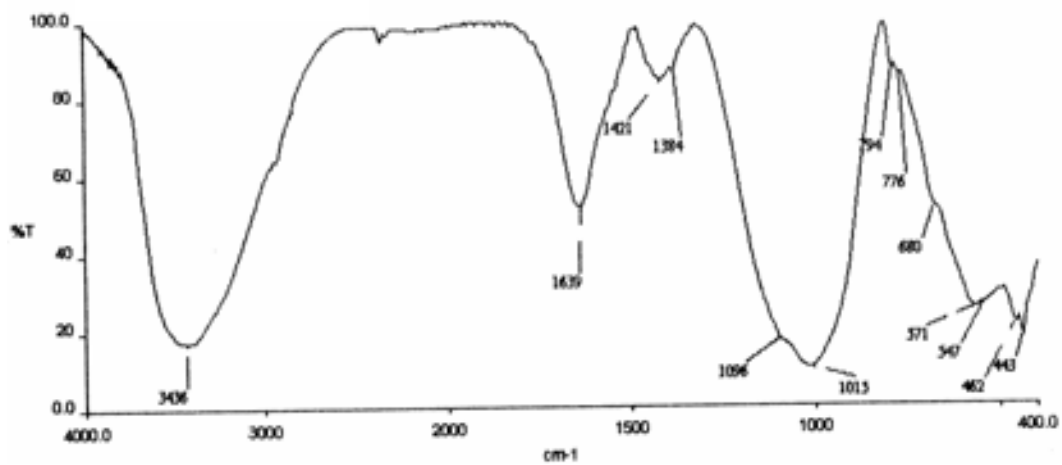


Figura 29
Espectro infrarrojo de la muestra 16

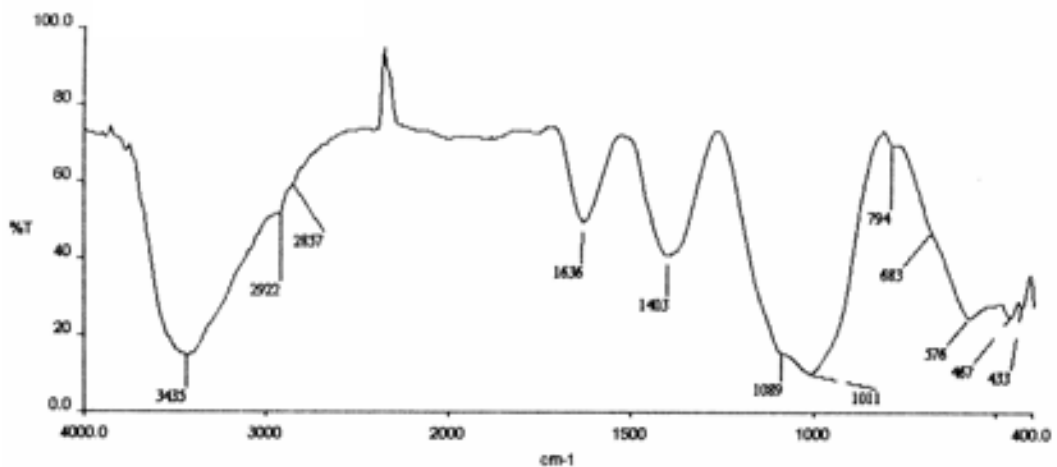


Figura 30
Espectro infrarrojo de la muestra 18

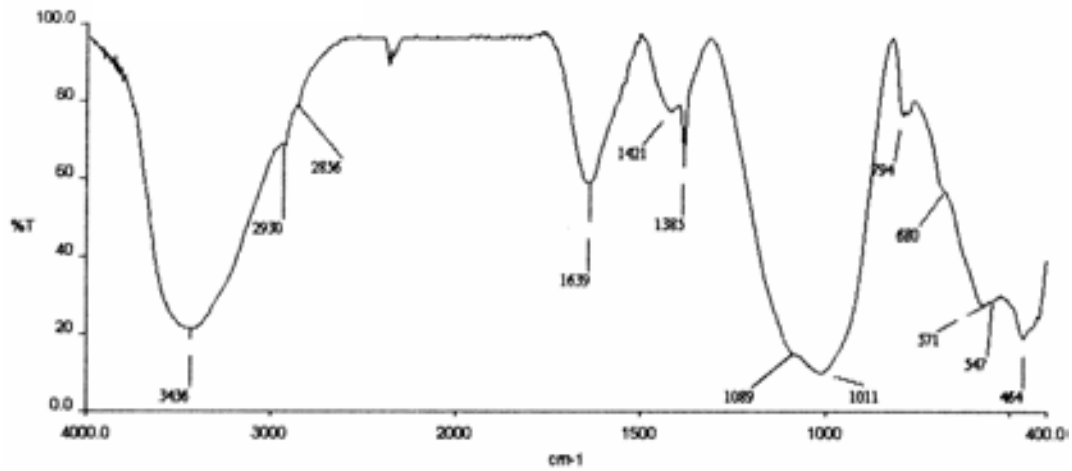


Figura 31
Espectro infrarrojo de la muestra 20

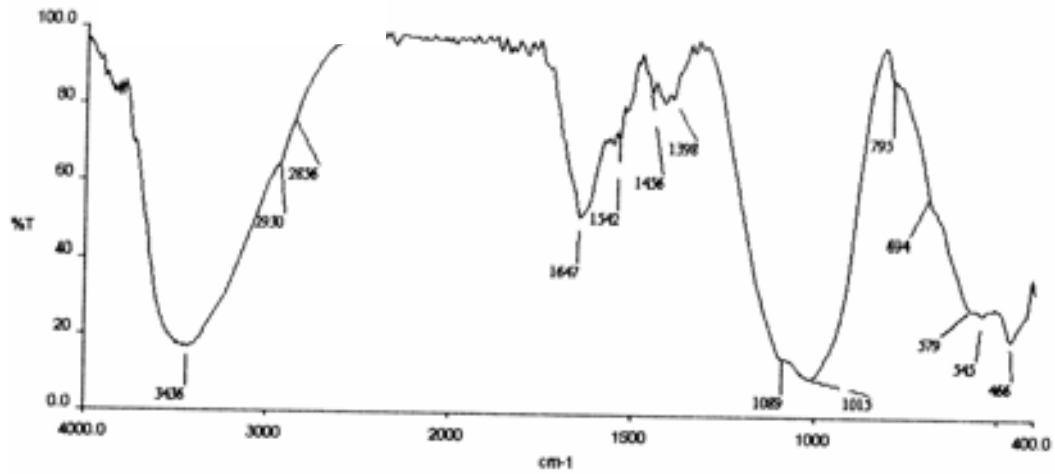


Figura 32
Espectro infrarrojo de la muestra 22

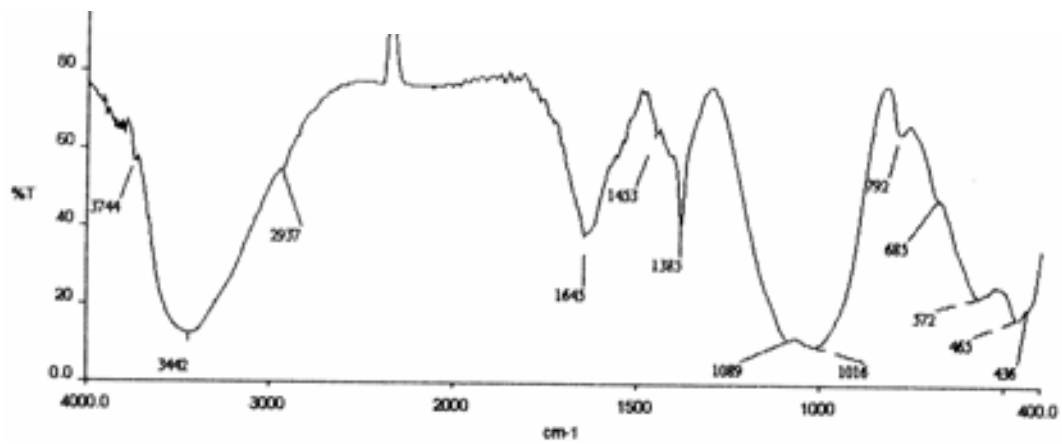


Figura 33
Espectro infrarrojo de la muestra 24

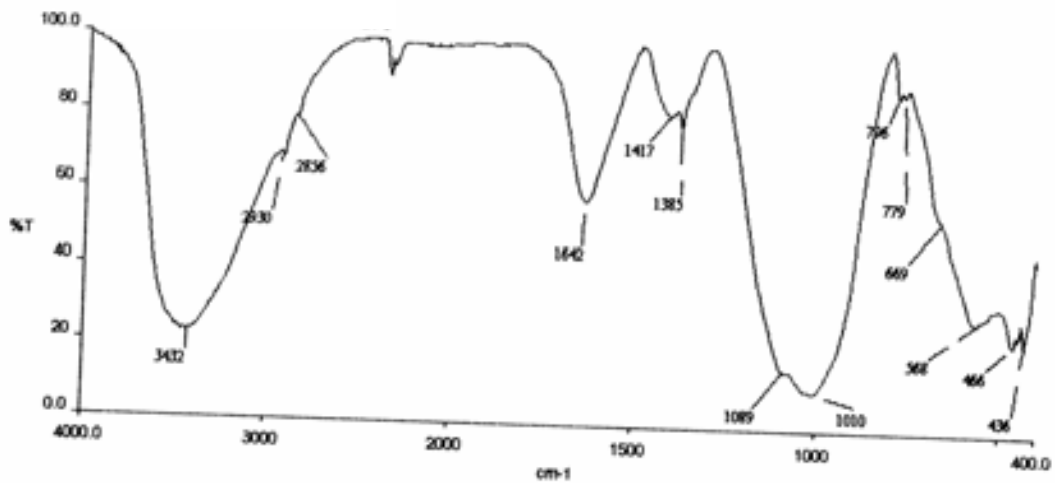


Figura 34
Espectro infrarrojo de la muestra 26

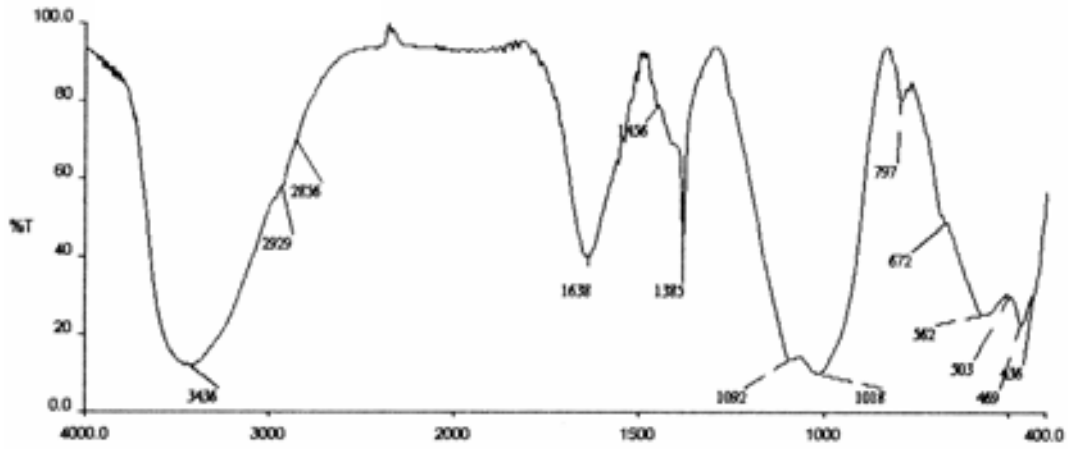


Figura 35
Espectro infrarrojo de la muestra 28

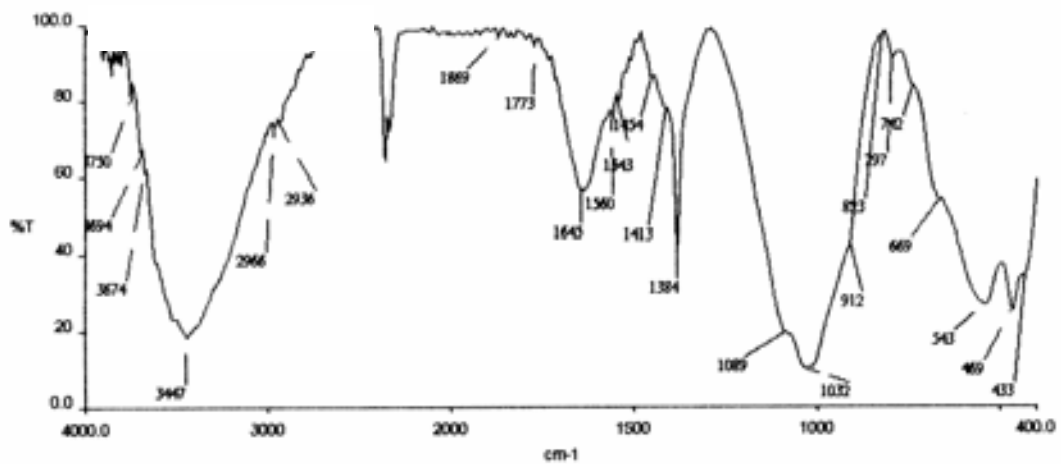


Figura 36
Espectro infrarrojo de la muestra 30

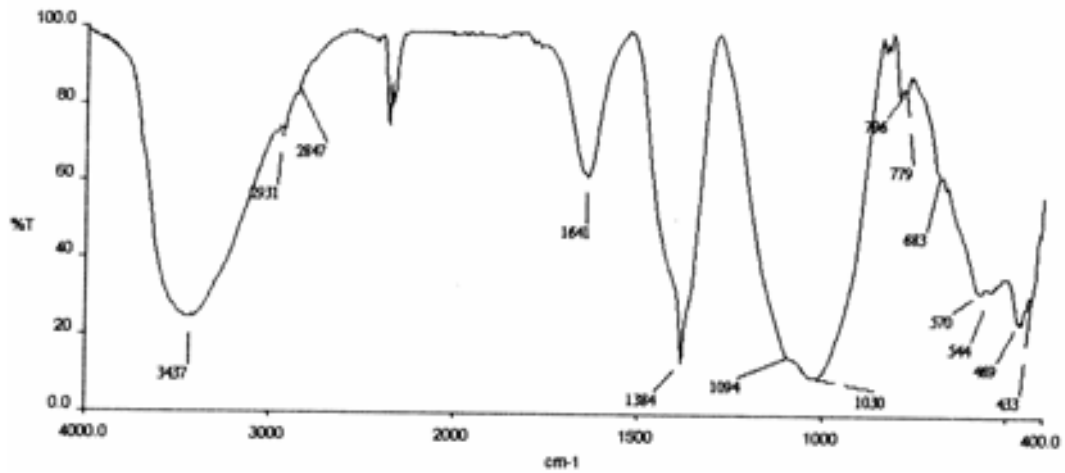


Figura 37
Espectro infrarrojo de la muestra 32

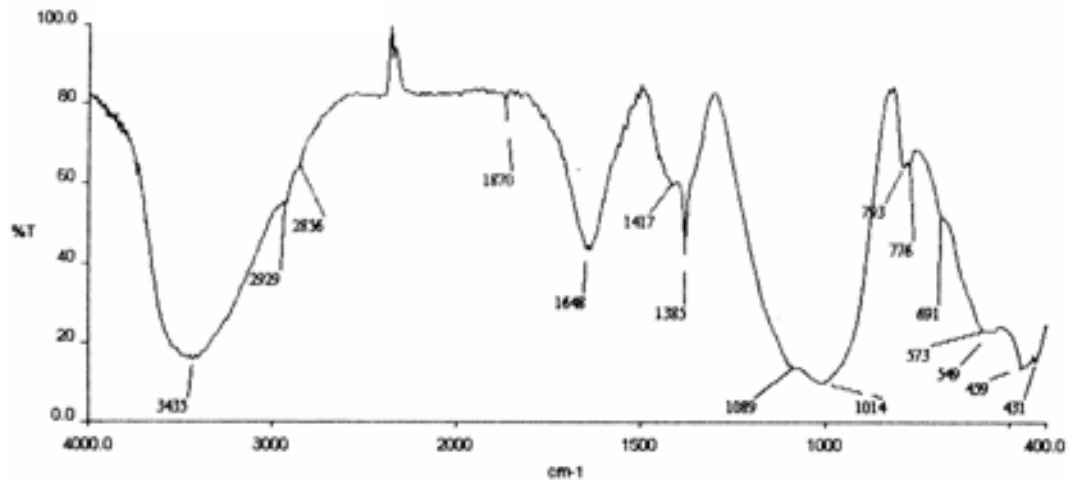


Figura 38
Espectro infrarrojo de la muestra 34

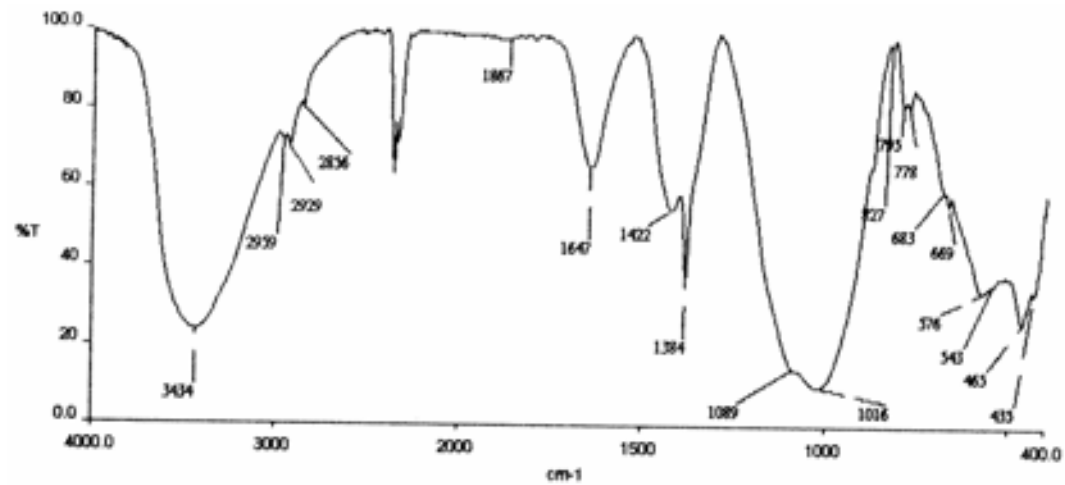


Figura 39
Espectro infrarrojo de la muestra 35

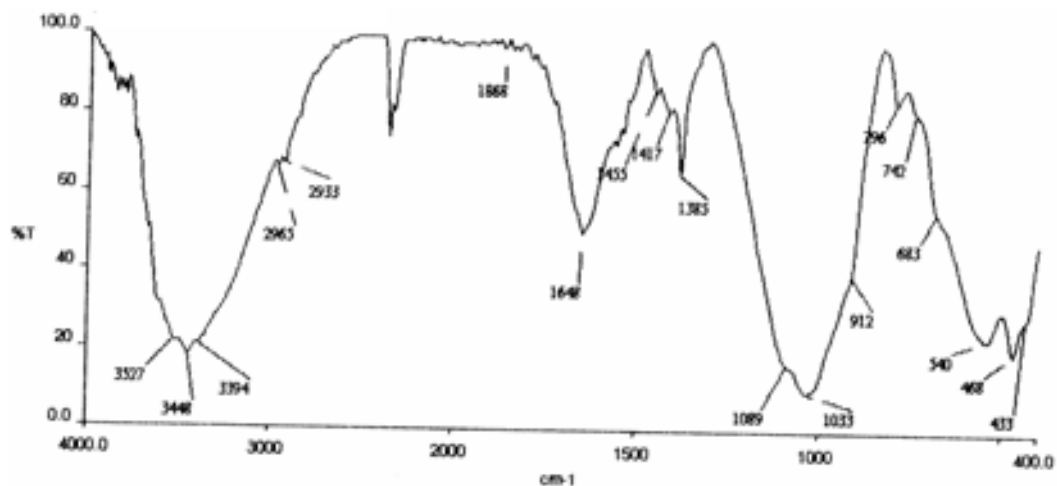


Figura 40
Espectro infrarrojo de la muestra 37

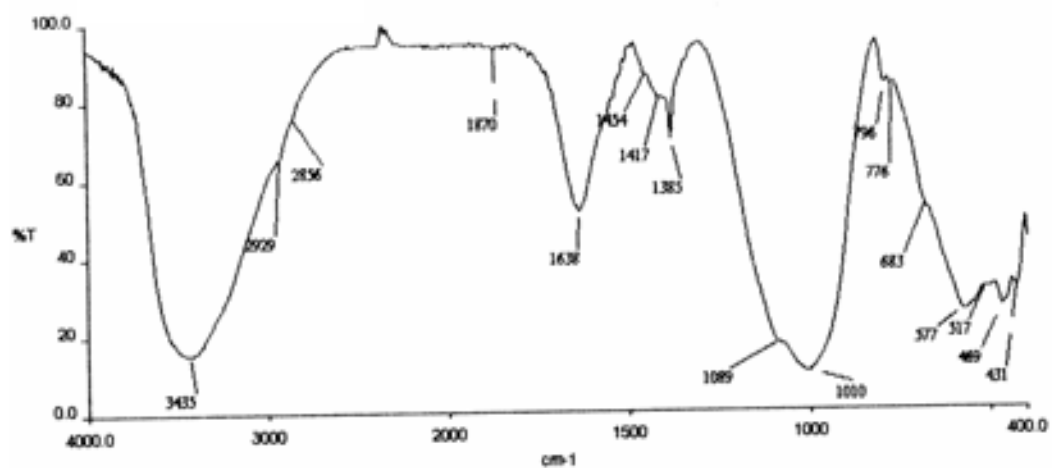


Figura 41
Espectro infrarrojo de la muestra 39

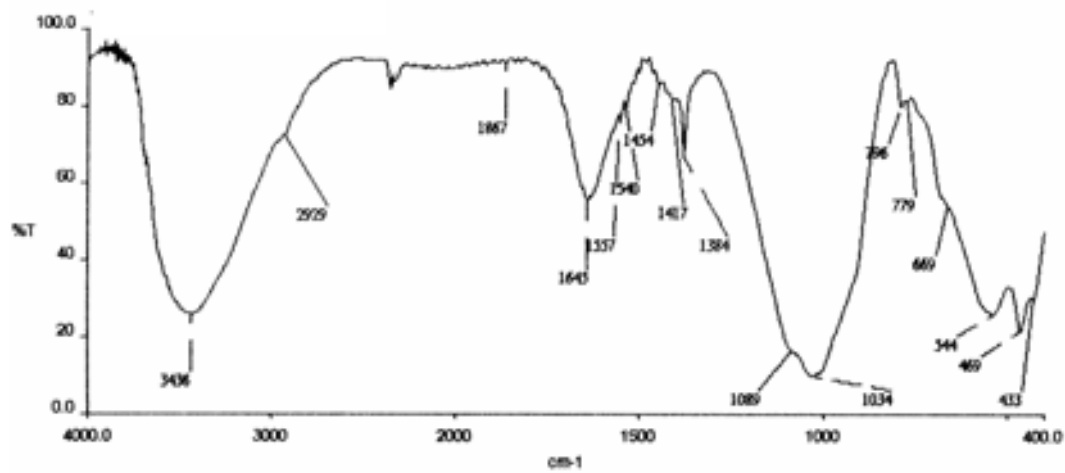


Figura 42
Espectro infrarrojo de la muestra 40

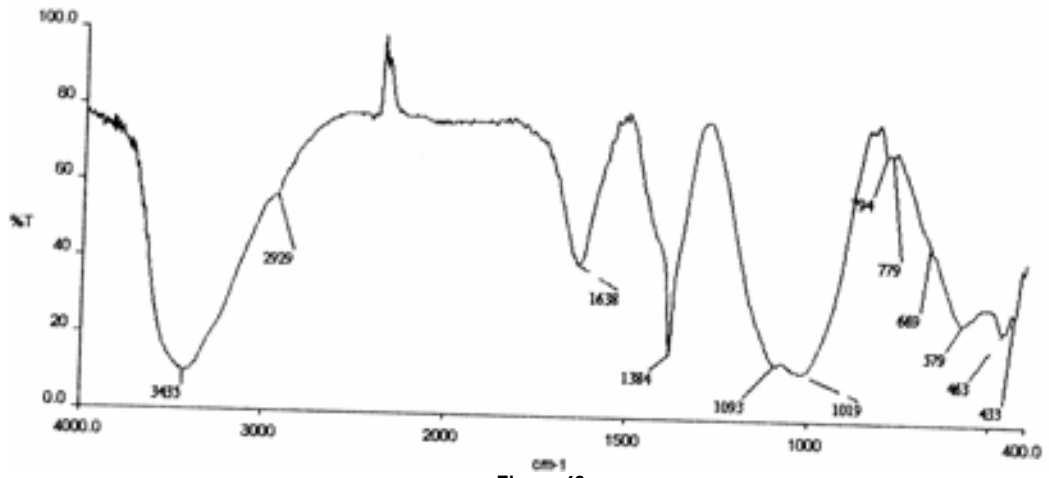


Figura 43
Espectro infrarrojo de la muestra 43

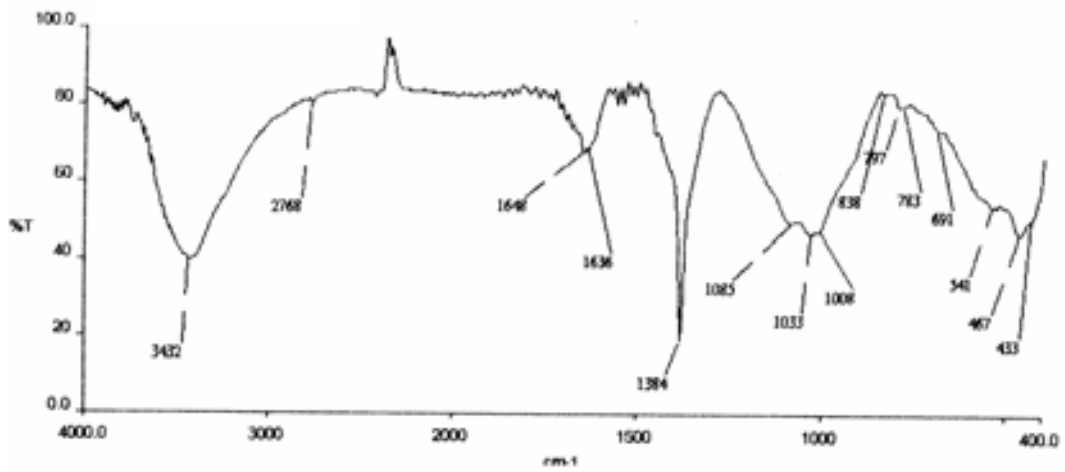


Figura 44
Espectro infrarrojo de la muestra 45

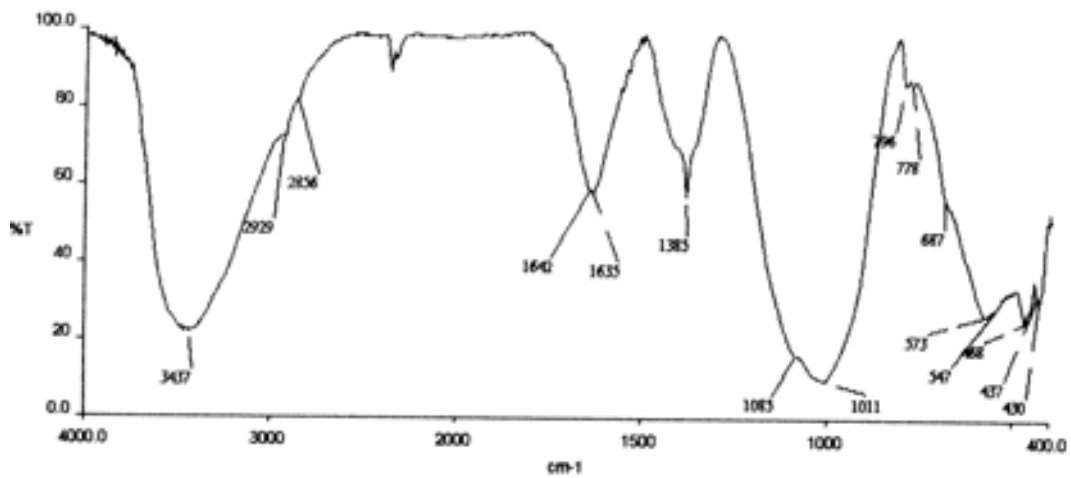


Figura 45
Espectro infrarrojo de la muestra 47

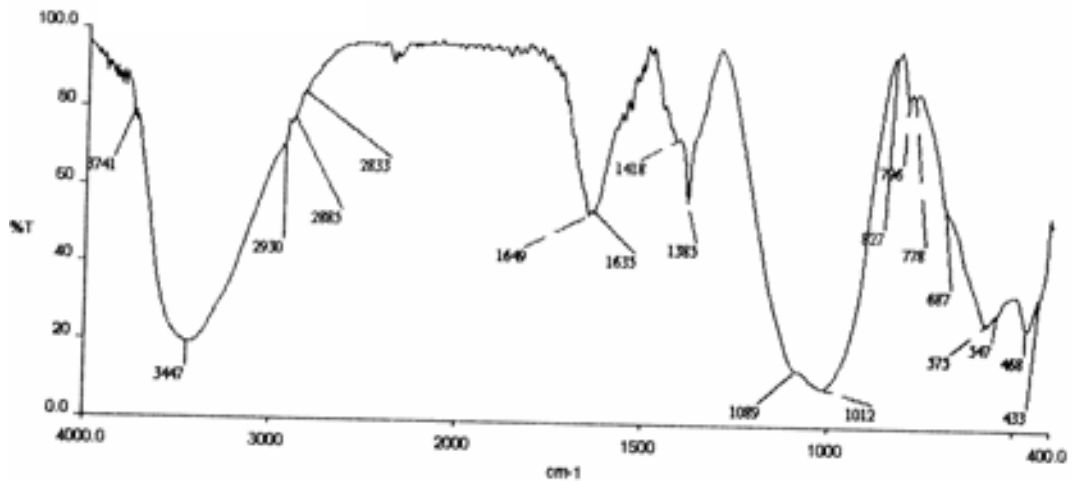


Figura 46
Espectro infrarrojo de la muestra 48

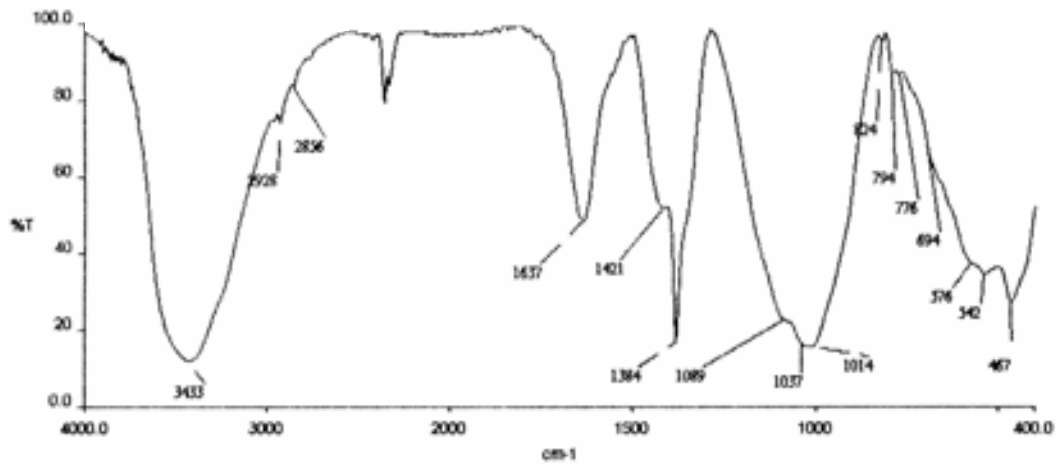


Figura 47
Espectro infrarrojo de la muestra 49

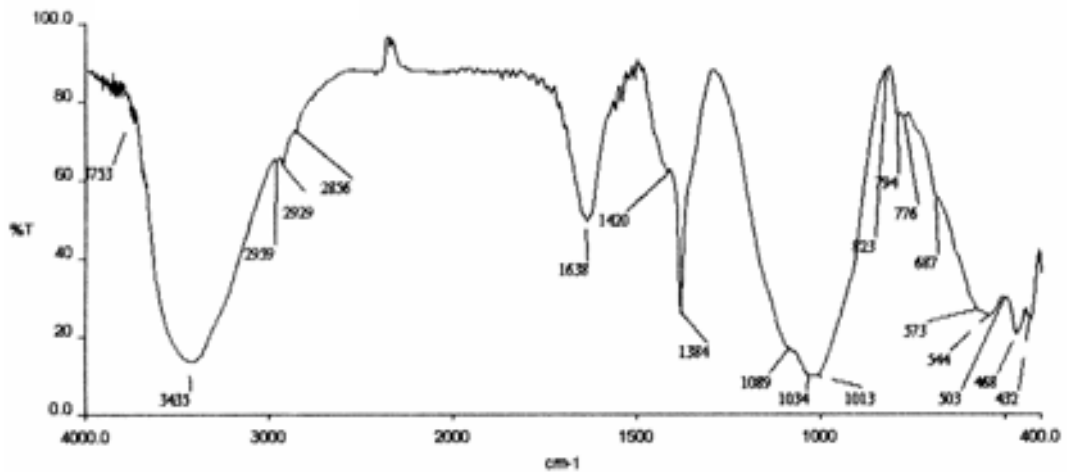


Figura 48
Espectro infrarrojo de la muestra 50

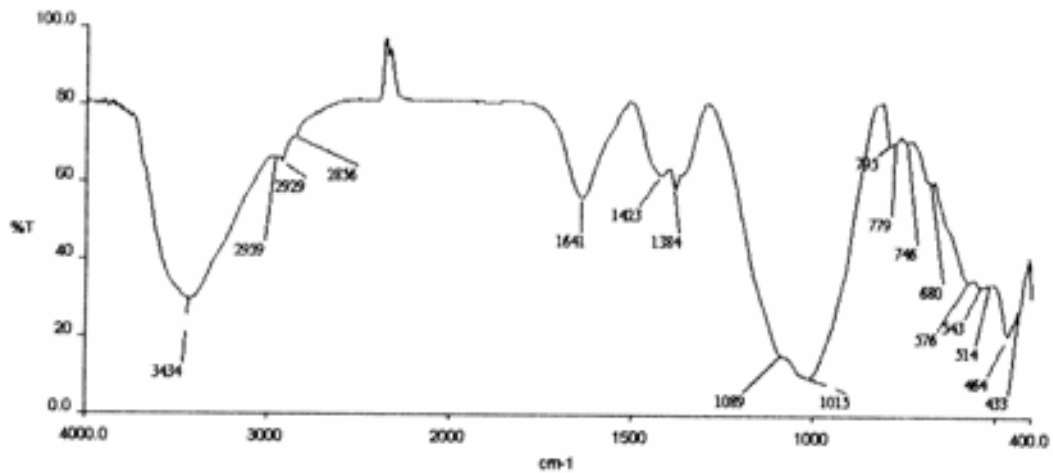


Figura 49
Espectro infrarrojo de la muestra 51

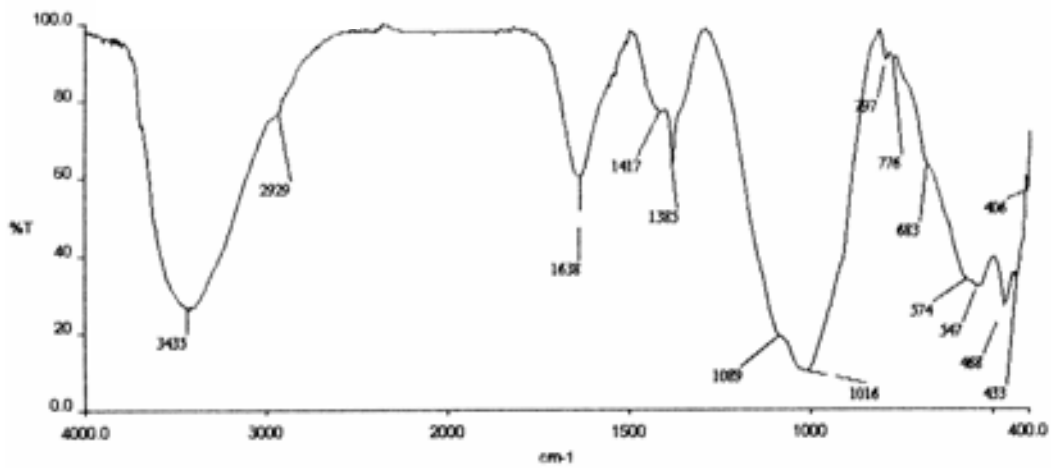


Figura 50
Espectro infrarrojo de la muestra 52

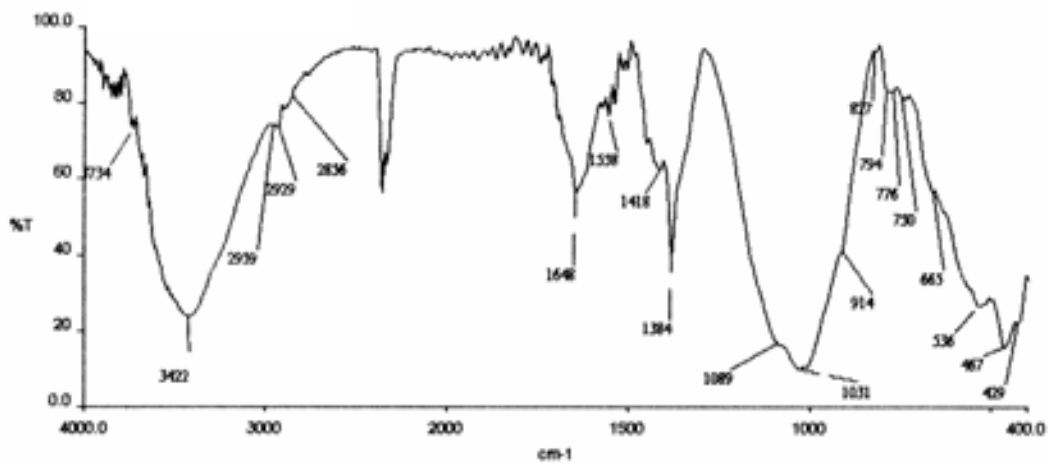


Figura 51
Espectro infrarrojo de la muestra 53

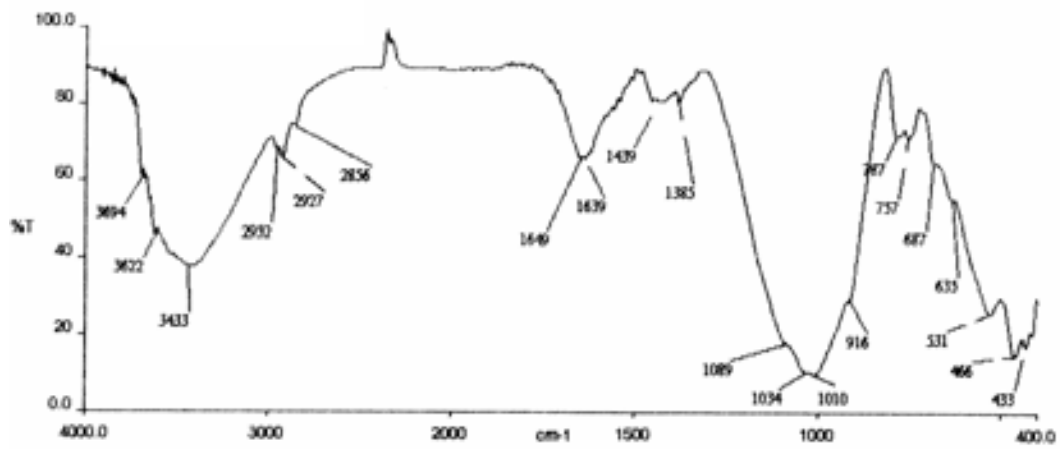


Figura 52
Espectro infrarrojo de la muestra 54

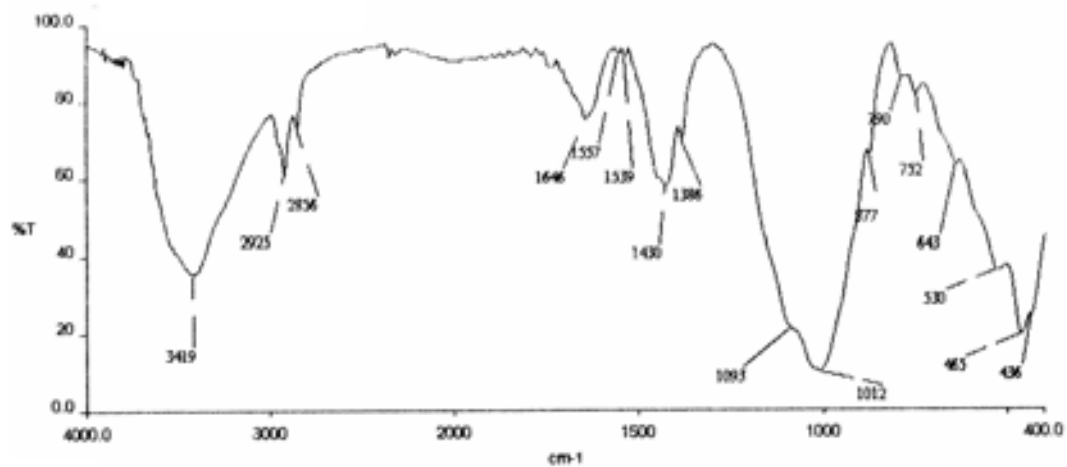


Figura 53
Espectro infrarrojo de la muestra 55

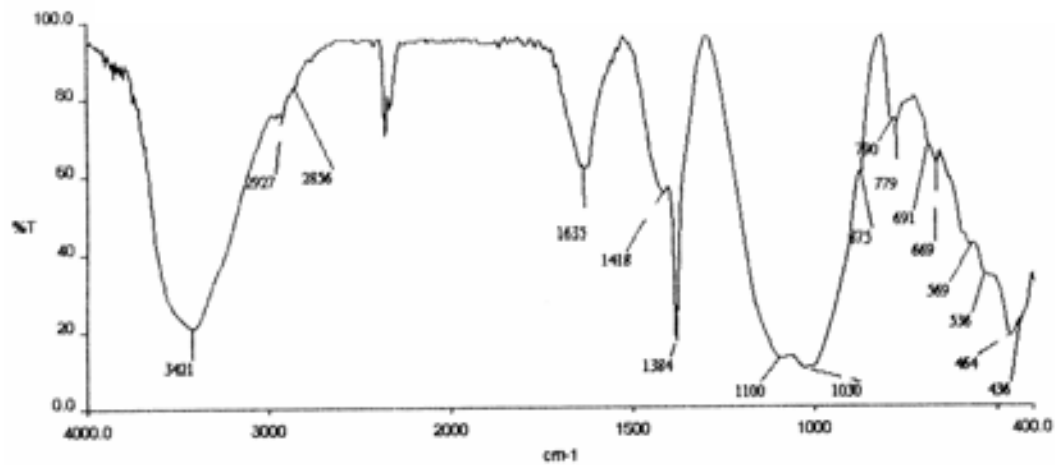


Figura 54
Espectro infrarrojo de la muestra 56

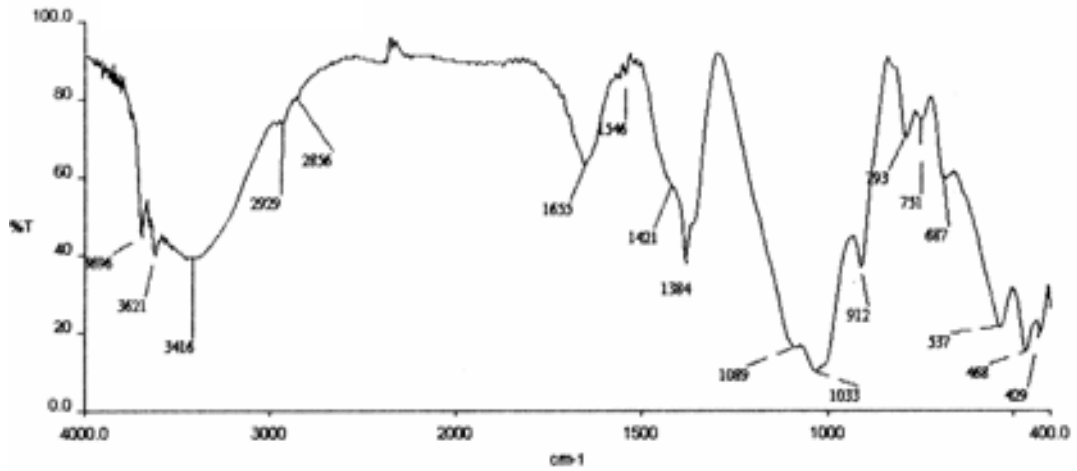


Figura 55
Espectro infrarrojo de la muestra 57

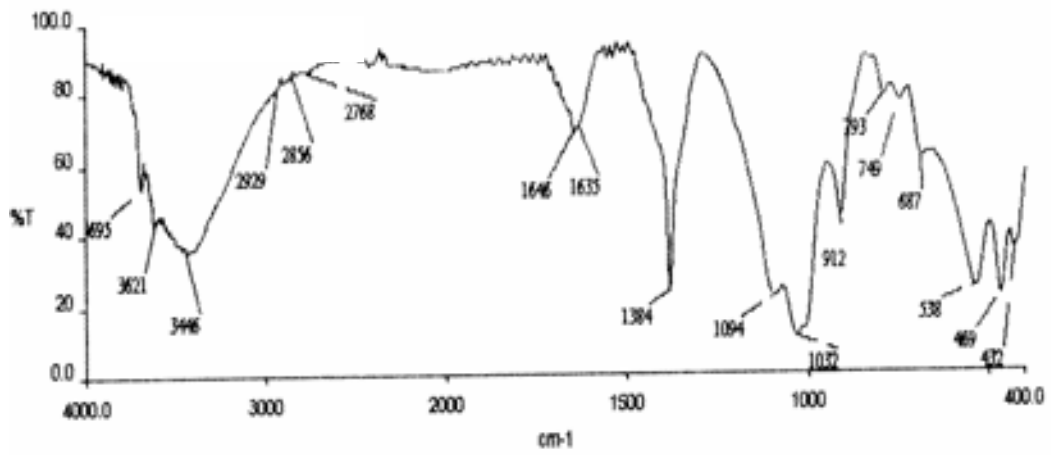


Figura 56
Espectro infrarrojo de la muestra 59

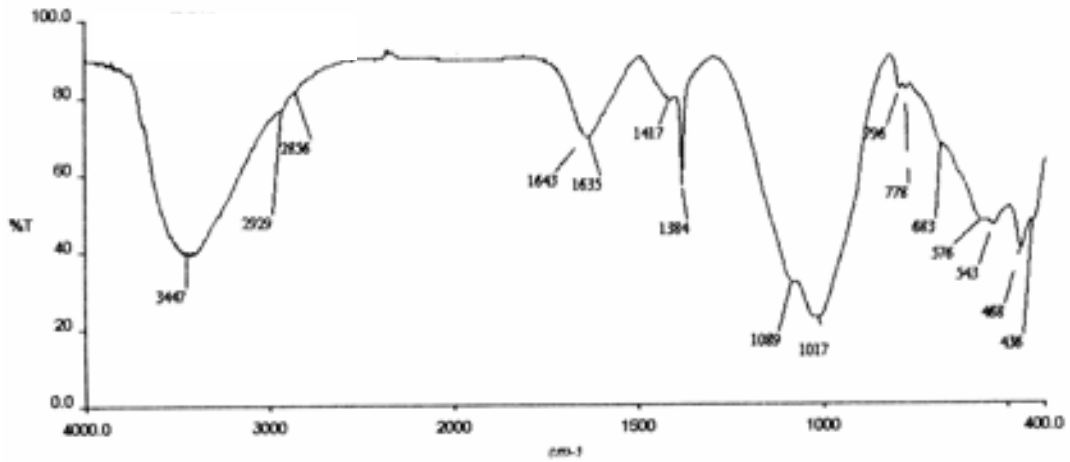


Figura 57
Espectro infrarrojo de la muestra 61

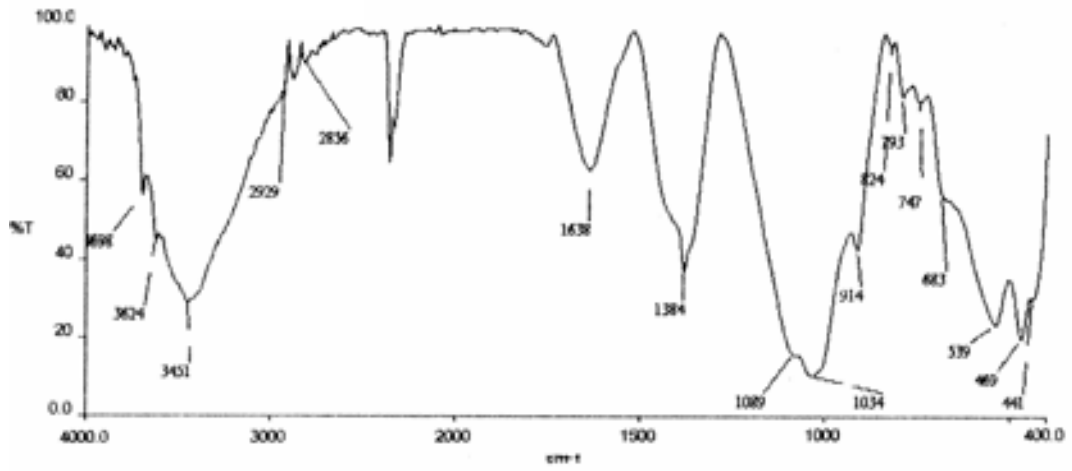


Figura 58
Espectro infrarrojo de la muestra 63

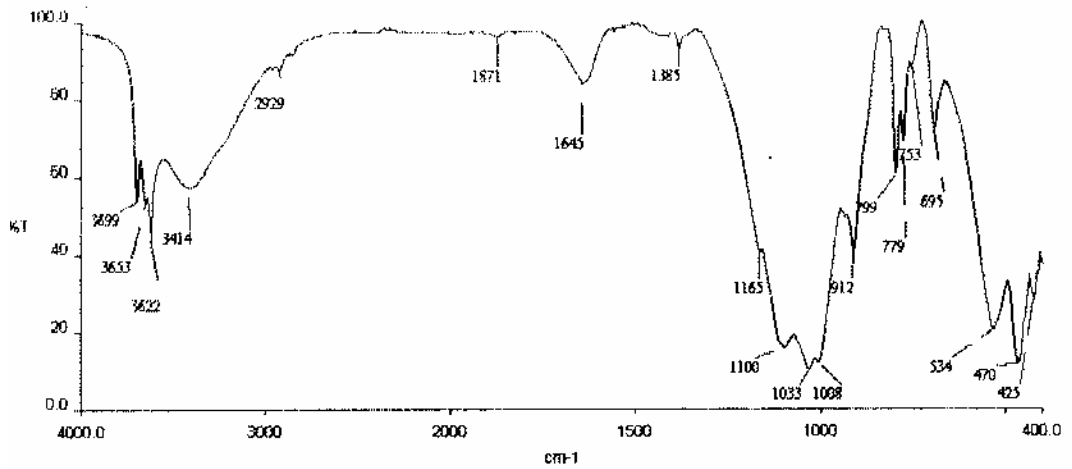


Figura 59
Espectro infrarrojo de una muestra de suelo de Ciudad Bolivar (Bogotá D.C.)

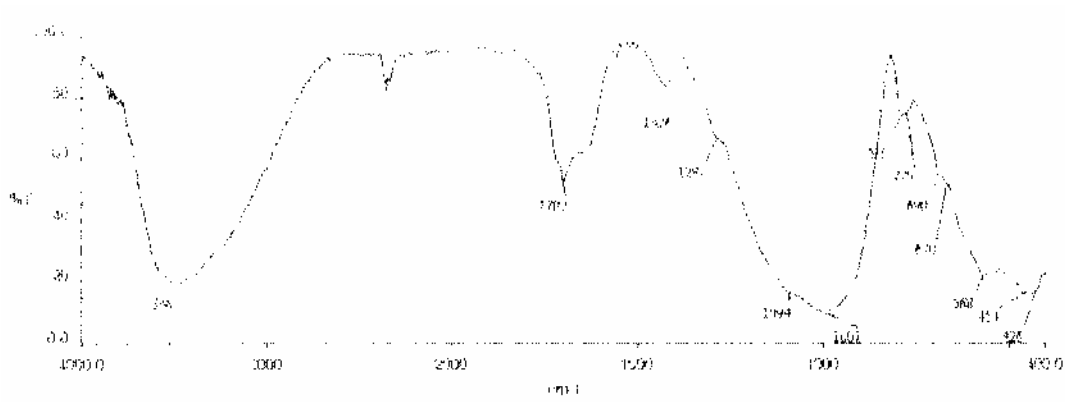


Figura 60
Espectro infrarrojo de la muestra 10 luego de tratamiento con peróxido de hidrógeno

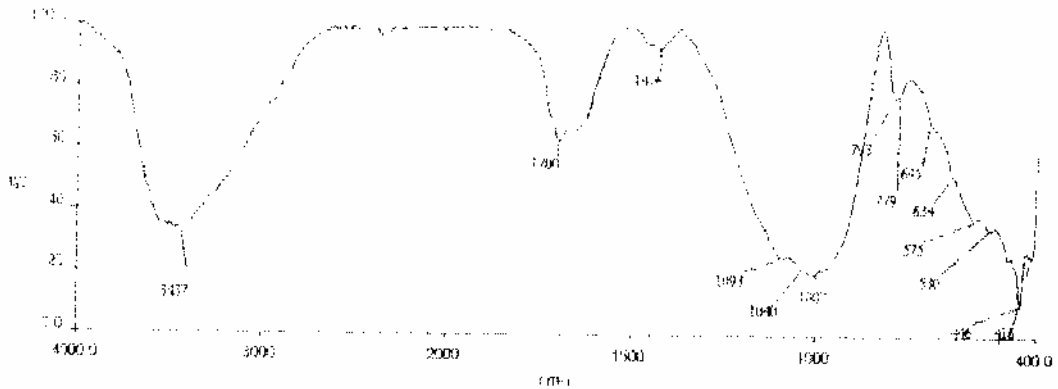


Figura 61
Espectro infrarrojo de la muestra 34 luego de tratamiento con peróxido de hidrógeno

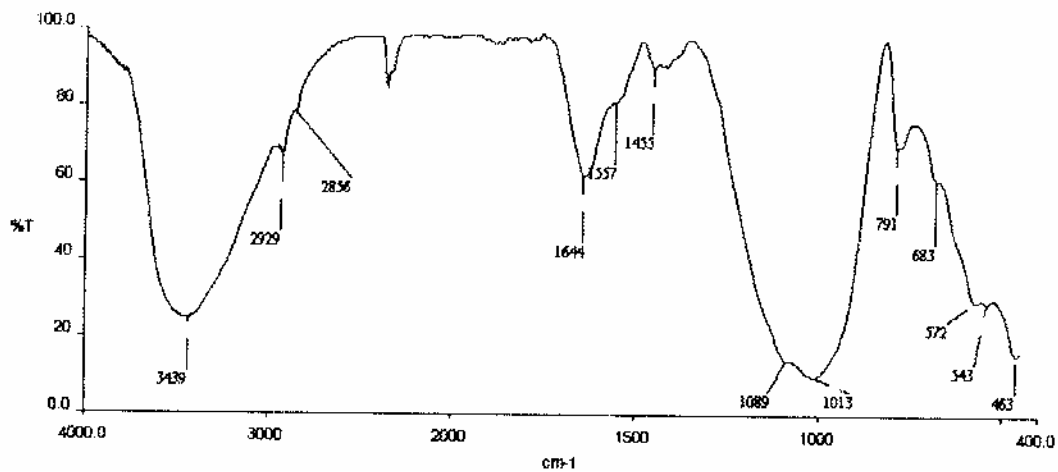


Figura 62
Espectro infrarrojo de la fracción <0.038 mm de la muestra 22

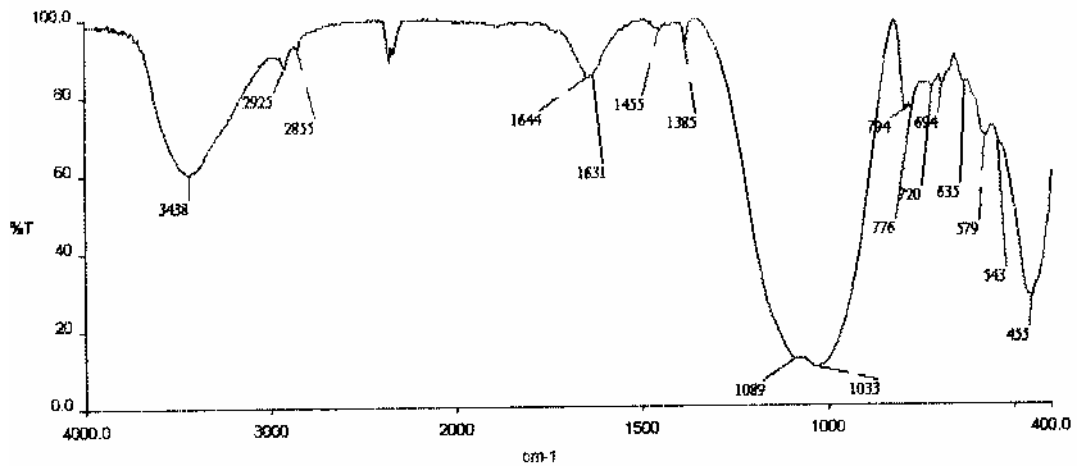


Figura 63
Espectro infrarrojo de la muestra 49 luego de calcinación a 800°C

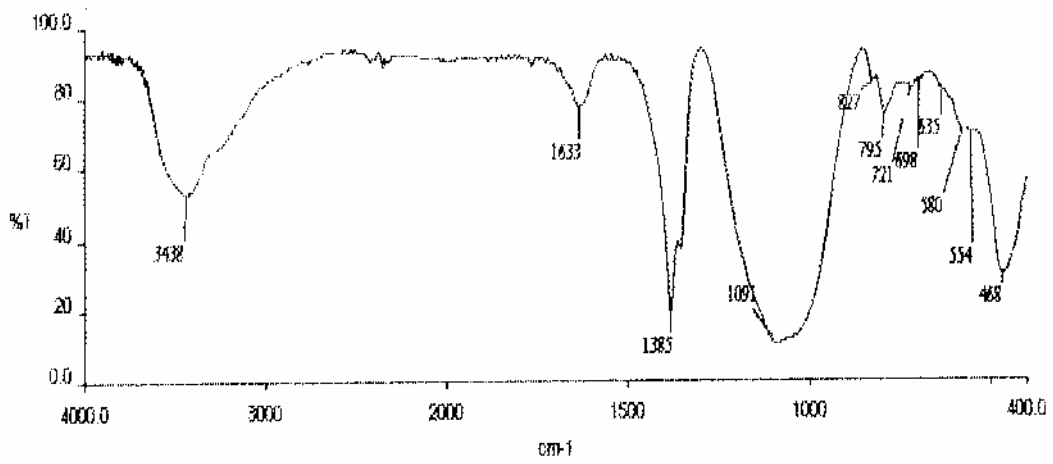


Figura 64
Espectro infrarrojo de la muestra 5 luego de calcinación a 800°C

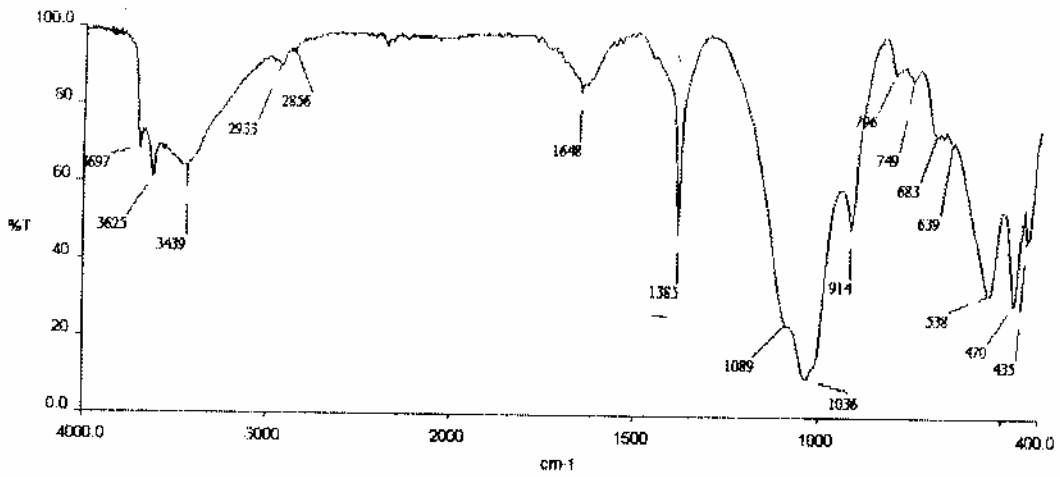


Figura 65
Espectro infrarrojo de la muestra 1 luego de calentamiento a 160°C por 16 horas

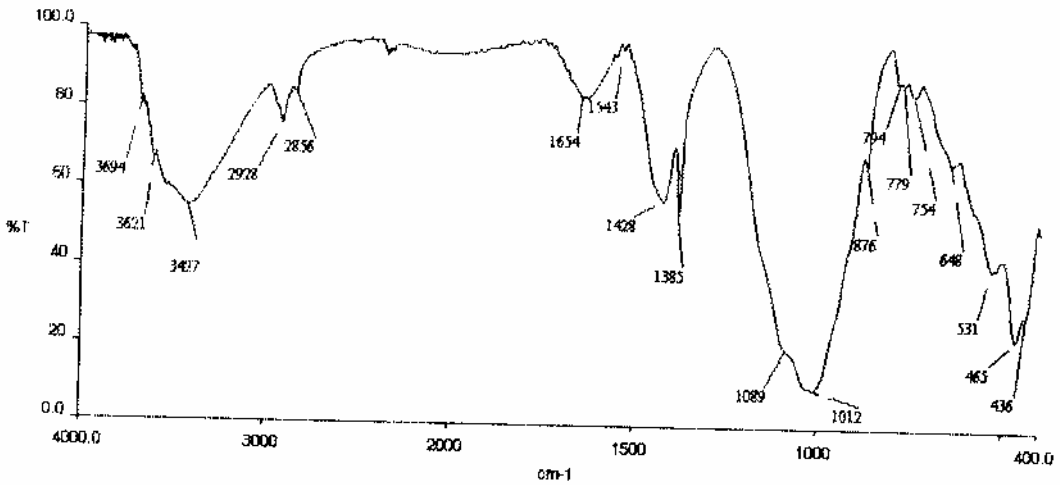


Figura 66
Espectro infrarrojo de la muestra 55 luego de calentamiento a 160°C por 16 horas

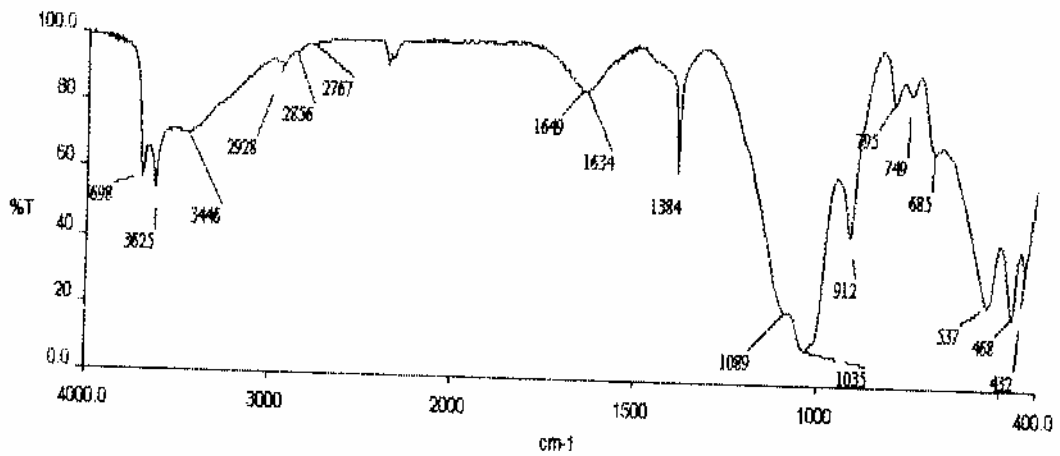


Figura 67
Espectro infrarrojo de la muestra 59 luego de calentamiento a 160°C por 16 horas

ANEXO J. Mapas según propiedades del suelo

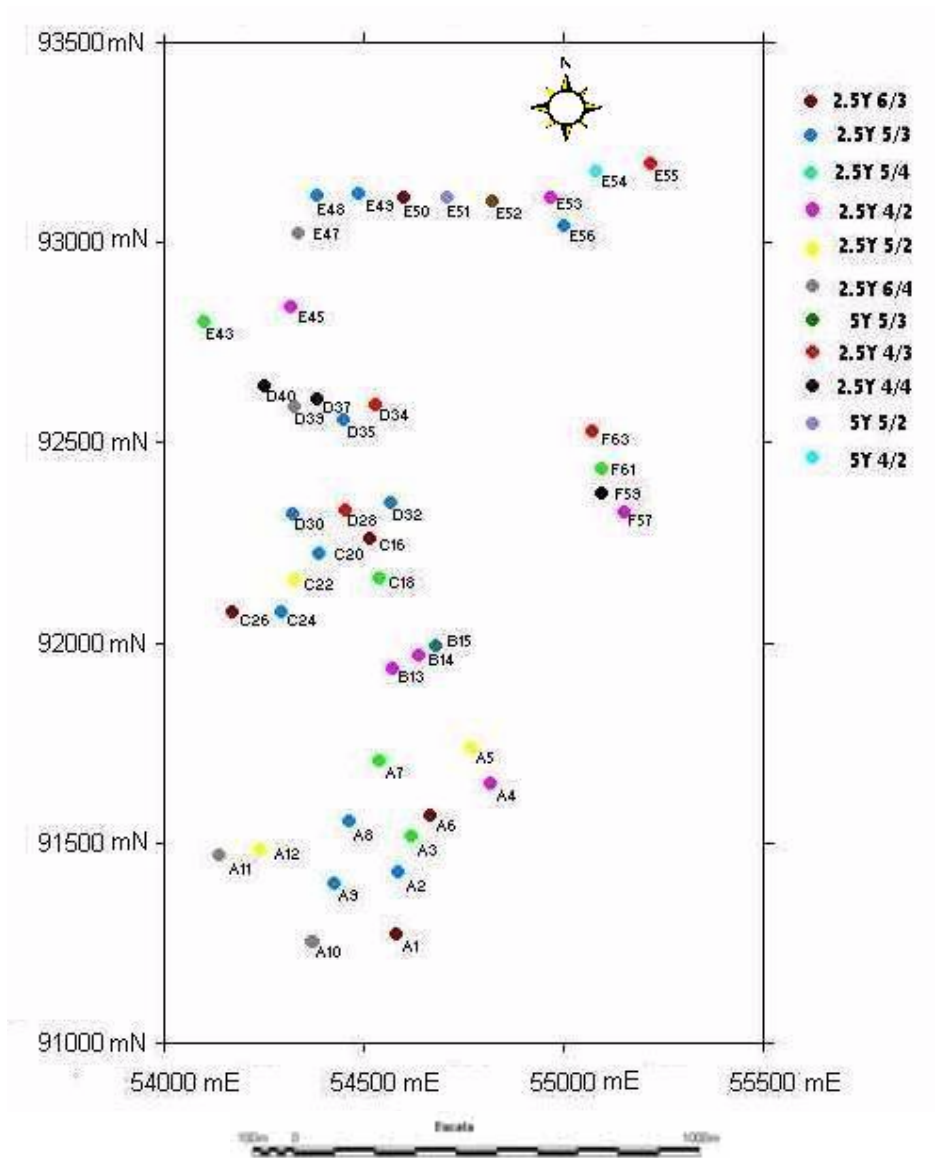


Figura 68
Mapa según notación de color

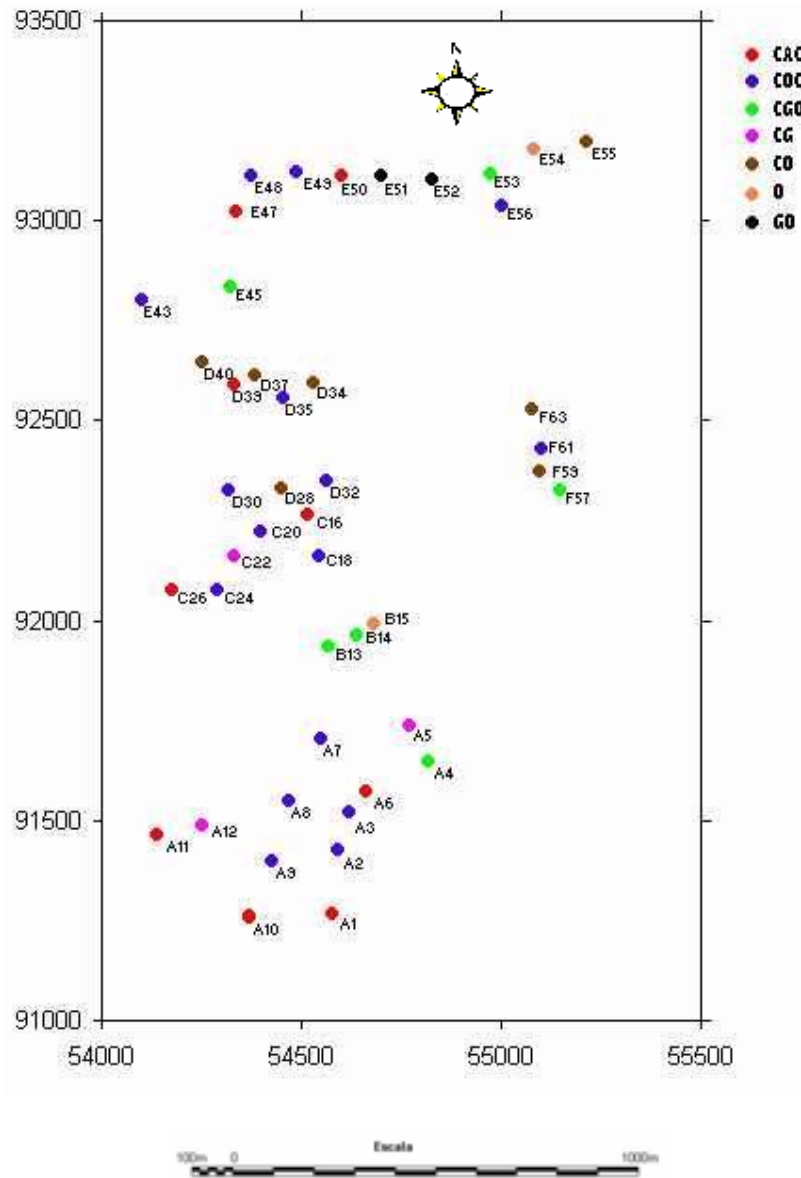


Figura 69
 Mapa según nombre de color

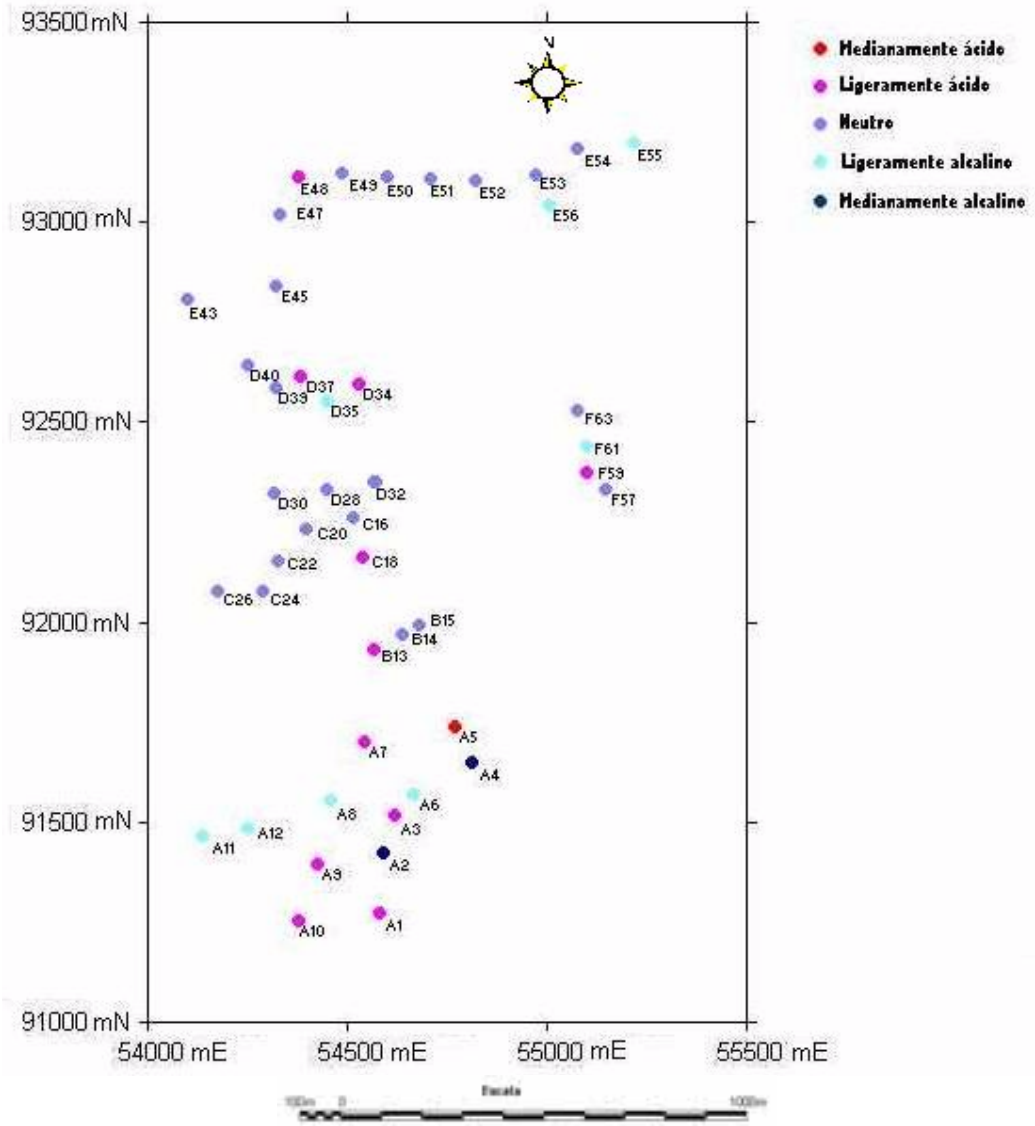


Figura 70
Mapa según pH

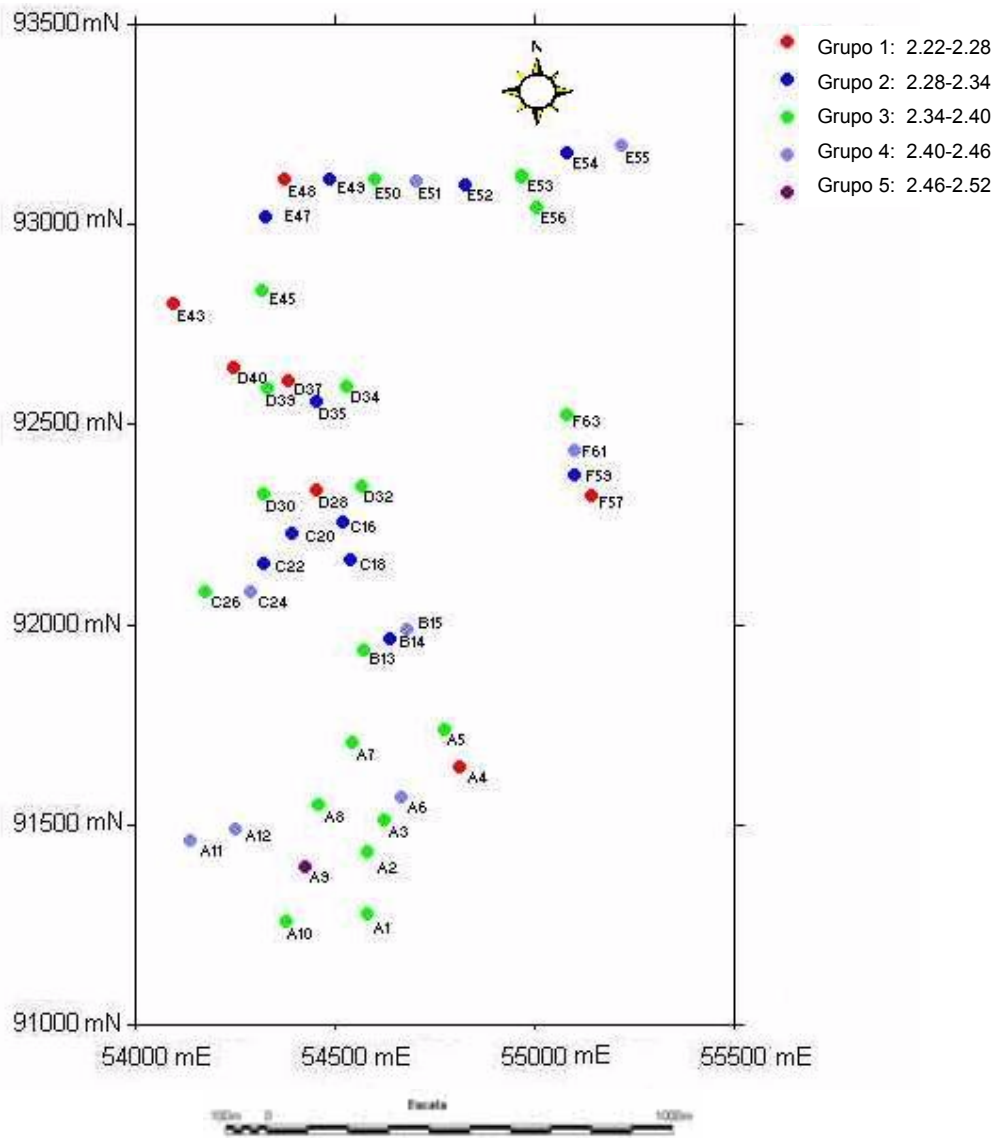


Figura 71
Mapa según densidad

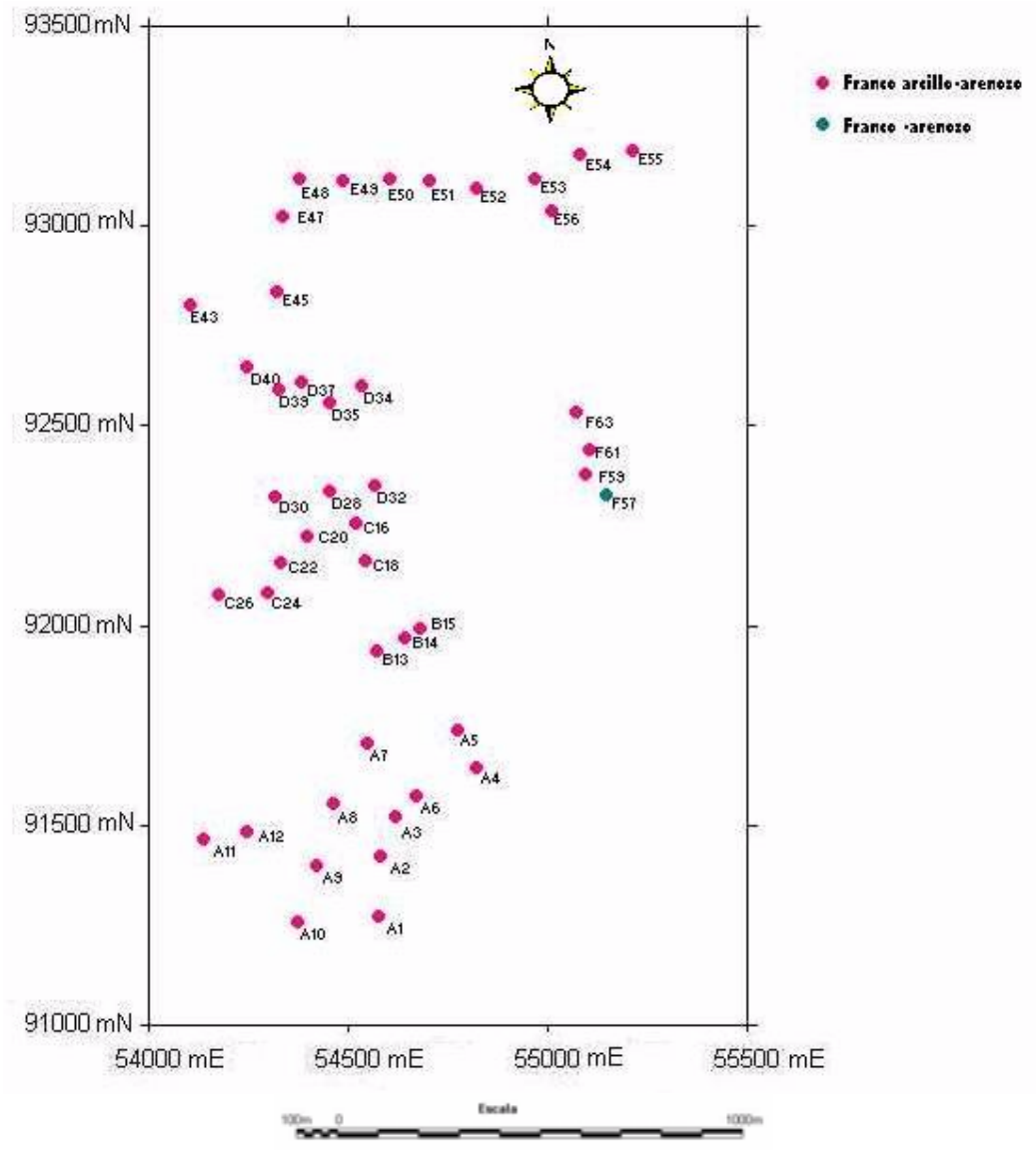


Figura 72
 Mapa según clase textural

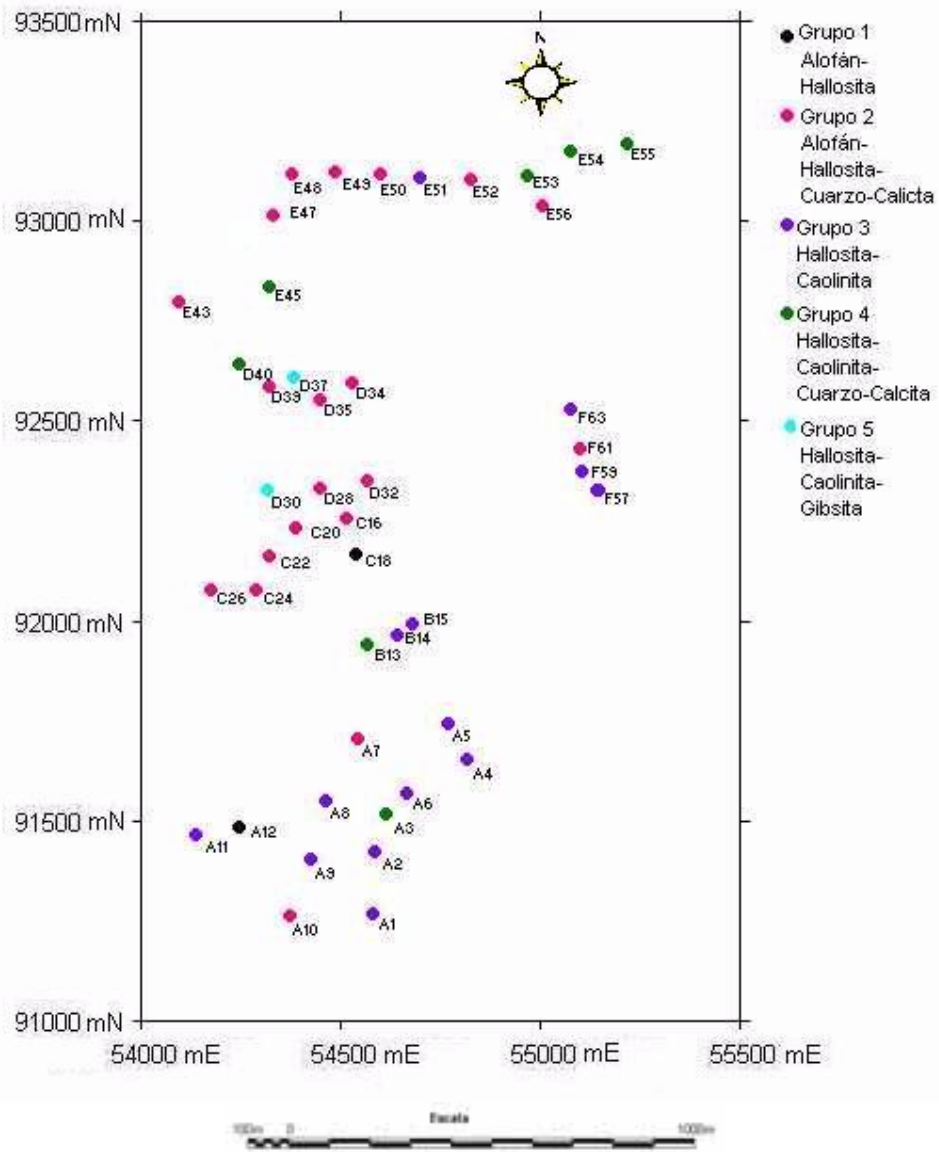


Figura 73
 Mapa según minerales encontrados