



COLEGIO DE POSTGRADUADOS
INSTITUCIÓN DE ENSEÑANZA E INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS AGRÍCOLAS

CAMPUS MONTECILLO
POSGRADO DE EDAFOLOGÍA

**INDICADORES FÍSICOS DE UN SUELO BAJO LABRANZA
DE CONSERVACIÓN Y SU RELACIÓN CON EL
RENDIMIENTO DE TRES CULTIVOS**

AGUSTÍN NAVARRO BRAVO

T E S I S

PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL
PARA OBTENER EL GRADO DE:

DOCTOR EN CIENCIAS

MONTECILLO, TEXCOCO, ESTADO DE MÉXICO

2010

La presente tesis titulada: **Indicadores físicos de un suelo bajo labranza de conservación y su relación con el rendimiento de tres cultivos**, realizada por el alumno: Agustín Navarro Bravo, bajo la dirección del Consejo Particular indicado, ha sido aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

**DOCTOR EN CIENCIAS
EDAFOLOGÍA**

CONSEJO PARTICULAR

Consejero _____
Dr. Benjamín Figueroa Sandoval

Asesor _____
Dr. Félix V. González Cossío

Asesor _____
Dr. Mario R. Martínez Menes

Asesor _____
Dr. Enrique Mejía Sáenz

Dedicatoria

A Dios:

Por la dicha de tener a mis padres, hermanos, hermana y compañera de vida, que me han impulsado para seguir adelante con mis objetivos planteados y por la fortuna de contar con personas tan valiosas.

A mis padres:

Zeferino Navarro Aguirre y Reynalda Bravo Filio ejemplo de trabajo y amor, me han impulsado a luchar para alcanzar las metas propuestas. Los amo.

A mis hermanos y hermana:

Ezequiel, Seferino y Reyna por su amor y de quienes me siento orgulloso, para que nazca el interés de superación cada día.

Con gran amor y cariño a mi compañera de vida Doris Sangerman Jarquín, quien me ha apoyado siempre en los momentos más felices y difíciles; asimismo, a la familia Sangerman Jarquín: Doña Gloria Jarquín Vda. de Sangerman, Mon, Pepe, July, Ramón, Chata, Karlita, Pau, Muñe y Ramoncito, a quienes agradezco el interés incondicional que me han brindado.

A mis compañeros y amigos: Abel Quevedo, Agustín Roque, Agustín Magallanes, Demetrio Fernández, Ricardo Figueroa, Víctor Perea, Eduardo Andrade, Eduardo Colín, Luís Galán, Luís de la Rosa, Gerardo Vázquez y Raúl Espejel, y todos aquellos que involuntariamente escapan a mi memoria, por todos los momentos que compartimos juntos durante mi estancia en esta institución.

A todos y cada una de las personas que conocí durante esta etapa de mi vida, en especial al personal de apoyo de campo y del laboratorio de física de suelos, que de una u otra forma contribuyeron en la culminación de éste trabajo.

Agradecimientos

Al Colegio de Postgraduados en Ciencias Agrícolas (CP), en especial al programa de Edafología por la oportunidad que me dio para la realización de los estudios de doctorado, así como a mis maestros y personal de apoyo por su contribución en mi formación profesional.

Al pueblo de México quién a través del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT), hace posible que muchos mexicanos y mexicanas de escasos recursos, pero con un inmenso deseo de superación pueden acceder al posgrado, a través de su apoyo económico.

A los miembros de mi Consejo Particular, quienes en todo momento me aconsejaron, guiaron y compartieron sus conocimientos y experiencias con talento y sencillez, lo que manifiesta su calidad humana.

Al Dr. Benjamín Figueroa Sandoval, deseo expresar mi más profundo agradecimiento por el planteamiento, dedicación, orientación y valiosas sugerencias en la ejecución del trabajo de investigación, pero sobre todo por el estímulo, apoyo y la formación que he recibido de él, a través de mi carrera profesional y deseo que así continúe.

Al Dr. Félix V. González Cossío, por su importante orientación, revisión y sugerencias al trabajo realizado; además, de la amistad desinteresada que me ha brindado.

Al Dr. Mario R. Martínez Menes, por su atención y amabilidad que me brindó, su valiosa orientación, revisión y sugerencias realizadas.

Al Dr. Enrique Mejía Sáenz, por las sugerencias atinadas que me dio durante su valiosa revisión.

Reflexión

Dice el maestro:

Reflexionad sobre cómo ciertas palabras fueron construidas para mostrar claramente lo que quieren decir.

Tomemos la palabra “**preocupación**”, y dividámosla en dos: **pre** y **ocupación**. Significa ocuparse de algo antes de que ocurra. ¿Quién, en todo este universo, puede tener el don de ocuparse de algo que todavía no ha ocurrido? **Nunca te preocupes.**

Estate atento a tu destino y a tu camino. Aprende todo lo que necesites aprender para manejar bien la espada de la luz que te fue confiada. Reflexiona sobre cómo luchan tus amigos, tus maestros y tus enemigos. Práctica bastante, pero no cometas el peor de los errores: creer que sabes cuál es el golpe que tu adversario va a dar.

Contenido

	Página
Índice general	i
Índice de cuadros	v
Índice de figuras	vii
Resumen	x
Abstract	xi
1 Introducción	1
2 Revisión de literatura	3
2.1 El suelo como un sistema disperso	3
2.1.1 Estructura del suelo	4
2.1.2 Densidad real y aparente del suelo	6
2.1.3 Humedad del suelo	6
2.1.4 Compactación del suelo	7
2.1.5 Distribución del tamaño de partículas del suelo	9
2.1.6 El pH del suelo	10
2.1.7 Materia orgánica del suelo	10
2.2 La agricultura sustentable	13
2.3 La productividad agrícola	15
2.3.1 Los cultivos de haba, maíz y frijol	16
2.4 La calidad del suelo	18
2.4.1 Indicadores de calidad del suelo	19
2.4.2 Características de los indicadores de calidad del suelo	22
2.5 Elementos de geoestadística	23
2.5.1 Variables aleatorias regionalizadas	24
2.5.2 El semivariograma experimental	25
2.5.3 Parámetros del semivariograma	26

	Página	
2.6	Análisis de conglomerados	27
2.7	Conclusiones sobre la revisión de literatura	30
3	Objetivos, supuestos e hipótesis	31
4	Materiales y métodos	33
4.1	Características del sitio experimental	33
4.2	Propiedades del suelo indicativas de su calidad física	35
4.2.1	Capacidad de campo y punto de marchitamiento permanente	36
4.2.2	Densidad aparente	36
4.2.3	Humedad gravimétrica	37
4.2.4	Contenido de humedad del suelo con reflectometría de dominio del tiempo	38
4.2.5	Resistencia mecánica del suelo	39
4.2.6	Conductividad eléctrica del extracto de saturación	40
4.2.7	Materia orgánica	40
4.2.8	Análisis mecánico	41
4.3	Establecimiento de parcelas de escurrimiento	42
4.3.1	Estimación de las propiedades físicas en las parcelas de escurrimiento	43
4.3.2	Análisis estadístico de las parcelas de escurrimiento	44
4.4	Los cultivos de haba, maíz y frijol	44
4.4.1	Estimación de rendimiento	45
5	Discusión de resultados	47
5.1	Estadística descriptiva de la parcela experimental	47
5.1.1	Contenido de humedad volumétrica del suelo	47
5.1.2	Resistencia mecánica del suelo	49
5.1.3	Conductividad eléctrica del suelo	56
5.1.4	Materia orgánica del suelo	60
5.1.5	Distribución del tamaño de partículas	64
5.1.6	Contenido de humedad gravimétrica y densidad aparente del suelo	67

	Página
5.1.7 Rendimiento de los cultivos	68
5.2 Análisis geoestadístico de la parcela experimental	70
5.2.1 Semivariograma de variabilidad espacial de la humedad volumétrica del suelo	70
5.2.2 Semivariograma de variabilidad espacial de la resistencia mecánica del suelo	71
5.2.3 Semivariograma de variabilidad espacial de la conductividad eléctrica del suelo	72
5.2.4 Semivariograma de variabilidad espacial de la materia orgánica del suelo	73
5.2.5 Semivariograma de variabilidad espacial de la distribución del tamaño de partículas del suelo	74
5.2.6 Semivariograma de variabilidad espacial de la humedad gravimétrica y densidad aparente del suelo	75
5.2.7 Semivariograma de variabilidad espacial del rendimiento de haba, maíz y frijol	77
5.2.8 Mapa de variabilidad espacial de la humedad volumétrica del suelo	78
5.2.9 Mapa de variabilidad espacial de la resistencia mecánica del suelo	79
5.2.10 Mapa de variabilidad espacial de la conductividad eléctrica del suelo	82
5.2.11 Mapa de variabilidad espacial de la materia orgánica del suelo	83
5.2.12 Mapa de variabilidad espacial de la distribución del tamaño de partículas del suelo	85
5.2.13 Mapa de variabilidad espacial del contenido de humedad gravimétrica y densidad aparente del suelo	86
5.2.14 Mapa de variabilidad espacial del rendimiento de haba, maíz y frijol	88
5.3 Análisis a través de conglomerados	91
5.3.1 Conglomerados de la resistencia mecánica del suelo	91
5.3.2 Conglomerados de la conductividad eléctrica del suelo	97
5.3.3 Conglomerados de la materia orgánica del suelo	99

	Página
5.4 Propiedades del suelo explicativas del rendimiento de los cultivos, en la parcela experimental	103
5.5 Estadística descriptiva de las propiedades físicas y químicas del suelo, en las parcelas de escurrimiento	105
5.5.1 Interdependencia entre propiedades del suelo en las parcelas de escurrimiento	106
5.5.2 Propiedades del suelo explicativas sobre el rendimiento de los cultivos, en las parcelas de escurrimiento	109
6 Conclusiones y recomendaciones	113
7 Literatura citada	117

Índice de cuadros

Cuadro	Página
4.1 Compactación del suelo con base a densidad aparente	36
4.2 Salinidad del suelo en pasta de saturación	40
4.3 Clasificación de la materia orgánica	41
4.4 Clasificación del tamaño de partículas	41
5.1 Estadísticas de la humedad volumétrica (θ_v) del suelo a 15 cm de profundidad	48
5.2a Estadísticas de la resistencia mecánica (RM) del suelo a 2 cm de profundidad	49
5.2b Estadísticas de la resistencia mecánica (RM) del suelo a 5 cm de profundidad	50
5.2c Estadísticas de la resistencia mecánica (RM) del suelo a 10 cm de profundidad	50
5.2d Estadísticas de la resistencia mecánica (RM) del suelo a 15 cm de profundidad	51
5.2e Estadísticas de la resistencia mecánica (RM) del suelo a 20 cm de profundidad	51
5.2f Estadísticas de la resistencia mecánica (RM) del suelo a 30 cm de profundidad	52
5.2g Estadísticas de la resistencia mecánica (RM) del suelo a 40 cm de profundidad	52
5.3a Estadísticas de la conductividad eléctrica (CE) del suelo de 0-5 cm de profundidad	56
5.3b Estadísticas de la conductividad eléctrica (CE) del suelo de 5-10 cm de profundidad	57
5.3c Estadísticas de la conductividad eléctrica (CE) del suelo de 10-15 cm de profundidad	57
5.4a Estadísticas de la materia orgánica (MO) del suelo de 0-5 cm de profundidad	60
5.4b Estadísticas de la materia orgánica (MO) del suelo de 5-10 cm de profundidad	61
5.4c Estadísticas de la materia orgánica (MO) del suelo de 10-15 cm de profundidad	61
5.5a Estadísticas de la distribución del tamaño de partículas (arena) del suelo	64
5.5b Estadísticas de la distribución del tamaño de partículas (limo) del suelo	65
5.5c Estadísticas de la distribución del tamaño de partículas (arcilla) del suelo	65
5.6 Estadísticas de la humedad gravimétrica (θ_g) y densidad aparente (ρ_a) del suelo	67
5.7 Estadísticas del rendimiento de haba, maíz y frijol	69
5.8 Valores del semivariograma de la humedad volumétrica (θ_v) del suelo	70
5.9 Valores de los semivariogramas de la resistencia mecánica (RM) del suelo	71

Cuadro	Página
5.10 Valores de los semivariogramas de la conductividad eléctrica (CE) del suelo	72
5.11 Valores de los semivariogramas de la materia orgánica (MO) del suelo	73
5.12 Valores de los semivariogramas de la distribución del tamaño de partículas del suelo	74
5.13 Valores de los semivariogramas de la humedad gravimétrica (θ_g) y densidad aparente (ρ_a) del suelo	76
5.14 Valores de los semivariogramas del rendimiento de haba, maíz y frijol	77
5.15 Ecuaciones de regresión de conglomerados de la resistencia mecánica (RM) con la profundidad del suelo	92
5.16 Matriz de correlaciones de Pearson de la resistencia mecánica (RM) del suelo	96
5.17 Ecuaciones de regresión de conglomerados de la conductividad eléctrica (CE) con la profundidad del suelo	97
5.18 Matriz de correlaciones de Pearson de la conductividad eléctrica (CE) del suelo	99
5.19 Ecuaciones de regresión de conglomerados de la materia orgánica (MO) con la profundidad del suelo	100
5.20 Matriz de correlaciones de Pearson de la materia orgánica (MO) del suelo	102
5.21 Propiedades del suelo explicativo (%) sobre el rendimiento de los cultivos, en la parcela experimental	104
5.22 Estadística descriptiva de las propiedades del suelo medidos en las parcelas de escurrimiento	106
5.23 Coeficientes de correlación Pearson entre propiedades físicas y químicas del suelo y el rendimiento de los cultivos, en las parcelas de escurrimiento	107
5.24 Propiedades del suelo explicativo (%) sobre el rendimiento de los cultivos, en las parcelas de escurrimiento	110
5.25 Regresión lineal para el rendimiento ($t\ ha^{-1}$) de haba, maíz y frijol como variable dependiente y las propiedades del suelo como variables independientes	112

Índice de figuras

Figura	Página	
2.1	Carácter mixto de una función aleatoria	23
2.2	Parámetros del semivariograma	27
4.1	Localización del sitio experimental, Colegio de Postgraduados, Montecillo, Texcoco, México	33
4.2	Cuadrícula de los puntos muestreados en la parcela experimental	34
4.3	Equipo para determinar la densidad aparente	36
4.4	Barrena para determinar la humedad del suelo	37
4.5	Tipos de reflectometría de dominio del tiempo (TDR), para medir humedad	38
4.6	Penetrómetro de ultrasonido (PU), para medir dureza del suelo	39
4.7	Esquema de las parcelas de escurrimientos	41
4.8	Equipo de simulación de lluvia tipo ARS/USDA	43
4.9	Cultivos intercalados y rotación de haba, maíz y frijol	45
5.1	Histogramas de frecuencia de la humedad volumétrica (θ_v) del suelo	48
5.2	Histogramas de frecuencia de la resistencia mecánica (RM) del suelo	53
5.2	Histogramas de frecuencia de la resistencia mecánica (RM) del suelo (continuación)	54
5.3	Valores máximos, mínimos, media, mediana, cuartiles 25 y 75 de resistencia mecánica del suelo	55
5.4	Histogramas de frecuencia de la conductividad eléctrica (CE) del suelo	58
5.5	Valores máximos, mínimos, media, mediana, cuartiles 25 y 75 de conductividad eléctrica del suelo	59
5.6	Histogramas de frecuencia de la materia orgánica (MO) del suelo	62
5.7	Valores máximos, mínimos, media, mediana, cuartiles 25 y 75 de materia orgánica del suelo	63
5.8	Histogramas de frecuencia de la distribución del tamaño de partículas del suelo	66

Figura	Página
5.9 Histogramas de frecuencia de la humedad gravimétrica (θ_g) y densidad aparente (ρ_a) del suelo	68
5.10 Histogramas de frecuencia del rendimiento de haba, maíz y frijol	69
5.11 Semivariograma de la humedad volumétrica (θ_v) del suelo	70
5.12 Semivariogramas de la resistencia mecánica (RM) del suelo	71
5.12 Semivariogramas de la resistencia mecánica (RM) del suelo (continuación)	72
5.13 Semivariogramas de la conductividad eléctrica (CE) del suelo	73
5.14 Semivariogramas de la materia orgánica (MO) del suelo	74
5.15 Semivariogramas de la distribución del tamaño de partículas del suelo	75
5.16 Semivariogramas de la humedad gravimétrica (θ_g) y densidad aparente (ρ_a) del suelo	76
5.17 Semivariogramas del rendimiento de haba, maíz y frijol	77
5.18 Mapa de variabilidad espacial de la humedad volumétrica (θ_v) del suelo	78
5.19 Mapas de variabilidad espacial de la resistencia mecánica (RM) del suelo	79
5.19 Mapas de variabilidad espacial de la resistencia mecánica (RM) del suelo (continuación)	80
5.19 Mapas de variabilidad espacial de la resistencia mecánica (RM) del suelo (continuación)	81
5.20 Mapas de variabilidad espacial de la conductividad eléctrica (CE) del suelo	82
5.20 Mapa de variabilidad espacial de la conductividad eléctrica (CE) del suelo (continuación)	83
5.21 Mapas de variabilidad espacial de la materia orgánica (MO) del suelo	84
5.22 Mapas de variabilidad espacial de la distribución del tamaño de partículas del suelo	85
5.22 Mapas de variabilidad espacial de la distribución del tamaño de partículas del suelo (continuación)	86
5.23 Mapas de variabilidad espacial de la humedad gravimétrica (θ_g) del suelo	87
5.24 Mapas de variabilidad espacial de la densidad aparente (ρ_a) del suelo	88
5.25 Mapas de variabilidad espacial del rendimiento de haba y maíz	89

Figura	Página
5.26 Mapas de variabilidad espacial del rendimiento de frijol y haba-maíz-frijol	90
5.27 Gráficas de cuartiles de conglomerados de la resistencia mecánica (RM) del suelo	93
5.27 Gráficas de cuartiles de conglomerados de la resistencia mecánica (RM) del suelo (continuación)	94
5.27 Gráficas de cuartiles de conglomerados de la resistencia mecánica (RM) del suelo (continuación)	95
5.28 Distribución de conglomerados de la resistencia mecánica (RM) en la parcela experimental	96
5.29 Gráficas de cuartiles de conglomerados de la conductividad eléctrica (CE) del suelo	98
5.30 Distribución de conglomerados de la conductividad eléctrica (CE) en la parcela experimental	99
5.31 Gráficas de cuartiles de conglomerados de la materia orgánica (MO) del suelo	101
5.32 Distribución de conglomerados de la materia orgánica (MO) en la parcela experimental	102
5.33 Porcentaje explicativo individual y acumulativo de las propiedades del suelo sobre el rendimiento de los cultivos, en la parcela experimental	105
5.34 Relación lineal entre el rendimiento de grano de haba, maíz y frijol con MO, K_s , I_a y S_o , en las parcelas de escurrimiento	108
5.35 Porcentaje explicativo individual y acumulativo de las propiedades del suelo, sobre el rendimiento de los cultivos en las parcelas de escurrimiento	111

INDICADORES FÍSICOS DE UN SUELO BAJO LABRANZA DE CONSERVACIÓN Y SU RELACIÓN CON EL RENDIMIENTO DE TRES CULTIVOS

Navarro Bravo, Agustín

Colegio de Postgraduados en Ciencias Agrícolas, 2010

Resumen

El manejo físico o laboreo del suelo se hace para crear condiciones óptimas en la zona de raíces de las plantas, a través de una adecuada estructura, porosidad, infiltración y retención de agua, entre otras, que son importantes para el manejo sustentable del recurso suelo. Para la identificación de indicadores físicos del suelo para la producción de cultivos, se utilizaron técnicas tradicionales y no destructivas de análisis tales como: la reflectometría de dominio del tiempo (TDR) y el penetrómetro de ultrasonido (PU) que garantizan la medición rápida de algunas propiedades físicas del suelo. Bajo este enfoque, se evaluó un agroecosistema de haba-maíz-frijol en rotación manejado con labranza de conservación, en el Colegio de Postgraduados, Montecillo, Texcoco, Estado de México. Las propiedades de suelo medidas fueron densidad aparente (ρ_a), resistencia mecánica (RM), humedad volumétrica (θ_v), materia orgánica (MO), conductividad eléctrica (CE), conductividad hidráulica saturada (K_s), infiltración acumulada (I_a), distribución del tamaño de partículas, entre otras. El análisis de correlación de las propiedades del suelo y el rendimiento de los cultivos, redujeron el número de variables claves de 17 a 15 con una correlación aceptable entre ellas. El análisis de regresión múltiple con rendimiento de grano de haba, maíz y frijol como variable dependiente y las propiedades del suelo como variables independientes mostraron que la MO, K_s e I_a , explicaron la mayor variabilidad del rendimiento agronómico de los cultivos. Se puede concluir que la estructura del suelo es fundamental para el crecimiento de las plantas y el rendimiento de los cultivos; los beneficios de utilización de la labranza de conservación sobre la estructura del suelo se manifiestan en un buen movimiento del agua (infiltración, percolación y drenaje), adecuada aireación y regulación de la temperatura del mismo para el desarrollo de raíces y el crecimiento de las plantas. En consecuencia, los resultados indican que el uso del sistema de labranza de conservación reduce la degradación estructural del suelo e incrementa la productividad de los cultivos, por lo que, su implementación es una alternativa de producción sustentable.

Palabras clave: estructura del suelo, rendimiento de grano, sostenibilidad.

SOILL PHYSICAL INDICATORS UNDER CONSERVATION TILLAGE AND THEIR RELATIONSHIP WITH THE YIELD OF THREE CROPS

Navarro Bravo, Agustín

Colegio de Postgraduados en Ciencias Agrícolas, 2010

Abstract

The physical management or plowing of the soil is made to create optimal conditions in the zone by roots of the plants, through an adapted structure, water porosity, infiltration and retention, among others, that are important for the sustained management of the resource soil. For the identification of physical indicators of the soil for the production of crops, traditional and nondestructive techniques of analysis were used such as: the time domain reflectometry (TDR) and the penetrometer of ultrasound (PU) that guarantee the fast measurement of some physical properties of the soil. Under this approach, agroecosystem of fava bean-maize-bean in rotation handled with conservation tillage was evaluated, at the Colegio de Postgraduados, Texcoco, State of Mexico. The measured soil properties were bulk density (ρ_a), mechanical resistance (RM), volumetric humidity (θ_v), organic matter (MO), electrical conductivity (CE), saturated hydraulic conductivity (K_s), accumulated infiltration (I_a), distribution of particles size, among others. The analysis of correlation of the properties of the soil and the yield of the crops reduced the number of variable keys from 17 to 15 with an acceptable correlation among them. The multiple regression analysis with yield of grain of fava bean, maize and bean as variable employee and the independent variable properties of the soil as showed that the MO, K_s and I_a , explained the greater variability of the agronomic yield of the crops. It is possible to be concluded that the structure of the soil is fundamental for the growth of the plants and the yield of the crops; the benefits of use of the conservation tillage on the structure of the soil are pronounced in a good movement of the water (infiltration, percolation and drainage), suitable ventilation and regulation of the temperature of the same for the development by roots and the growth of the plants. Consequently, the results indicate that the use of the system of conservation tillage reduces the structural degradation of the soil and increases the productivity of the crops, reason why, its implementation is an alternative of sustained production.

Key words: grain yield, soil structure, sustainability.

1. Introducción

El suelo es uno de los principales componentes de los agroecosistemas, que lo hace fundamental manejarlo de manera tal que lo conservemos, mejoremos y al mismo tiempo propiciemos una mayor rentabilidad de su usufructo. Las propiedades del suelo condicionan el desarrollo y la penetración de raíces de los cultivos; por lo cual debemos caracterizar los indicadores definidos por aquellas propiedades del suelo (físicas, químicas y biológicas), que sirven de medida precisa del estado actual y son útiles para compararlo con el estado óptimo del suelo, definido teórica o empíricamente en función de la sustentabilidad del sistema.

El suelo a diferencia del agua y el aire, es un recurso natural sin estándares de calidad definidos, debido a su variabilidad, en consecuencia, es casi imposible establecer una simple medida física, química y biológica que pudiera reflejar adecuadamente la calidad; sin tomar en consideración otros factores que afectan la formación y funcionamiento del mismo. Esto dificulta definir, medir y regular la calidad de este recurso (Bandick y Dick, 1999).

Por otra parte, se ha señalado que la calidad del suelo es uno de los factores más importantes para la sostenibilidad de la biosfera global, ésta pudiera ser definida de diferentes formas incluyendo los principios de productividad, sustentabilidad y calidad ambiental. Para cuantificar la calidad del suelo, los indicadores cuyos valores indicarían la calidad del mismo necesitan ser medidos espacialmente, a través de la evaluación de las propiedades del suelo (físicas, químicas y biológicas), las cuales deben ser: fáciles de medir y sensibles a cambios generados por las prácticas de manejo (Larson y Pierce, 1991; Dexter, 2004).

Las definiciones de los conceptos de calidad, sustentabilidad y manejo sostenible del suelo no están precisadas en su totalidad. La calidad del suelo se refiere a la capacidad para producir cultivos sin provocar degradación u otro daño al ambiente (Acton y Gregorich, 1995). Por otro lado la sustentabilidad se refiere a la habilidad de un sistema para mantener la productividad en equilibrio (Buol, 1995). Sin embargo, el manejo sostenible implica una tendencia hacia el mejoramiento de ciertas cualidades de un sistema.

Por ello es necesario impulsar nuevas tecnologías que ayuden a conservar los recursos naturales como el suelo, el agua y el ambiente, que eviten la degradación de los agroecosistemas y además permitan aumentar los rendimientos y la calidad de las cosechas por unidad de superficie, en función de la evaluación de nuevos materiales que se adapten a las condiciones específicas del lugar donde se pretenden desarrollar (Bahena *et al.*, 2009).

Los indicadores deben ser integrados, es decir, deben dar información condensada de varios atributos importantes del sistema, preferentemente fáciles de medir y susceptibles de dar seguimiento, adecuados al nivel de agregación del sistema bajo análisis. Los métodos geoestadísticos, han sido una de las herramientas más utilizada por los científicos del suelo en las dos últimas décadas, ya que permite estudiar la variabilidad y la estructura de variación de las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo (Dexter, 2004).

Por lo tanto, la presente investigación propone establecer las relaciones de variabilidad espacial de las propiedades del suelo, con la finalidad de establecer los indicadores físicos del suelo, como estrategia para predecir su productividad. Bajo este enfoque, se evaluó un agroecosistema de haba-maíz-frijol en rotación manejado con labranza de conservación, en el Colegio de Postgraduados, Montecillo, Texcoco, Estado de México. Las propiedades de suelo medidas fueron densidad aparente (ρ_a), resistencia mecánica (RM), humedad volumétrica (θ_v), materia orgánica (MO), conductividad eléctrica (CE), conductividad hidráulica saturada (K_s), infiltración acumulada (I_a), distribución del tamaño de partículas, entre otras. El análisis de correlación de las propiedades del suelo y el rendimiento de los cultivos, redujeron el número de variables claves de 17 a 15 con una correlación aceptable entre ellas; No obstante, las regresiones múltiples efectuadas con rendimientos de grano de los cultivos como variable dependiente y las propiedades del suelo como variables independientes, mostraron que la MO, K_s e I_a , explicaron la mayor variabilidad del rendimiento agronómico del haba, maíz y frijol.

Se puede concluir que los beneficios de utilización de la labranza de conservación sobre la estructura del suelo, se manifiestan a través del adecuado movimiento del agua (infiltración, percolación y drenaje), aireación y regulación de la temperatura del mismo, para el desarrollo de raíces y el crecimiento de las plantas; por lo que, su implementación es una alternativa de producción sustentable.

2. Revisión de literatura

2.1 El suelo como un sistema disperso

El suelo bajo nuestros pies, es un sustrato básico de la vida terrestre que sirve como un medio para el crecimiento de plantas, actividades microbiológicas y reservorio de reciclamiento de diversos desechos que se acumulan en nuestro ambiente; además, soporta edificios y provee materiales para construcción de grandes estructuras tales como presas y terraplenes (Hillel, 1980).

Soil Taxonomy (2006), define al suelo como un cuerpo natural que incluye a los sólidos (minerales y materia orgánica), gases y líquidos, que ocurren sobre la superficie terrestre; que ocupa un lugar en el espacio y que se caracteriza por una o ambas de las siguientes características: horizontes o capas que se diferencian del material parental, como resultado de adiciones, pérdidas, transformaciones y movimientos de materia o de energía, y por su habilidad de soportar plantas en un ambiente natural.

Se puede visualizar al suelo como un sistema disperso, compuesto de una fracción sólida, líquida y gaseosa. Estos elementos interactúan al interior de éste para formar arreglos de agregados y poros (estructura), que determinan los flujos de calor, agua y aire en el suelo. Por lo tanto, la estructura del suelo se ha definido como el arreglo espacial de las partículas sólidas con la fase porosa y las relaciones entre ellas (Figueroa y Morales, 1992).

La fase sólida predomina y el agua del suelo proporciona las películas acuosas que envuelven las partículas individuales y tiende a llenar los poros entre las partículas sólidas; éstas son de diversos tamaños, desde los límites inferiores del estado coloidal hasta las fracciones más gruesas de arena y grava (Baver *et al.*, 1980). Este autor también define a las partículas individuales totalmente dispersas o primarias como unidades texturales y los agregados o partículas secundarias que se forman por agrupación de elementos mecánicos separados, la llama unidades estructurales.

La fase sólida del suelo posee mayor estabilidad, es muy heterogénea y está formada por una mezcla de materiales; la fase líquida y gaseosa es extremadamente inestable; a todos estos fragmentos se les puede separar y caracterizar de acuerdo con su tamaño, origen, composición, constitución, propiedades y las relaciones que las ligan entre sí con el suelo que condicionan (Ortiz y Ortiz, 2001).

Algunas de las propiedades del suelo afectadas en la producción de cultivos por un manejo inadecuado son: la estructura, la distribución, conexión y cantidad de poros, el movimiento y cantidad de agua, la cantidad y distribución de la materia orgánica, la actividad de la población microbiana, el pH y la disponibilidad y distribución de nutrimentos, entre otros (Blevins *et al.*, 1983).

Los estudios de Dexter y Young (1992), han permitido concluir que la estructura controla la respuesta física de la degradación del suelo a través de todos los procesos físicos, químicos y biológicos que en él ocurren; desde lo más pequeño a nivel de los poros entre las partículas de arcilla hasta lo más grande como es el espaciamiento entre las grietas del suelo; actualmente existe un creciente convencimiento en relación a que el entendimiento de las propiedades físicas del suelo, constituye la clave en la comprensión de muchos procesos de importancia agrícola y ambiental.

2.1.1 Estructura del suelo

Letey (1991), define a la estructura como el tamaño, forma y arreglo de las partículas sólidas y vacíos del suelo; él señala que es altamente variable y que está asociada a un grupo complejo de interacciones entre factores mineralógicos, químicos y biológicos.

La estructura se considera como la constitución física del suelo, expresado por el tamaño, forma y arreglo de las partículas sólidas y poros, incluyendo las partículas primarias que forman partículas compuestas y las partículas compuestas como tales; por lo tanto, no existen suelos sin estructura, ya que siempre existen un cierto nivel de organización estructural, de tal forma que se reconocen tres categorías amplias de estructura del suelo: granular simple, masiva y agregada. Cuando las partículas están totalmente separadas unas de otras como un arreglo débil, se emplea el término de estructura de grano simple (Hillel, 1980).

Cuando el suelo se encuentra estrechamente empaquetado en bloques grandes cohesivos, la estructura se le denomina masiva, y ocurre cuando el suelo está compuesto de partículas de limo y arcilla, que muestran poca o ninguna tendencia a separarse bajo ligera presión en unidades estructurales más pequeñas. Entre estos dos extremos se puede reconocer una condición intermedia, en la cual las partículas del suelo están asociadas en pequeños terrones estables conocidos como agregados o peds, a este tipo de estructura se le denomina agregada y es la mejor para la germinación y el desarrollo de las plantas (Hillel, 1998).

Los principales factores que influyen en el origen de la estructura son: tipo de arcilla, materia orgánica, óxidos de hierro y aluminio, actividad biológica y factores físicos; siendo el factor principal en la formación de la estructura agregada la existencia del material coloidal, ya que sin su presencia prevalecen la estructura de granos individuales (Ray y Boyd, 1987; Passioura, 1991).

La estructura del suelo no afecta directamente el desarrollo de las plantas, sino a través de uno de los siguientes factores: aireación, compactación, relaciones de humedad y temperatura. Para obtener un rendimiento máximo en la producción de cultivos, la estructura del suelo debe maximizar la capacidad de almacenamiento de humedad disponible a la planta y optimizar la aireación en la zona radical (Gavande, 1987; Emerson y Greenland, 1990; Letey, 1991; Passioura, 1991). Otra característica física del suelo que afecta la tasa de crecimiento de las plantas, sin afectar necesariamente la absorción de agua y nutrientes es el tamaño de agregados (Koppi y Douglas, 1991).

La estructura se considera como el conjunto de las unidades elementales de diferente tamaño y nivel de organización (partículas elementales del suelo, micro y macroagregados), que presentan un arreglo específico en el espacio y una dinámica en el tiempo característica de cada tipo de suelo. No existen suelos no estructurados, ya que en cualquier suelo existe un número dado de niveles de organización estructural, que puede ser igual a uno o más. Sin embargo, el proceso de agregación no se presenta en todos los suelos (Oleschko *et al.*, 1993). Esta generalidad, aunque parcialmente verídica, periódicamente ha generado discusiones sobre su aplicación en la creación de condiciones óptimas y estables para el crecimiento de los cultivos, y así definir direcciones y prioridades para la investigación en el manejo de los suelos y su relación con la productividad y conservación de este recurso.

2.1.2 Densidad real y aparente del suelo

La densidad real se refiere a la relación de la masa total de las partículas sólidas del suelo con respecto a su volumen. La densidad aparente se define como la relación del peso del suelo seco entre el volumen total de éste y puede expresarse g cm^{-3} ; este volumen incluye el espacio poroso, por lo que ha sido utilizado como un indicador del grado de compactación del suelo (Blake y Hartge, 1986).

Los estudios realizados por Griffith *et al.* (1977), mencionan que con labranza cero aumenta la densidad aparente del suelo, aunque indica que este incremento es significativo sólo si se llevan a cabo las mediciones directamente después de sembrar, la tendencia cambia si la medición se realiza después de cosechar el cultivo, lo cual es un indicio de naturaleza temporal de la labranza y que los cambios que ocurren son reversibles.

Cook *et al.* (1992), hacen referencia que una mayor densidad aparente indica mayor compactación del suelo, que ocasiona un sellado de la superficie restringiendo la infiltración y almacenamiento del agua, siendo esto mayor en suelos cultivados que en con vegetación natural. El contenido de agua y los niveles de compactación del suelo afectan también la densidad aparente, ya que al incrementar el contenido de humedad, provoca un incremento de la densidad y afecta la resistencia a la penetración por un aumento en la compactación.

2.1.3 Humedad del suelo

El agua es uno de los componentes más variables del suelo, los diferentes suelos tienen distintas capacidades para retener el agua, y su contenido se puede expresar en porcentaje. Cuando en un suelo existe abundante agua y no se drena, las raíces de las plantas pueden morir por la carencia de oxígeno; por otra parte, si hay poca agua presente el crecimiento de las plantas se detiene y finalmente sobreviene el marchitamiento (Ortiz y Ortiz, 2001).

Los agregados del suelo como resultado del humedecimiento y secado, son afectados por los procesos hidráulicos. Al aumentar los ciclos de secado, la porosidad total puede disminuir y más tarde

incrementarse; el volumen de poros finos es fomentado al reducir la intensidad del secado; por lo que, la cantidad de agua disponible para las plantas es reducida cuando la intensidad de la agregación se incrementa (Horn *et al.*, 1994).

La labranza puede tener un efecto muy significativo en el movimiento y almacenamiento del agua en el suelo debido a los cambios que se producen en la porosidad y distribución del tamaño de poros (Figueroa y Morales, 1992). El almacenamiento del agua en el suelo se incrementa notablemente, donde la inversión y movimiento de los suelos son mínimos y los residuos de cosecha son mantenidos en la superficie como mantillo protector, lo que disminuye la tasa de evaporación del agua del suelo.

Estudios realizados en México demostraron que en el sistema de labranza de conservación, el contenido de humedad en el suelo ha sido siempre mayor en comparación con el sistema tradicional de manejo de suelos (Ventura, 1992); asimismo, Zazueta (1984), determinó que la infiltración del agua en un suelo bajo el sistema de labranza de conservación aumentaba considerablemente, lo que repercutía en una disminución del escurrimiento superficial y del gasto máximo producido durante un evento de lluvia.

El almacenamiento de agua de lluvia, es más alto en los terrenos donde los residuos se mantienen sobre la superficie del suelo, por los métodos de labranza de conservación, que donde los residuos son mezclados con el suelo (labranza convencional). La capacidad del almacenamiento de agua y su retención en el suelo dependen de la cantidad de residuos, tipo de cobertura y de las propiedades del suelo, tales como: la textura, velocidad de infiltración, evaporación total, etc (Prasad y Power, 1991).

2.1.4 Compactación del suelo

Diversos investigadores, destacan el impacto negativo que causa a los suelos la energía externa aplicada durante el proceso de producción; la compactación del suelo medida en kPa en forma de horizontes compactados o endurecidos, generalmente es de origen antropogénico (inducido por el hombre) y ocurre como resultado del tránsito continuo de maquinaria agrícola sobre la superficie del terreno y sus implementos a una misma profundidad, lo que ocasiona la formación de capas endurecidas de 15 a 25 cm de profundidad, que generalmente se conocen como piso de arado (Pramila y Son, 1991; Torrento y Solé-Benet, 1992).

Un horizonte compactado, es aquel que tiene partículas primarias y agregados densamente empacados; posee pocos poros, es relativamente impermeable, ofrece resistencia al paso de las raíces y por consiguiente; éstas exploran una parte pequeña de la masa del suelo, es de consistencia firme y generalmente su densidad aparente es relativamente alta (McKeague *et al.*, 1987).

La firmeza del suelo es función del número de contactos de partículas, de la firmeza de las partículas mismas y de la resistencia al corte, las cuales están definidas por los constituyentes de la fase sólida, líquida y gaseosa (Libert y Horn, 1991). Los contactos entre las partículas son caracterizados por parámetros tales como la distribución del tamaño de poros y la densidad aparente, que opone resistencia a la penetración de un instrumento de sondeo para reflejar la compactación del suelo y depende principalmente del contenido de humedad, textura y tipo de arcilla (Baver *et al.*, 1980).

Prasad y Power (1991), midieron la resistencia a la penetración con penetrómetro de cono a 5 y 13 cm de profundidad, y obtuvieron un valor más grande con no laboreo. En un suelo migajón arcilloso poco profundo de 13 a 25 cm, la resistencia a la penetración resultó significativamente más alta por el grado de compactación (Comia *et al.*, 1994). La disminución de la resistencia a la penetración es una consecuencia directa de la modificación original del suelo por el efecto de la labranza.

La compactación incrementa la densidad aparente, así como la resistencia al corte, reduciendo así mismo la porosidad y consecuentemente la permeabilidad al flujo de aire y agua del suelo (Ohu *et al.*, 1985).

Las conclusiones más importantes de los trabajos de investigación de Prasad y Power (1991) y Comia *et al.* (1994), relacionados con la evaluación de la resistencia mecánica son las siguientes: los suelos no perturbados presentan mayores valores de resistencia a la penetración en comparación con las capas arables de suelos perturbados; en suelos arcillosos la resistencia a la penetración es más alta en la capa de 13 a 25 cm, que la capa superficial del suelo; debido que estos se compactan a la profundidad donde no es laboreada y se forma el piso de arado.

2.1.5 Distribución del tamaño de partículas del suelo

La distribución del tamaño de partículas (DTP), se refiere a las proporciones de partículas de arena, limo y arcilla que se usa para caracterizar la composición del tamaño de granos en el suelo, a la DTP también se le denomina textura. Específicamente la clasificación de texturas se basa en la cantidad de partículas menores de 2 mm de diámetro, si las partículas mayores de 2 mm están presentes en cantidades significativas, al nombre de la textura se le agrega un adjetivo como gravoso o pedregoso (Ortiz y Ortiz 2001).

Por la correlación existente entre la superficie específica y el tamaño de partículas, la distribución centesimal de los diversos tamaños de partículas es un carácter importante del suelo, cuya determinación para caracterizar la DTP es uno de los análisis más comunes en la física de suelos. El éxito de este análisis depende de la preparación de la muestra, para asegurar la dispersión de todos los agregados en partículas primarias sin romperlas y del adecuado fraccionamiento de la muestra en distintos grupos de partículas (Baver *et al.*, 1980).

La DTP del suelo es una característica en extremo importante, porque afecta las propiedades físicas, químicas y biológicas. En términos generales, los suelos se clasifican como de textura gruesa y textura fina. En los suelos de textura fina predomina la arcilla y tienen una mayor superficie activa que los suelos de textura gruesa (arenosos), poseen mayor capacidad de adsorción de nutrientes y usualmente son más fértiles; los suelos arenosos son más porosos y permiten una rápida infiltración del agua.

Los suelos arcillosos son de mayor capacidad de retención de agua, debido a su mayor área superficial y tienen un mayor espacio poroso total que los suelos arenosos. Esta diferencia se debe al mayor número de microporos que actúan en la retención del agua y en los suelos arenosos hay más macroporos que facilitan el movimiento del aire y del agua (Ortiz y Ortiz, 2001).

La DTP del suelo influye en el grado de estructuración, la que a su vez influye en: la cantidad y movimiento de agua que puede almacenar un suelo y la facilidad de abastecimiento de nutrimentos, agua, aire y calor. Si bien la DTP de un suelo no es fácil de cambiar, la estructura puede ser alterada para fomentar la formación de agregados de tamaños variados.

Por ejemplo, los suelos de textura franco, franco arcilloso y franco arenoso con contenidos de materia orgánica de media a alta, conservan una estructura favorable durante periodos largos, requiriendo un mínimo de laboreo. En cambio los suelos arcillosos con alto porcentaje de arcilla y limos tienen una fuerte tendencia a compactarse, restringiendo el movimiento de agua y nutrientes; por lo tanto, a menos que se logre estabilizar su estructura necesitan de la labranza (Lomelí, 1996).

2.1.6 El pH del suelo

Los suelos bajo el sistema de labranza de conservación presentan una tendencia a acidificarse en la superficie, debido a la fertilización nitrogenada con fuentes amoniacales. Durante el proceso de nitrificación de los fertilizantes amoniacales se produce una reacción ácida que sería dañina en suelos medianamente ácidos, no así en suelos alcalinos con alta capacidad amortiguadora del pH (Figueroa y Morales, 1992).

El cambio de un sistema de labranza tradicional a labranza de conservación lleva a una reducción del pH del suelo, debido a adiciones fuertes de fertilizantes nitrogenados, principalmente en la capa de 0-10 cm de profundidad, lo que puede disminuir el rendimiento de los cultivos por una disminución del calcio intercambiable y un incremento en aluminio y magnesio (Pierce *et al.*, 1994); sin embargo, Rhoton *et al.* (1993), en sus trabajos investigación encontraron una interacción entre pH y el contenido de materia orgánica favorable, es decir, que las concentraciones relativamente altas de H⁺ intercambiable de la materia orgánica impiden un contenido alto de cationes básicos.

2.1.7 Materia orgánica del suelo

La materia orgánica (MO) del suelo proviene de la degradación de las raíces, residuos de plantas y organismos vivos o muertos del suelo. Normalmente representa de 1 al 6% en peso, es de gran importancia por su influencia en la estructura del suelo, en la capacidad de retención de agua, nutrientes, y en los efectos bioquímicos de sus moléculas sobre las plantas. Una parte considerable de la MO está formada por varios organismos, que a su vez crecen a partir de restos o de enmiendas orgánicas.

La materia orgánica disminuye la densidad aparente del suelo (por tener una menor densidad que la materia mineral), contribuye a la estabilidad de los agregados, mejora la tasa de infiltración y la capacidad de retención de agua. El humus (porción bien descompuesta y estabilizada de la MO) constituye un almacén para los cationes intercambiables y aprovechables (K, Ca y Mg) y al ser una sustancia semejante a un gel, se combina y recubre las partículas inorgánicas del suelo, para formar agregados; estos agregados son muy estables y resistentes a la desintegración (Lado *et al.*, 2004). Comúnmente la materia orgánica otorga “cuerpo” a los suelos livianos y ayuda a prevenir la compactación en los suelos arcillosos pesados.

La función más importante de la MO es el aumento de la capacidad de intercambio catiónico (CIC); si no ocurrieran reacciones de intercambio de bases o cationes en el suelo, la disponibilidad de nutrientes para las plantas se vería reducida fuertemente. Además son los principales factores que afectan la estabilidad de agregados que están asociados con la distribución del tamaño de partículas y a los niveles de materiales cementantes (Pagliai, 2003). Los ácidos húmicos y fúlvicos ayudan de dos formas a una mayor disponibilidad de nitrógeno para las plantas: 1) estimulan a los microorganismos del suelo, que contribuyen a la mineralización del humus, liberando nitrógeno en forma de amonio y nitratos asimilables por las plantas; y 2) al formar parte del complejo arcilloso húmico, son capaces de retener los cationes amonio, evitando pérdidas por lixiviación (Domínguez *et al.*, 2009).

Los numerosos organismos del suelo y sus clases son grandemente influenciados por los niveles de MO que incluyen virus microscópicos, bacterias, hongos, protozoos, artrópodos de tamaño pequeño y mediano, lombrices, etc. Por ejemplo, existen alrededor de 1 014 bacterias, 109 hongos, 107 nematodos y 102 lombrices por metro cuadrado de suelo (Domínguez *et al.*, 2009).

La descomposición de la materia orgánica produce sustancias y aglutinantes microbianos que favorece y estabiliza la estructura deseable del suelo, especialmente beneficiosa en suelos arcillosos con problemas de circulación de agua. Muchas de las moléculas orgánicas producidas por microorganismos favorecen la agregación al formar compuestos con la arcilla. A su vez, las raicillas y los micelios de los hongos ayudan a conservar los agregados, e igual ocurre con los exudados gelatinosos segregados por muchos organismos (plantas y bacterias).

Desde el punto de vista agrícola, la materia orgánica (MO) es medida en porcentaje y de acuerdo al origen y tipo de constituyentes, ha sido dividida conceptualmente en diversos reservorios (Jenkinson y Rayner, 1977). En la capa arable, estos últimos son difíciles de delimitar, tanto según su constitución bioquímica, como su estructura física (Stockdale *et al.*, 1997). Los reservorios mencionados, frecuentemente se encuentran asociados a partículas minerales elementales de distinto tamaño, formando agregados organominerales (Duxbury y Nkambule, 1994), recubriendo los distintos minerales, o encontrándose al interior de la matriz arcillosa del suelo (Hassink *et al.*, 1997).

A pesar de ciertas diferencias que persisten en la literatura, sobre el nombre y número de los diferentes grupos de reservas orgánicas (RO) de MO, se les puede agrupar según su susceptibilidad al ataque microbiano, del siguiente modo (Galvis, 1998).

- a) Reservas orgánicas activas lábiles (ROAL). Son constituyentes de reciente depósito o incorporación, de baja estabilidad, que en condiciones de campo se mineralizan en menos de un año. Por su composición química son azúcares, aminoácidos, hemicelulosas, celulosas, etc (De Jager *et al.*, 1998).
- b) Reservas orgánicas activas estabilizadas (ROAE). Son compuestos no humificados de mineralización más lenta (Janssen, 1993), derivada de su composición (compuestos lignificados, Paustian *et al.*, 1997), o de la protección física al ataque microbiano, que existe en el interior de la matriz arcillosa.
- c) Reservas orgánicas pasivas (ROP). Son materiales humificados (como es el caso de los ácidos húmicos y fúlvicos), que por su composición bioquímica se mineralizan muy lentamente y que no contribuyen en el corto plazo a la nutrición de los cultivos $<3 \text{ kg N ha}^{-1}$ por año, en condiciones óptimas de humedad y temperatura (Cabrera, 1993). Su aporte sólo se considera al simular la dinámica del carbono (Greenland, 1994) y nitrógeno (Campbell *et al.*, 1996), en períodos mayores de 20 años.

2.2 La agricultura sustentable

Se entiende por desarrollo agrícola sustentable, aquel desarrollo en el cual se busca establecer un sistema de producción conservador de recursos, ambientalmente sano y económicamente viable; que provea de alimentos sanos y de alta calidad a las familias y a las comunidades en general.

El concepto de agricultura sustentable se formuló al inicio de la décadas de los ochentas, ligado al concepto de agricultura regenerativa, que se refiere a una agricultura de recuperación basada en conceptos ecológicos, actualmente se identifican distintas corrientes de agricultura sustentable orgánica, ecológica, de bajos insumos, etc (Rodale, 1984; Jackson, 1985).

Reidntjes *et al.* (1995), definen a la agricultura sustentable como un sistema de producción agraria conservador de recursos, que sea ecológicamente sano, económicamente viable, socialmente justo, humano y adaptable.

- Ecológicamente sano. Implica que la calidad de los recursos naturales y del ecosistema entero se mantiene.
- Económicamente viable. Significa producir lo mismo con suficiente margen de ganancia, conservando el recurso y reduciendo el riesgo.
- Socialmente justa. Que requiere una distribución de los recursos y el poder que permitan la satisfacción de las necesidades básicas de todos los miembros de la sociedad y la seguridad del derecho al uso de la tierra, capital, asistencia técnica y oportunidades de mercado. Se fomenta la oportunidad de que todos los habitantes participen en la toma de decisiones.
- Humano. Se logra respetando todas las formas de vida y los valores humanos básicos, tales como la confianza, honestidad, respeto por sí mismo, cooperación y compasión. Se preserva y cultiva la integridad espiritual y cultural de la sociedad.
- Adaptable. Supone que este sistema se adecua a las condiciones cambiantes de los protagonistas del desarrollo en una comunidad o una región, manteniendo la eficiencia del sistema productivo.

Al hablar de sistemas productivos diferentes al tradicional suele haber confusión al escuchar hablar de agricultura sostenible, orgánica, biointensiva, agroecológica, términos que en su totalidad buscan lo mismo con una u otra pequeña diferencia. En resumen todos persiguen integrar procesos naturales, reducir la entrada de insumos al sistema productivo, mejorar la relación suelo planta, mejorar la eficiencia y manejo de la producción, así como la obtención de productos que mejoren y protejan la salud.

De acuerdo con Masera *et al.* (1999), un sistema sustentable debe tener las siguientes siete características básicas:

- Productividad. Es la capacidad del agroecosistema para brindar el nivel requerido de bienes y servicios.
- Estabilidad. Es la capacidad del sistema de tener un estado de equilibrio dinámico estable; es decir, implica que sea posible mantener los beneficios proporcionados por el sistema en un nivel no decreciente a lo largo del tiempo, bajo condiciones promedio o normales.
- Resiliencia. Es la capacidad del sistema de retornar al estado de equilibrio o mantener el potencial productivo después de sufrir perturbaciones graves.
- Confiabilidad. Se refiere a la capacidad del sistema de mantener su productividad o beneficios deseados en niveles cercanos al equilibrio, ante perturbaciones normales al ambiente.
- Adaptabilidad (o flexibilidad). Es la capacidad del sistema de alcanzar nuevos niveles de equilibrio, que le permitan continuar siendo productivo ante cambios en el ambiente.
- Equidad. Es la capacidad del sistema para distribuir de manera justa los beneficios y costos relacionados con el manejo de los recursos naturales.
- Autodependencia (o autogestión). Es la capacidad del sistema de regular y controlar sus interacciones con el exterior.

El concepto de sustentabilidad, es la capacidad del sistema ecológico de proveer bienes y servicios que satisfagan las necesidades actuales sin comprometer su aprovisionamiento a futuro. Pero quien determina la capacidad del sistema ecológico para mantener a una población determinada, no solo es el sistema ecológico *per se*, sino la interacción hombre naturaleza y las relaciones entre los hombres mismos. Por lo que la sustentabilidad está en función de las relaciones que los hombres establecen entre sí (dimensión social), la transformación que hagan de la naturaleza con los instrumentos y tecnologías que dispongan (dimensión económica) y la capacidad misma de la naturaleza para desarrollar (dimensión ecológica) y recuperarse de la acción del hombre (Casas *et al.*, 2001).

Harwood (1990), definió agricultura sustentable como una agricultura que puede desarrollarse indefinidamente en beneficio del hombre, incrementando la eficiencia del uso de los recursos y manteniendo un equilibrio con el ambiente. Lal *et al.* (1990) por su parte la definen como la transformación más eficiente y económica de la energía solar a la forma de productos agrícolas, sin degradar la productividad del suelo o la calidad del ambiente.

American Society of Agronomy (1999), define que una agricultura sustentable es aquella, que en el largo plazo, promueve la calidad del medio ambiente y los recursos base de los cuales depende la agricultura; provee las fibras y alimentos necesarios para el ser humano; es económicamente viable y mejora la calidad de vida de los agricultores y la sociedad en su conjunto.

Altieri (1994), se refiere a la agricultura sustentable como un modo de agricultura que intenta proporcionar rendimientos sostenidos a largo plazo mediante el uso de tecnologías y prácticas de manejo que mejoren la eficiencia biológica del sistema. Por lo tanto, la agricultura sustentable es un concepto genérico, por lo que su especificidad y concreción debe determinarse a escala local y regional; y este concepto varía con la disciplina del pensador y con la escala del sistema de estudio. Además el reto para hacer operativo el concepto de agricultura sustentable implica simultáneamente un serio esfuerzo teórico y cierta dosis de pragmatismo (Maserá *et al.*, 2000).

2.3 La productividad agrícola

La productividad agrícola está en función de interacciones complejas entre el cultivo y los diversos factores edáficos, climáticos y agronómicos que conforman al agroecosistema, delimitado dentro de un ámbito socioeconómico específico (Dreschel y Gyiele, 1999). Los factores edáficos (mineralogía, textura, estructura, profundidad del suelo, grado de compactación, pendiente, etc), climáticos (precipitación, temperatura, humedad relativa, vientos, heladas, granizo, etc), agronómicos (frecuencia e intensidad de la labranza, aplicación de abonos orgánicos e inorgánicos, sistema de riego, rotación o secuencia de cultivos, variedades, control fitosanitario, tipo, etc) y socioeconómicos (superficie de la unidad de producción, idiosincrasia del agricultor, política agrícola gubernamental, capacitación técnica, crédito, mercado, tenencia de la tierra, etc), influyen positiva o negativamente sobre la productividad potencial.

El efecto de los diversos factores sobre el rendimiento de los cultivos puede presentarse de manera eventual y aislada en un ciclo agrícola en particular, o bien, ocurrir en conjunto y de forma persistente. También se señala que, durante la generación de una tecnología para manejar en forma sustentable los agroecosistemas, no es conveniente modificar todos los factores que potencialmente repercuten sobre la productividad de un agroecosistema, sino más bien identificar las variables que más influyen y que tienen la mayor probabilidad de ocurrencia (Defoer *et al.*, 1998).

Dentro de este contexto, la investigación edafológica se ha centrado recientemente en dos aspectos asociados a los índices de calidad de los suelos (Doran *et al.*, 1994; Sánchez *et al.*, 1997) y que se refieren a: 1) la búsqueda y selección de índices físicos, químicos y biológicos, que representen el conjunto de propiedades o atributos que configuran la naturaleza edáfica (Brand y Pfund, 1998), y que a su vez se asocien con la productividad del agroecosistema (Chertkov y Komarov, 1997); y 2) evaluación de la sensibilidad de dichos índices, para detectar el impacto de la labranza y prácticas agrícolas sobre las propiedades de los suelos relacionadas con la sostenibilidad del agroecosistema (Barbier, 1998).

2.3.1 Los cultivos de haba, maíz y frijol

El haba es una planta robusta que desarrolla follaje abundante y tienen una altura promedio de 93.7 cm, con un rango entre 55 y 137 cm; con hojas alternas, compuestas, folíolos anchos ovales-redondeados, de color verde. Flores axilares, agrupadas en racimos cortos de 2 a 8 flores, posee una mancha grande de color negro o violeta en las alas. Fruto tipo legumbre de longitud variable que puede alcanzar hasta 35 cm. El número de granos oscila entre 2 y 9. El color de la semilla es verde, amarillento, morada etc. Son plantas susceptibles a enfermedades y llegan a existir pérdidas hasta de 100% causadas por pudrición de la raíz (Solórzano, 1993).

El haba es cultivada en la región denominada “Valles Altos” con numerosos tipos de variedades criollas, las variedades difieren en el rendimiento, tamaño y color (blanco, amarillo, morado, etc). El rendimiento potencial de las habas varía entre 4.8 y 6.6 t ha⁻¹ dependiendo de la variedad (Karamanos y Papatheohari, 1999). El rendimiento promedio nacional de este cultivo es de 616 kg ha⁻¹, como consecuencia de la fuerte incidencia de enfermedades y amplias variaciones ambientales, causada principalmente por bajas y erráticas precipitaciones (INEGI, 2007).

El maíz con una superficie cultivada de 148 millones de hectáreas, ocupa el tercer lugar de la superficie agrícola mundial tan sólo después del trigo y arroz. En México es un grano básico y entre los cereales cultivados ocupa el primer lugar con 73% de la superficie, cerca de ocho millones de hectáreas cultivadas, en los sistemas de riego (13%) y temporal (87%), con un rendimiento promedio de 2.6 t ha⁻¹ (Arellano *et al.*, 2003). Los rendimientos potenciales de maíz reportados son de 21 a 23 t ha⁻¹ (Duvick y Cassman, 1999).

El maíz, al igual que los demás vegetales, la limitación de agua frecuentemente induce una disminución en el crecimiento y cuando es severa, llega a producir daños en los tejidos o hasta causar la muerte. La respuesta de las plantas al déficit de agua depende de varios factores, tales como: la duración y el grado de estrés, la etapa de desarrollo de la planta y la especie vegetal de que se trate (Mancera, 2005). La sequía en los trópicos causa pérdidas anuales de 17% en promedio en el rendimiento de maíz y en regiones como el sureste de África alcanza hasta 66% en los periodos críticos de agua (Edmeades *et al.*, 1999).

El estrés hídrico en maíz es crítico particularmente dos semanas antes y una después de la floración (Grant *et al.*, 1989), y puede provocar esterilidad posiblemente por una reducción del flujo de asimilados para el desarrollo de las mazorca, por debajo de un nivel mínimo necesario que pueda sostener la formación de granos y crecimiento (Zinselmeier *et al.*, 1995). Desde el punto de vista de producción de cultivos, el rendimiento bajo un tipo de estrés, como la sequía, generalmente tiene comportamientos más bajos de varianza genética que resulta de bajas heredabilidades; más aún, el rendimiento bajo estrés es un estimador pobre de resistencia a sequía, debido a que no se estima adecuadamente el rendimiento potencial en condiciones sin estrés (Ramírez, 1992).

El frijol es un cultivo con tradición cultural que tiene gran impacto económico y social en ciertas regiones de México; se estima que en la actualidad, en el territorio nacional, se siembra 2.22 millones de hectáreas con 20 variedades y 50 criollas; no obstante México tiene un rendimiento promedio de 0.629 t ha⁻¹ (Ortega y Ochoa, 2003). A nivel mundial hay reportes de rendimientos de 4 a 6 t ha⁻¹ (Singh *et al.*, 2003). El frijol se cultiva principalmente con el fin de cosechar semilla seca y en menor proporción para la producción de vaina, éste puede consumirse fresco, enlatado o congelado.

El frijol tiene una capacidad de fijar nitrógeno del aire; la fijación se realiza bajo condiciones apropiadas, por la presencia de ciertas bacterias simbióticas. Esta capacidad se aprovecha sobre todo, cuando se practican la rotación de cultivos y los cultivos asociados.

El frijol pertenece al género *Phaseolus*, este comprende un amplio número de especies que incluyen hierbas anuales, perennes, erectas y volubles. Las hojas, el tallo o la planta completa constituyen un alimento excelente para el ganado como forraje verde o seco. Estas plantas pueden servir también para el mejoramiento del suelo como abono verde. El ciclo de vida del frijol depende de las variedades y en cierta medida de las condiciones ambientales, la sequía y temperaturas altas inducen una maduración temprana, las variedades arbustivas son más precoces que las trepadoras de crecimiento indeterminado (Rosales, 2004).

La altura del frijol de forma arbustiva y de crecimiento determinado varía entre 30 y 90 cm. Existen otros tipos como el frijol trepador de crecimiento indeterminado que alcanza alturas de dos o más metros. Tiene una raíz principal que puede alcanzar una profundidad de uno a dos metros; en las raíces laterales se desarrollan nódulos donde se encuentran las bacterias simbióticas que fijan nitrógeno del aire. Sus hojas son trifoliadas y pubescentes que varían de tamaño de acuerdo a la variedad, la inflorescencia es en forma de racimo y nace en la axila de las hojas, la flor está formada de cinco pétalos, diez estambres y un pistilo.

2.4 La calidad del suelo

Calidad del suelo es un concepto equivalente al de salud del suelo. Por lo general, el primero es más usado en el ámbito científico, mientras que el segundo es más empleado por los agricultores, en especial de los países desarrollados. No se conoce mucho acerca de la percepción de la calidad del suelo, que tienen los productores de los países en desarrollo y la materia requiere de estudios y análisis en colaboración con los científicos sociales.

En el pasado los suelos de buena calidad eran considerados, como aquellos que permitían maximizar la producción y minimizar la erosión así como otros efectos ambientales adversos. Una idea relacionada con la calidad del suelo es la capacidad de sustentabilidad, definida como el número de individuos que pueden ser mantenidos en un área dada (Budd, 1992).

La calidad del suelo puede ser conceptualizada según Doran *et al.* (1994) y Karlen *et al.* (1997), con base en la función y balance de tres componentes principales: 1) la capacidad de un suelo para promover la productividad del sistema, sin deteriorar sus propiedades físicas, químicas y biológicas (productividad biológica sustentable); 2) la capacidad del suelo para atenuar contaminantes ambientales y patógenos (calidad ambiental); y 3) la interrelación entre calidad del suelo y la salud de plantas, animales y humanos (salud de plantas y animales). Por lo tanto, la calidad del suelo es entonces, la capacidad para funcionar dentro de los límites de un ecosistema é interactuar positivamente con su ambiente externo.

Parr *et al.* (1992), definen calidad de un suelo, como la capacidad que este tiene para producir cultivos sanos y nutritivos en forma sostenida a largo plazo y promover al mismo tiempo, la salud humana y animal sin deterioro de los recursos naturales.

Autores como Acton y Gregorich (1995), mencionan que el concepto de calidad del suelo es sinónimo de salud del suelo, y definen calidad del suelo para fines agrícolas como la capacidad para producir cultivos sin provocar uno u otro daño al medio ambiente.

2.4.1 Indicadores de calidad del suelo

Dumanski (1994), sostiene que es necesario contar con descriptores que representen fielmente los cambios y tendencias (indicadores), los cuales deben ser usados para monitorear y evaluar los programas, pero que dichos descriptores no puede ser un grupo seleccionado para cada situación particular, sino que debe ser idéntico en cada caso, con el propósito de poder hacer comparaciones a nivel nacional é internacional, que sean validas.

Los indicadores son instrumentos de análisis que nos permiten simplificar, cuantificar y comunicar fenómenos complejos. Estos se aplican a muchos campos del conocimiento (economía, salud, recursos naturales, etc) (Bautista *et al.*, 2004).

Un indicador describe un proceso específico o un proceso de control; por lo tanto, son particulares a los procesos de los que forman parte. Algunos indicadores o propiedades para ciertos sistemas pueden ser inapropiados para otros; por esta razón, no existe una lista de indicadores universales (Blakkes *et al.*, 1994).

Por ejemplo, a escala comunitaria el indicador tasa de deforestación podría describir indirectamente el proceso de deterioro del suelo, pero en la escala de parcela este indicador no diría mucho, por lo que sería más conveniente utilizar el nivel de erosión o la cantidad de materia orgánica del suelo.

En la selección y elaboración de indicadores es necesario definir un modelo que permita estructurar información muy diversa y dispersa. Los indicadores son un punto medio entre la exactitud científica y la demanda por información concisa, con tal de simplificar las relaciones complejas que se presentan entre las actividades económicas, las necesidades humanas y el medio natural (Casas *et al.*, 2001).

El conjunto de indicadores utilizados para el proceso de evaluación debe ser robusto y no necesariamente exhaustivo. Robusto en el sentido de que sean sensibles y que tengan una base estadística o de medición suficiente (De camino y Muller, 1993). Los indicadores deben permitir medir cambios de las características del sistema en el periodo considerado para la evaluación. Por ejemplo, parámetros que prácticamente no cambian con el tiempo, como el porcentaje de arcilla en el suelo o la densidad de la madera, no pueden usarse como indicadores. En cambio, variables como el porcentaje de cobertura vegetal o el contenido de materia orgánica, si cambian con el tiempo y reflejan procesos como la erosión o la capacidad de retención de agua, por lo que pueden resultar buenos indicadores (Blakkes *et al.*, 1994; Dumanski, 1994).

También los indicadores de calidad del suelo pueden estar constituidos por una sola variable, como comúnmente lo entendemos, pero también por la relación entre variables como el índice de estructura del suelo; es decir, un índice también puede ser un indicador (Oleschko *et al.*, 1993). Según Hunnmeyer *et al.* (1997) menciona que la ventaja del uso de indicadores, es contar con la posibilidad de describir los aspectos más importantes de la sustentabilidad respecto a una decisión o conjunto de decisiones en forma desagregada. Así que habría indicadores de calidad del suelo aplicable a diferentes escalas, nacional, regional y de sitio.

Como definición de indicadores de calidad del suelo, se han propuesto propiedades físicas, químicas y biológicas, procesos y características que puedan ser medidas para monitorear los cambios que ocurren el suelo (SQI, 1996). Estos se describen de la siguiente manera:

- Indicadores físicos. Son aquellas propiedades que reflejan la manera en que ésta acepta, retiene y proporciona el agua a las plantas, así como las limitaciones para el crecimiento de raíces, emergencia de plántulas, infiltración y movimiento del agua dentro del perfil del suelo. Algunos de ellos son: la estructura, profundidad, infiltración, densidad aparente, capacidad de retención de agua, compactación, porosidad, conductividad hidráulica, estabilidad de agregados, resistencia a la erosión, pendiente, etc (Karlen *et al.*, 1997).
- Indicadores químicos. Son aquellas propiedades que inciden sobre la relación suelo-planta, calidad del agua, capacidad amortiguadora del suelo y disponibilidad de nutrientes para las plantas y microorganismos. Algunos de ellos son: pH, conductividad eléctrica, N-P-K extractables, materia orgánica, carbono orgánico total y lábil, capacidad de intercambio catiónico (CIC), capacidad de adsorción de fosfatos, contenido de micronutrientes disponibles, etc (Larson y Pierce, 1991; Doran y Parkin, 1994).
- Indicadores biológicos. Se derivan de la presencia de los múltiples organismos que viven en el suelo, donde realizan una extensa variedad de funciones esenciales, como la descomposición de la materia orgánica, el reciclaje de nutrientes, la asociación con plantas, la degradación de residuos tóxicos, el control biológico de plagas y enfermedades, la formación de estructura del suelo y control de la disponibilidad nutricional. Algunos indicadores biológicos son: la biomasa microbiana, poblaciones de lombrices y nematodos, tasas de respiración microbiana, mediciones de actividad microbiana a través de subproductos, presencia de enzimas microbiológicas, carbono (C) y nitrógeno (N) de la biomasa microbiana, materia orgánica, fijación biológica de N, N potencialmente mineralizable, etc (Kennedy y Papendick, 1995; SQI, 1996).

En la evaluación de la calidad del suelo se deben considerar tanto las dimensiones temporales como las espaciales. Ninguna propiedad del suelo es permanente, por lo que la tasa y frecuencia de cambio de éstas varía ampliamente. El área para evaluar la calidad edáfica puede ser tan pequeña como una parcela, tan grande como una nación o incluso todos los suelos del mundo. Se ha pensado que el empleo de indicadores de calidad del suelo es una alternativa a tal complejidad que deberían incluir mediciones de ciertas propiedades del suelo, funciones y condiciones que proporcionen indicadores útiles de la calidad edáfica (Acton y Gregorich, 1995).

2.4.2 Características de los indicadores de calidad del suelo

Utilizar todas las propiedades del suelo como indicadores sería imposible; por lo cual, para un tipo específico de suelo, se debe hacer una identificación y selección de un mínimo de aquellas que puedan proveer información acerca de que tan adecuadamente está funcionando. En consecuencia, se pretende que los indicadores tengan algunas de las características que a continuación se indican (Doran y Parkin, 1994; Gregorich *et al.*, 1994).

- Integren propiedades y procesos físicos, químicos y biológicos del sitio de estudio.
- Sean descriptores de proceso del sistema.
- Sean fáciles de medir, susceptibles de monitorear y basados en información fácilmente disponible.
- Su medición pueda ser reproducible.
- Sean aplicados a un rango de ecosistemas y condiciones culturales y socioeconómicas de la región de estudio.
- Sean sensitivos a variaciones en clima y manejo.
- Reflejen la característica de sustentabilidad que se quiera medir.
- Sean sencillos de entender.
- Sean sensitivos para detectar cambios en el suelo como resultado de la degradación antropogénica.
- Permitan medir los cambios en las características de los sistemas en periodos cortos.
- Que puedan obtenerse de un conjunto de datos ya existentes.

Los indicadores de calidad del suelo se pueden considerar como herramientas para la toma de decisiones, que brinden información sobre aspectos críticos y consecuencias. Con el propósito de proteger y mejorar a largo plazo la productividad agrícola, la calidad del agua, el aire y el hábitat de organismos vegetales y animales. En el contexto agrícola, la calidad del suelo puede ser manejada para maximizar la producción sin efectos ambientales adversos, mientras que en ecosistemas naturales, la calidad del suelo puede ser observada como un valor de referencia, contra el cual pueden ser comparados los futuros cambios en el sistema (Singer y Ewing, 2000).

2.5 Elementos de geoestadística

El desarrollo de la variabilidad espacial o geoestadística es conocida en la ciencia del suelo, como una herramienta que ocupa un lugar importante, debido que ofrece el entendimiento cuantitativo del comportamiento de las variables en el espacio (Webster, 1985). Por variabilidad espacial se entiende a los cambios en propiedades del suelo a lo largo del terreno. Estos cambios pueden ser fácilmente vistos en un mapa de rendimiento de cultivo, para lo cual se necesita recopilar datos en posiciones precisas.

La geoestadística, se define como la aplicación de la teoría de funciones aleatorias al reconocimiento y estimación de fenómenos naturales o simplemente, el estudio de las variables numéricas distribuidas en el espacio (Chauvet, 1994). Su punto de partida es asumir una intuición topo-probabilista de los fenómenos distribuidos en el espacio; por ejemplo, un yacimiento mineral presenta un carácter mixto, un comportamiento caótico o aleatorio a escala local, pero a la vez estructural a gran escala (Figura 2.1).

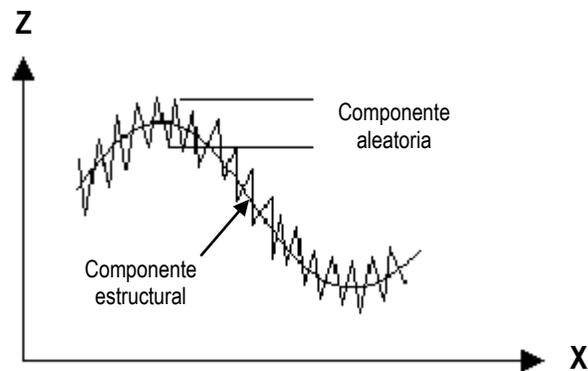


Figura 2.1. Carácter mixto de una función aleatoria.

Se puede entonces sugerir la idea de interpretar este fenómeno en términos de función aleatoria (FA); es decir, a cada punto x del espacio se le asocia una variable aleatoria (VA) $Z(x)$, para dos puntos diferentes x e y , que tendrán dos variables aleatorias $Z(x)$ y $Z(y)$ diferentes pero no independientes, y es precisamente su grado de correlación el encargado de reflejar la continuidad de la mineralización o de cualquier otro fenómeno en estudio, de modo que el éxito de esta técnica es la determinación de la función de correlación espacial de los datos (Zhang *et al.*, 1992).

Su estimador el krigado, tiene como objetivo encontrar la mejor estimación posible a partir de la información disponible y en efecto, el valor estimado obtenido $Z^*(x)$ de un valor real y desconocido $Z(x)$, consiste en una combinación lineal de pesos asociados a cada localización donde fue muestreado un valor $Z(x_i)$ con $i=1, \dots, n$ del fenómeno estudiado, observando dos condiciones fundamentales: 1) que el estimador sea insesgado con $E[Z^* - Z] = 0$; y 2) que la varianza $\text{Var}[Z^* - Z]$ sea mínima, consiguiéndose de este modo minimizar la varianza de error de estimación.

2.5.1 Variables aleatorias regionalizadas

Desde el punto de vista matemático, una variable regionalizada es una función $f(x)$, que toma valores en todos los puntos x de coordenadas en el espacio tridimensional (x_i, y_i, z_i) . En términos teóricos es oportuno aclarar que una variable aleatoria (VA), es una variable que puede tomar ciertos valores de acuerdo a cierta distribución de probabilidades. Un valor medido en cada punto x_i es considerado como una realización $Z(x_i)$ de una VA $Z(x_i)$ cuya media es $M(x_i)$.

En los puntos x donde no existen valores medidos es desconocida la propiedad que se estudia, pero están bien definidos y pueden asimismo considerarse variables aleatorias $Z(x)$. Al conjunto de todas las mediciones $Z(x)$ en el área de estudio de la variable regionalizada puede considerarse, como una realización particular del conjunto de variables aleatorias ($Z(x), x \in \text{área de estudio}$). A este conjunto de variables aleatorias se llama función aleatoria y se escribe $Z(x)$ (Armstrong y Carignan, 1997).

De modo que al extender el concepto de función aleatoria al espacio de una o más dimensiones, aparece la noción aleatoria y estructural de una variable regionalizada: primero $Z(x)$ como VA y segundo que las variables aleatorias $Z(x)$ y $Z(x+h)$ no son en general independientes, donde $Z(x)$ es la variable de la localidad x , y $Z(x+h)$ es la variable de la localidad x más la distancia h del mismo vector, x y $x+h$ son posiciones con uno, dos o tres coordenadas espaciales y h es un vector con dirección y distancia, conocido con el nombre de "lag".

2.5.2 El semivariograma experimental

El semivariograma, se define como la media aritmética de todos los cuadrados de las diferencias entre pares de valores experimentales separados por una distancia h (Webster y Oliver, 2001); o de manera semejante, se dice que es la varianza de los incrementos de la variable regionalizada en las localizaciones separadas por una distancia h . Para el par de valores $Z(x)$ y $Z(x+h)$ su varianza S^2 es: $S^2 = [Z(x) - \bar{z}]^2 + [Z(x+h) - \bar{z}]^2$ y desde el punto de vista estadístico se ha demostrado que $S^2 = \frac{1}{2}[Z(x) - Z(x+h)]^2$, se llama semivarianza por que está dividido entre dos, y si tenemos m pares de observaciones separados por el mismo lag (h) la semivarianza promedio se calcula como:

$$S^2 = \frac{1}{2m} \sum_{i=1}^m [z(x_i) - z(x_i+h)]^2 \quad (2.1)$$

De la ecuación (2.1) generalizada, se tienen dos supuestos: primero que la esperanza matemática del valor de una propiedad en una localidad sea la media, μ , $E[Z(x)] = \mu$; y segundo que para cualquier diferencia $Z(x) - Z(x+h)$ con lag h tiene una varianza finita, lo cual es independiente de x , entonces se tiene que: $\text{Var}[Z(x) - Z(x+h)] = E\{[Z(x) - Z(x+h)]^2\} = 2\gamma(h)$; estas dos suposiciones constituyen la hipótesis intrínseca de la teoría de la variable regionalizada, obteniendo finalmente la ecuación (2.2).

$$\gamma(h) = \frac{1}{2(n-h)} \sum_{i=1}^{n-h} [z(x_i) - z(x_i+h)]^2 \quad (2.2)$$

Donde:

$\gamma(h)$ = Semivarianza

n = número de observaciones

h = es el incremento (lag)

$z(x_i)$ = son los valores experimentales

x_i = localizaciones donde son medidos los valores $z(x_i)$.

2.5.3 Parámetros del semivariograma

Los parámetros del semivariograma caracterizan tres elementos importantes en la variabilidad de un atributo que son: la discontinuidad en el origen (efecto de pepita o nugget), el valor máximo de variabilidad (meseta o sill), y el área de influencia de la correlación (alcance o range), (Figura 2.2); como se presentan en Lamorey y Jacobsom (1995), Wallace y Hawkims (1994) y se describen a continuación.

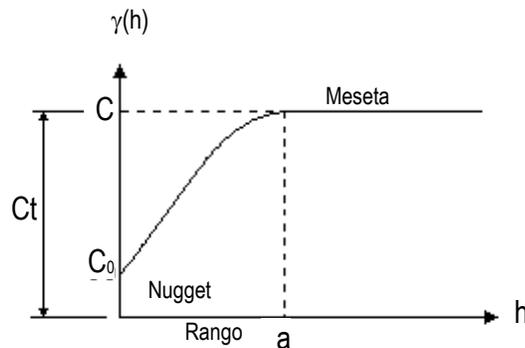


Figura 2.2. Parámetros del semivariograma.

- El efecto pepita (nugget). El semivariograma por definición es nulo en el origen, pero en la práctica las funciones obtenidas pueden presentar discontinuidad en el origen, a esta discontinuidad se le llama efecto de pepita. Puede ser obtenido trazando una línea recta entre los primeros puntos del semivariograma empírico y extenderse ésta, hasta que se intercepte con el eje Y. Si esta intersección ocurre por debajo de cero, el valor asumido por este efecto es cero, pues valores negativos de $\gamma(0)$ no tienen significado y no es común. El efecto pepita se representa como C_0 .
- La meseta (sill). Es el valor de $\gamma(h)$ para el cual, con el aumento de h su valor permanece constante, se representa como $(CT = C + C_0)$ y se denomina meseta. Puede obtenerse trazando una línea paralela a la abscisa y que se ajuste a los puntos de mayor valor del semivariograma y su valor se lee en la intersección de esta línea con la ordenada.
- El rango (range). Es la distancia h para la cual las variables $Z(x)$ y $Z(x+h)$ son independientes, se denomina rango y se representa por (a) ; es decir, las distancias para la cual los valores de la variable dejan de estar correlacionados; de otra forma, se interpreta como la distancia en donde el semivariograma alcanza su meseta. El rango siempre tiene valor positivo y puede ser obtenido a partir de la intersección con las líneas descritas en los puntos anteriores, ese punto leído en la abscisa es una fracción del propio rango.

La característica principal de un semivariograma es que $\gamma(h)$ se incrementa con el aumento de la distancia entre parcelas o unidades de muestreo (h). Éste incremento, en la mayoría de los casos, tiene un límite al que se le denomina umbral (en inglés, "sill"), en cuyo caso se dice que el semivariograma es transitivo. El valor máximo de h donde el umbral se establece se denomina alcance (en inglés, "range"), y es de gran importancia ya que marca el límite de la dependencia espacial y por lo tanto, marca también la distancia límite dentro del cual la interpolación es válida utilizando el procedimiento de krigado (McBratney y Webster, 1986).

2.6 Análisis de conglomerados

El análisis de conglomerados (cluster analysis), es una técnica multivariante que permite agrupar un conjunto de objetos (variables, personas, productos, etc) en grupos relativamente homogéneos, de forma que en cada grupo (conglomerado) los objetos tiendan a ser similares entre sí (alta homogeneidad interna dentro del conglomerado) y diferentes a los objetos de otros grupos (alta heterogeneidad externa entre conglomerados) con respecto a un criterio de selección determinado.

El propósito del análisis de conglomerados es el agrupar las observaciones de forma que los datos sean muy homogéneos dentro de los grupos (mínima varianza) y que estos grupos sean lo más heterogéneos posible entre ellos (máxima varianza). De este modo, obtenemos una clasificación de los datos multivariantes con la que podemos comprender mejor los mismos y la población de la que proceden.

El análisis de conglomerados jerárquico siempre evoluciona paso a paso, uniendo en cada paso los dos elementos de la matriz de distancias que se encuentran más próximos entre sí; en cada paso se funden dos elementos o grupos de elementos. Una vez calculada la matriz de distancias, los dos elementos más próximos (los más similares o menos distantes) son fundidos en un mismo conglomerado. Hay que tener en cuenta que en este momento sólo intervienen dos objetos por tratarse del primer paso del procedimiento. La matriz inicial de los $n \times n$ sujetos o $p \times p$ variables cambia (por que dos de sus filas y dos de sus columnas han sido fundida en una) transformándose en una matriz $(n-1) \times (n-1)$.

Nuevamente al calcular las distancias, en la siguiente etapa del análisis se vuelven a seleccionar los dos elementos de la matriz más próximos entre sí y son fundidos en un nuevo conglomerado. Por supuesto, los dos elementos fundidos en esta segunda etapa pueden ser dos objetos individuales o un objeto individual y el conglomerado ya formado en la primera etapa. En este momento, la matriz de distancias de dimensiones $(n-1)(n-1)$ se transforma en una matriz de distancias de dimensiones $(n-2)(n-2)$, lo que exige volver a calcular las distancias del nuevo conglomerado respecto al resto de elementos de la matriz.

El proceso continúa paso a paso hasta que, finalmente, se logra fundir en un único conglomerado a todos los elementos de la matriz de distancias (de dimensiones finales 2×2); en este punto termina el análisis. Lógicamente, en todo este proceso de fusión no existe una solución única, sino tantas como pasos dan el proceso. La decisión sobre qué solución se considera más satisfactoria puede tomarse en cualquier etapa del proceso, pero lo más lógico y habitual es postergar ésta decisión hasta el momento en que el análisis ha concluido.

Para este estudio en particular, se utilizó el método de suma de cuadrados o de varianza propuesto por Ward (1963), quién argumentó que los conglomerados deberían constituirse de tal manera que, al fundirse dos objetos, la pérdida de información resultante de la fusión fuera mínima. En este contexto, la cantidad de información se cuantifica como la suma de las distancias al cuadrado de cada objeto respecto al centroide del conglomerado al que pertenece. Para ello, supongamos que tenemos h conglomerados y m variables. Se calcula para el conglomerado k el valor SCI_k denominado suma cuadrática intra del grupo k : como se muestra en la ecuación 2.3.

$$SCI_k = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^{n_k} (X_{ij}^k - \bar{X}_i^k)^2 \quad (2.3)$$

Es decir, la suma de las desviaciones cuadráticas de todas las variables (m) para todos los sujetos (n_j) dentro del grupo k , siendo X_{ij}^k , el valor de la variable i para cada objeto j del grupo k y \bar{X}_i^k , el promedio de la variable i en el grupo k .

En cada paso se unen aquellos conglomerados (o elementos) que dan lugar a un menor incremento a la SCE, que se define en la ecuación 2.4.

$$SCE = \sum_{k=1}^h SC_k \quad (2.4)$$

La estructura de formación de conglomerados es decisiva a la hora de la interpretación de los resultados, dado que en cada etapa, un conglomerado concreto tiene un peso específico en la conformación del conglomerado global de la etapa final. Por lo tanto, como un criterio para la selección del número de conglomerados a considerar, es necesario calcular su coeficiente de aglomeración propuesto por Kaufman y Rousseeuw (1990), que consiste en un valor numérico entre 0 y 1, que mide el grado de interrelación de los cluster desde el inicio del proceso, en el que todos los casos son cluster individuales, hasta la conclusión del mismo en el que hay un solo cluster que aglomera todos los casos.

Por ejemplo, en un proceso aglomerativo de n objetos con un análisis de conglomerado jerárquico, sea $d(i)$ el cociente entre la disimilaridad del objeto i cuando se fusiona por primera vez con otro conglomerado y la disimilaridad de la fusión en la última etapa del proceso. En la ecuación 2.5, se define el cociente de aglomeración (CA), del proceso como el siguiente valor numérico (promedio de los valores $1-d(i)$, $i = 1, 2, 3 \dots n$):

$$CA = \frac{\sum_{i=1}^n (1-d(i))}{n} \in [0, 1] \quad (2.5)$$

Cuando el valor de CA es próximo a 1, se dice que el proceso de aglomeración es de estructura fuerte y por el contrario cuando CA es próximo a 0 el proceso es de estructura débil. Puesto que la disimilaridad entre dos objetos o entre objeto y conglomerado es la distancia existente entre ellos, en los términos definidos por los métodos de aglomeración, entonces el cociente $d(i)$ es un valor numérico relativo mayor estrictamente que 0 y menor o igual que 1, con lo que $0 \leq CA \leq 1$.

La denominación de estructura fuerte en el proceso de aglomeración, se puede entender para valores de CA superiores a 0.75 y de la misma forma la debilidad de la estructura quedaría reflejada para valores de CA inferiores a 0.25. La expresión estructura fuerte quiere indicar que la última fusión es muy disimilar, mientras que los conglomerados que se fusionan tienen sus objetos integrantes respectivamente muy poco disimilares; por el contrario, cuanto menos disimilares sean los grupos en la última fusión menos distantes serán los coeficientes de fusión sucesivos y el coeficiente de aglomeración presentará por tanto, una estructura débil con objetos tan poco disimilares que no habrá distinción de agrupaciones.

2.7 Conclusiones sobre la revisión de literatura

La producción agrícola requiere del entendimiento de las propiedades físicas del suelo y sus funciones de la vida real. Algunas de estas funciones varían desde el hábitat de la planta, almacén de agua y energía, en consecuencia, el papel del suelo en el desarrollo de los cultivos indica claramente la relación estrecha que existe entre la productividad del suelo y un cultivo determinado.

El empleo del laboreo intensivo en los sistemas de labranza tradicional sobre la superficie del suelo provoca la pulverización de las partículas del suelo, deformando la estructura éste y afectando en general sus propiedades físicas, la actividad microbiana y el movimiento de agua, entre otros. Es por esto, que se ha evidenciado la necesidad de optimizar las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo, a través de prácticas adecuadas de manejo, con el fin de evitar la degradación de la estructura del suelo sometidos a uso agrícola y restaurar los terrenos que presentan algún tipo de degradación.

Las propiedades físicas del suelo son factores dominantes que determinan la disponibilidad de oxígeno y movimiento de agua en el mismo, condicionando las prácticas agrícolas a utilizarse y la producción del cultivo. Sin embargo, estas propiedades no escapan de los efectos producidos por los distintos tipos de labranza originándose cambios en el ambiente físico del suelo.

Actualmente existe una creciente convicción de la necesidad de disponer de modelos conceptuales, que permitan describir los cambios estructurales del suelo y su relación con otros elementos del sistema, con la finalidad de mejorar el conocimiento de las propiedades físicas y químicas del suelo que constituyen la clave para comprender muchos de los procesos de importancia agrícola y ambiental. Por lo tanto, una de las necesidades de investigación sería el estudio de la variabilidad espacial de las propiedades físicas del suelo y sus propiedades químicas asociadas, mediante técnicas no destructivas que permitan, de una manera rápida y a bajo costo, identificar los principales grupos o patrones de variabilidad espacial y diseñar estrategias para el manejo sustentable del suelo con la implementación de la labranza de conservación.

3. Objetivos, supuestos e hipótesis

Objetivo general

- Establecer las relaciones de variabilidad espacial de las propiedades físicas y químicas del suelo con el rendimiento de haba, maíz y frijol, como estrategia para definir indicadores que permitan predecir su productividad.

Objetivos particulares

- Determinar las propiedades físicas del suelo, a través de la medición de manera rápida e indirecta, mediante el empleo de instrumentos no destructivos del suelo.
- Cuantificar con un alto grado de precisión y exactitud la variabilidad en el espacio de las propiedades físicas y químicas del suelo.
- Encontrar indicadores a partir de las propiedades físicas y químicas que se relacionen con la variación espacial del rendimiento de haba, maíz y frijol.

Supuestos

- Los cultivos de haba, maíz y frijol son adecuados para el clima prevaleciente en el sitio experimental.
- Los nutrimentos y el suministro de agua a los cultivos fueron oportunos y en cantidades suficientes para su desarrollo.

Hipótesis

- Existen indicadores contruidos a partir de las propiedades físicas y químicas del suelo, que explican las variabilidades espaciales del rendimiento de haba, maíz y frijol cultivadas bajo labranza de conservación.

4. Materiales y métodos

4.1 Características del sitio experimental

El área de experimentación se ubicó en el *Campus* Montecillo del Colegio de Postgraduados en Ciencias Agrícolas, Texcoco, Estado de México; cuya posición está determinada por las coordenadas geográficas: 19° 28' 4.26" latitud norte y 98° 53' 42.18" longitud oeste, con una altitud de 2 249.38 m (Figura 4.1). El clima es $C(w_0)(w)b(i)g$; templado subhúmedo con lluvias en verano, el más seco de los subhúmedos, el porcentaje de precipitación invernal respecto al total es menor que 5%, con verano fresco y largo, con una oscilación térmica entre 5 y 7°C, la marcha anual de la temperatura es de tipo ganges (García, 2004).

El suelo es de textura migajón arcillo limoso, de origen aluvial y lacustre, moderadamente bien drenado, clasificado taxonómicamente como Fluvaquentic Endoaquolls, del orden mollisols, suborden aqu (condiciones acuicas), gran grupo Endo (presencia de agua subterránea) y subgrupo Fluvaquentic (Gutiérrez y Ortiz, 1999).

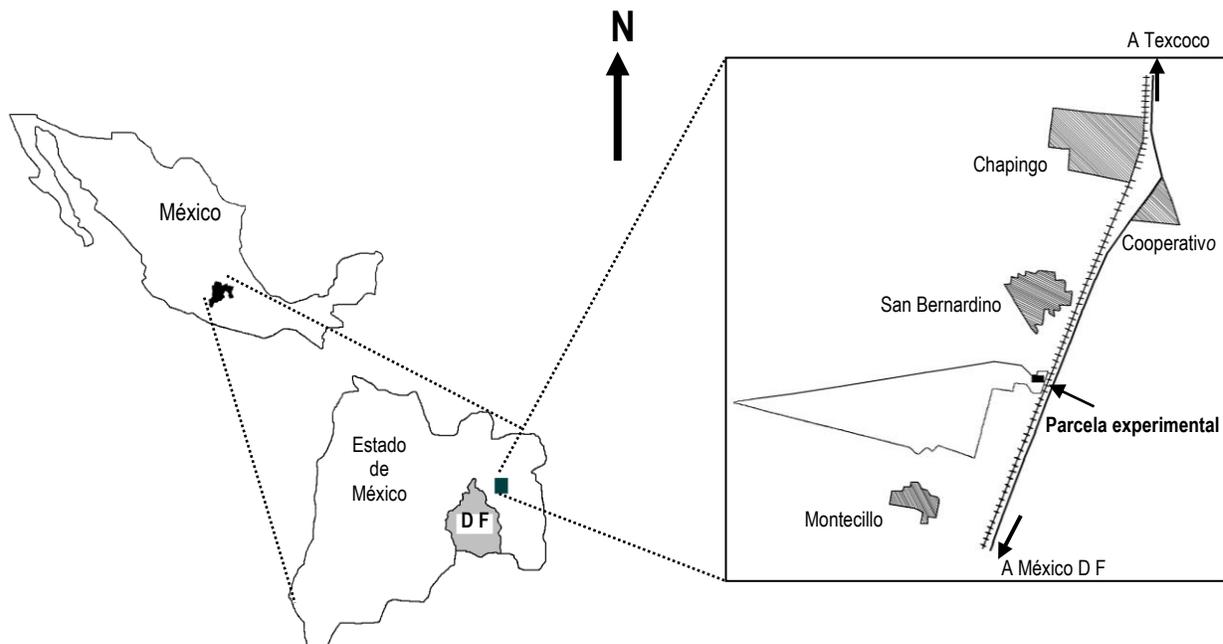


Figura 4.1. Localización del sitio experimental, Colegio de Postgraduados, Montecillo, Texcoco, México.

El sitio experimental tiene 80 metros de ancho por 105 metros de largo, con un superficie de 0.84 hectárea; para el esquema de muestreo sistemático, se hizo una cuadrícula del sitio experimental con distancia entre cada intersección de cinco metros, obteniendo un total de 374 muestras (Figura 4.2). El monitoreo (observaciones del sistema, a nivel macro y micro) se realizó durante otoño-invierno 2005 bajo el enfoque de sistemas, pretendiendo evaluar la dinámica de sus principales componentes.

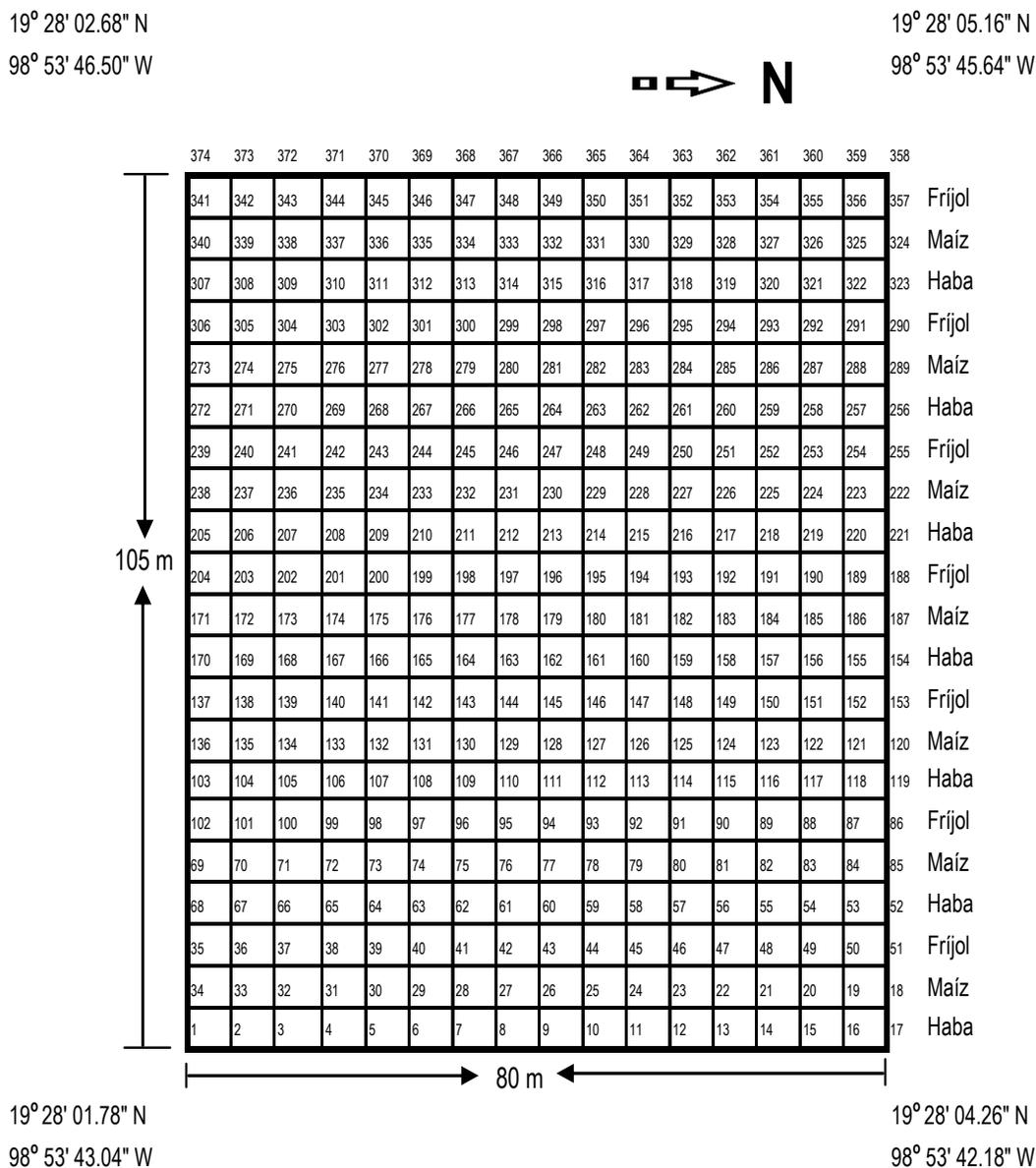


Figura 4.2. Cuadrícula de los puntos muestreados en la parcela experimental.

De las áreas formadas de cada intersección (5 m * 5 m), se midió el rendimiento de grano de los cultivos de haba, maíz y frijol en el ciclo otoño-invierno 2005, siguiendo el mismo mecanismo de muestreo sistemático.

La determinación de las propiedades físicas del suelo tales como: densidad aparente (ρ_a), textura (DTP), humedad gravimétrica (θ_g), humedad volumétrica (θ_v) y resistencia mecánica (RM), fueron empleados métodos tanto convencionales como no destructivos y rápidos de analizar, que en su mayoría correspondieron a las técnicas electromagnéticas; en este caso se usaron equipos de reflectometría de dominio del tiempo (TDR) y penetrómetro de ultrasonido (PU).

Todos estos parámetros se midieron en términos de su variabilidad en el espacio y dinámica en el tiempo, vía sensores remotos, desde el nivel mega (campo), hasta el submicroscópico (puntual), sin alterar las muestras en la mayoría de los casos. El carácter no invasivo de los análisis, así como su base física única aseguraron una máxima exactitud y precisión de la información recopilada. Por otro lado, se determinaron algunas variables químicas como la materia orgánica (MO) y conductividad eléctrica (CE), utilizando un muestreo invasivo siguiendo el mismo patrón de muestreo sistemático que el de las propiedades físicas.

4.2 Propiedades del suelo indicativas de su calidad física

Las pruebas se hicieron sobre muestras de suelo que se recolectaron en cada uno de los puntos de muestreo en el sitio experimental. Se realizó muestreos de las diferentes propiedades físicas con métodos convencionales y no destructivos con equipo especializado.

La profundidad de control para métodos convencionales fue de 0-15 cm, determinando las propiedades físicas y químicas del suelo (0-5, 5-10 y 10-15 cm) a través de la capa arable y para los no destructivos la profundidad de penetración de las ondas exploraron perfiles de hasta 40 cm. Una vez descrito el procedimiento de obtención de la información, se plantea a continuación la metodología utilizada para la caracterización hidrodinámica del suelo.

4.2.1 Capacidad de campo y punto de marchitamiento permanente

La capacidad de campo (CC) y el punto de marchitamiento permanente (PMP), se determinó por el método de la olla y membrana de presión, a presiones de $\frac{1}{3}$ y 15 atmósferas respectivamente. Las pruebas se hicieron en muestras de suelo inalterado; los valores medios de los contenidos de humedad para cada valor de tensión fueron ajustados por la ecuación de Van Genuchten (1980), usando el software RETC para el ajuste de curvas no-lineal (Van Genuchten *et al.*, 1991).

4.2.2 Densidad aparente

La densidad aparente del suelo y se expresa en g cm^{-3} . Su valor depende de la composición mecánica, estructura y contenido de MO, y se usa como medida de la compactación del suelo (Cuadro 4.1).

Cuadro 4.1. Compactación del suelo con base a densidad aparente (Kaúrichev, 1984).

Densidad aparente (g cm^{-3})	Apreciación cualitativa
<1.0	Suelo rico en sustancia orgánica (césped)
1.0 - 1.1	Valores típicos de suelos laboreados recientemente
1.2	Campo laboreado compactado
1.3 - 1.4	Campo laboreado muy compactado
1.4 - 1.8	Horizonte iluviales muy compactados

La densidad aparente se determinó por el método del cilindro, que consiste en usar una barrena con cilindro de volumen conocido (Figura 4.3), se muestreo el suelo de 0-5 y 25-30 cm de profundidad, se secan en la estufa a una temperatura de 105 °C y se pesa. Con estos datos se realizan los cálculos de densidad aparente mediante la siguiente relación:



Figura 4.3. Equipo para determinar la densidad aparente.

$$\rho_a = \frac{MSS}{VT}$$

Donde:

ρ_a = densidad aparente del suelo (g cm^{-3})

MSS = masa del suelo seco (g)

VT = volumen total (cm^3).

4.2.3 Humedad gravimétrica

La humedad gravimétrica se expresa en porcentaje y se determinó a través de las muestras obtenidas para la densidad aparente del suelo, además se obtuvieron muestras a 15 cm de profundidad del suelo con una barrena (Figura 4.4), éstas se pesan y secan en la estufa a una temperatura de $105\text{ }^\circ\text{C}$ y se pesa la muestra nuevamente, determinando la masa seca del suelo. A partir de estos datos se estima la humedad gravimétrica con la siguiente relación:



Figura 4.4. Barrena para determinar la humedad del suelo.

$$\theta_g = \frac{PSH - PSS}{PSS} \times 100$$

Donde:

θ_g = humedad gravimétrica (%)

PSH = peso de suelo húmedo (g)

PSS = peso de suelo seco (g).

4.2.4 Contenido de humedad del suelo con reflectometría de dominio del tiempo

Con reflectometría del dominio del tiempo (TDR), se midió la constante dieléctrica y el contenido volumétrico de agua en el suelo. El funcionamiento de este equipo se basa en la estimación de la constante dieléctrica aparente del medio, relacionándola a través de una curva de calibración con la humedad volumétrica del mismo, los equipos utilizados se muestran en la Figura 4.5.



Figura 4.5. Tipos de reflectometría de dominio del tiempo (TDR), para medir humedad.

La humedad volumétrica (θ_v), se midió a 15 cm de profundidad en los puntos de intersección de la cuadrícula hecha en la parcela experimental; también se efectuaron mediciones en diez parcelas de escurrimiento establecidas dentro de la parcela experimental, antes y después de la simulación de lluvia. La θ_v se midió utilizando la reflectometría de dominio del tiempo (TDR), cuyo funcionamiento se basa en la transmisión de un pulso eléctrico a través del suelo midiendo la constante dieléctrica aparente (K_a), y el contenido de humedad volumétrica (θ_v). Las mediciones se derivaron de la curva de calibración que establece la relación entre K_a (la permitividad) y θ_v del material (Topp y Reynolds, 1980; Dalton, 1992).

4.2.5 Resistencia mecánica del suelo

Las mediciones de resistencia mecánica se realizaron en campo, empleando un penetrómetro de ultrasonido (PU) computarizado Rimik CP40 que se muestra en la Figura 4.6. Este aparato mide y registra como datos un “índice de cono” (IC), que se obtiene al introducir una varilla con una punta de cono especialmente diseñada para penetrar en el suelo. La unidad de almacenamiento permite guardar más de 30 000 datos, los cuales posteriormente se transmiten a una computadora con una interfase RS232. Con este instrumento se exploró hasta 40 cm de profundidad del suelo con valores máximos de resistencia a la penetración de 5 500 kPa.

El nivel crítico de resistencia de 2 500 kPa, fue propuesto por Carter (1988), y utilizado en el ámbito internacional, para designar las capas no aptas para uso agrícola. Según Oades (1993), en caso de que la resistencia alcance un valor de 3 000 a 3 500 kPa, el crecimiento de la raíz se reduce en 80%, limitando significativamente el volumen del suelo explorado.



Figura 4.6. Penetrómetro de ultrasonido (PU), para medir dureza del suelo.

4.2.6 Conductividad eléctrica del extracto de saturación

Las sales solubles del suelo poseen una alta solubilidad. Éstas se determinan midiendo los cationes y aniones en los extractos de agua. La salinidad del suelo se determina por la conductividad eléctrica (CE) del extracto. El extracto 1:5 es fácil de obtener y permite una muestra abundante mayor que la del extracto de saturación; sin embargo, el extracto de saturación se considera que da mejor representación de las condiciones actuales del suelo con respecto al ambiente de la planta. Se determinó CE del extracto de saturación a la profundidad de 0-5, 5-10 y 10-15 cm.

Esta propiedad química es útil para evaluar la concentración salina del suelo (Cuadro 4.2); además, se utiliza para detectar y delimitar afloramiento salino, estimar tolerancia de cultivos a sales, determinar el potencial osmótico de las soluciones del suelo y verificar la actividad de los aniones y cationes.

Cuadro 4.2. Salinidad del suelo en pasta de saturación (Vázquez, 1997).

Conductividad eléctrica (dS m ⁻¹)	Clasificación	Características
< 2.0	No salino	Efecto de salinidad casi nulo
2.0 - 4.0	Poco salino	Disminución de rendimientos de cultivos
4.1 - 8.0	Moderadamente salino	Disminuye el rendimiento en diferentes especies
8.1 - 16.0	Muy salino	Sólo cultivos tolerantes rinden adecuadamente
> 16.0	Extremadamente salino	Sólo las especies muy tolerantes producen

4.2.7 Materia orgánica

La materia orgánica (MO) está relacionada con el desarrollo de la estructura, porque favorece la estabilidad de los agregados del suelo. Su empleo se basó en la susceptibilidad de ésta a los cambios que ocurren en el suelo, por la intervención de las prácticas de labranza. Se determinó MO a la profundidad de 0-5, 5-10, 10-15 cm por el procedimiento de combustión húmeda descrito por Walkley y Black (1934). Las cantidades de materia orgánica en los suelos minerales varían considerablemente y es difícil indicar cifras representativas; pero la escala comúnmente adaptada para clasificar el contenido de materia orgánica en suelos minerales o inorgánicos se indica en el Cuadro 4.3.

4.3. Clasificación de la materia orgánica (Vázquez, 1997).

Materia orgánica (%)	Clasificación
< 0.6	Extremadamente pobre
0.61 - 1.20	Pobre
1.21 - 1.80	Medianamente pobre
1.81 - 2.4	Medio
2.41 - 3.0	Medianamente rico
3.1 - 4.2	Rico
> 4.21	Extremadamente rico

4.2.8 Análisis mecánico

En la determinación de la textura del suelo, se utilizó muestras de suelo tomadas a una profundidad de 0-5 cm empleando el método de la pipeta, que consiste en pasar dicha muestra por un tamiz de 2 mm, luego se deben eliminar la materia orgánica con peróxido de hidrógeno (H_2O_2) y los carbonatos con ácido clorhídrico (HCl). Posteriormente se pesaron 10 g de éste, se agregaron 150 ml de agua destilada y 10 ml de hexametáfosfato de sodio como agente dispersor y se dejó en reposo durante una hora. Después se dispersó la muestra con un agitador mecánico y se pasó la mezcla a un tamiz de 50 μm , se seco a 105 °C y se pesó para obtener la fracción correspondiente de arena.

La parte de la muestra que pasó el tamiz, se aforó en una probeta de un litro y se usó para evaluar el contenido de limo y arcilla. En el Cuadro 4.4 se reporta dos sistemas de clasificación de tamaño de partículas (Brady y Weil, 1999).

Cuadro 4.4. Clasificación del tamaño de partículas (Brady y Weil, 1999).

Fracciones	SICS (mm)	USDA (mm)
Grava	> 2	> 2
Arena muy gruesa		2 - 1
Arena gruesa	2 - 0.2	1 - 0.5
Arena media		0.5 - 0.25
Arena fina	0.2 - 0.02	0.25 - 0.1
Arena muy fina		0.1 - 0.05
Limo	0.02 - 0.002	0.05 - 0.002
Arcilla	< 0.002	< 0.002

Donde: SICS= Sociedad Internacional de la Ciencia del Suelo; USDA= Departamento de Agricultura de Estados Unidos de América.

4.3 Establecimiento de parcelas de escurrimiento

Debido que la materia orgánica (MO) del suelo, influye en la capacidad de intercambio catiónico (CIC), la estructura, la capacidad de retención de agua y la provisión de nutrientes para las plantas; se utilizó como criterio para definir la ubicación de las parcelas de escurrimiento. A partir de los datos obtenidos en un muestreo de materia orgánica en la parcela experimental de 0-5 cm profundidad del suelo, se construyó un mapa de variabilidad espacial, que permitió situar diez parcelas de escurrimientos de dos metros de ancho por siete de largo, que presentaban niveles de MO desde 1.7 hasta 2.2 por ciento y que correspondían a cada uno de los tres cultivos estudiados. Los puntos seleccionados se muestran en la Figura 4.7.

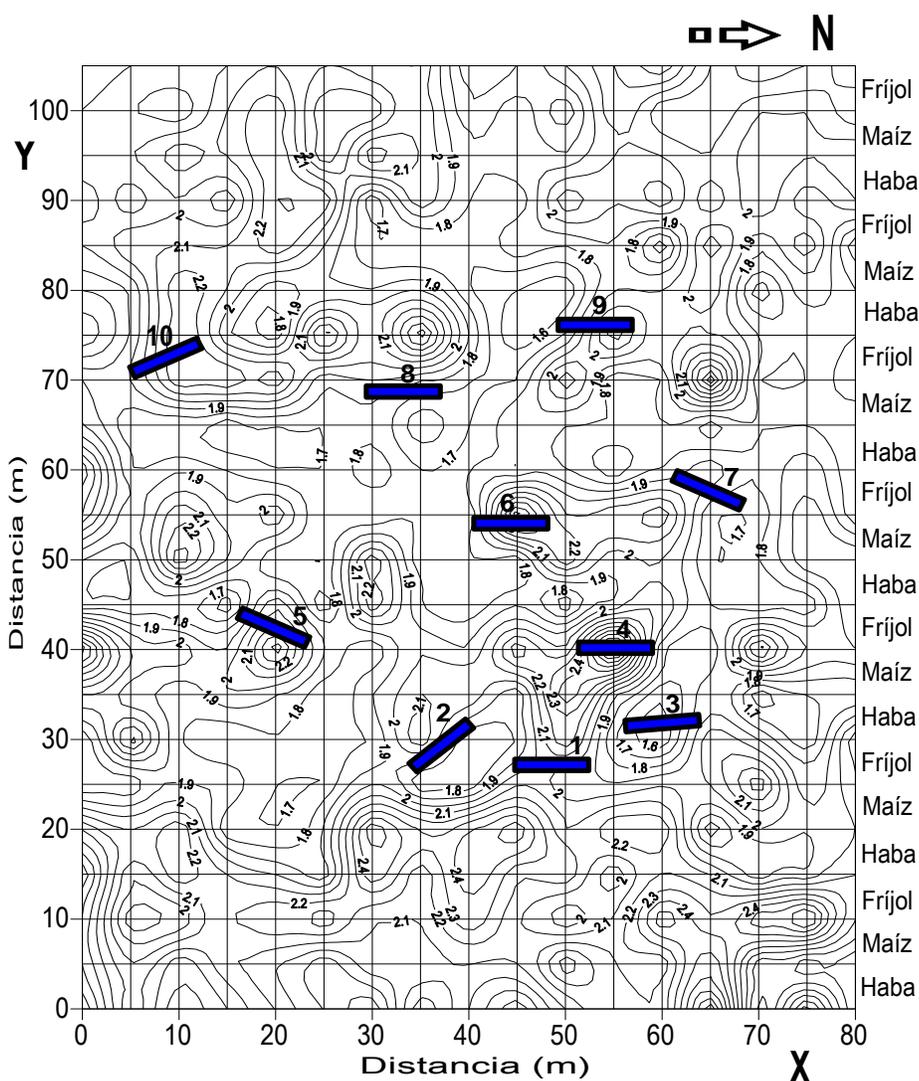


Figura 4.7. Esquema de las parcelas de escurrimientos.

Una vez definida las parcelas de escurrimientos se aplico una intensidad de 20, 60 y 100 mm h⁻¹ de lluvia, utilizando un simulador de lluvia móvil tipo ARS/USDA (Figura 4.8). En cada una de las parcelas se hicieron mediciones de propiedades físicas, y químicas del suelo y rendimiento de grano de los cultivos.



Figura 4.8. Equipo de simulación de lluvia tipo ARS/USDA.

El contenido de humedad volumétrica en el perfil edáfico (θ_v), la resistencia mecánica (RM) y la infiltración del agua (I), fueron determinadas con métodos no invasivos utilizando en algunos casos (θ_v y RM) técnicas de exploración electromagnética: Reflectometría del Dominio del Tiempo (TDR) y Penetrómetro de Ultrasonido (PU); y apoyados con métodos tradicionales utilizados para medir la densidad aparente (ρ_a), materia orgánica (MO), conductividad eléctrica (CE) y la textura del suelo.

4.3.1 Estimación de las propiedades físicas en las parcelas de escurrimiento

La porosidad total (f) fue determinada a partir ρ_a y la densidad real considerada igual 2.6 g cm⁻³ (Hillel, 1980). La humedad aprovechable (θ_a) fue estimada como la diferencia entre CC y PMP. Así mismo, otras propiedades del suelo considerados en el estudio tales como: La humedad residual (θ_r) fue predicha con el modelo propuesto por Rawls *et al.*, (1991).

La infiltración del agua (I) fue determinada en cada área de muestreo usando un simulador de lluvia tipo ARS/USDA (Norton *et al.*, 1995), mediante el cual se aplicaron tres eventos de lluvia en cada área de muestreo, con una intensidad de 20, 60 y 100 mm h⁻¹. La tasa de infiltración fue determinada a partir de la diferencia entre la intensidad de la lluvia y el escurrimiento presentado (Q). La conductividad hidráulica saturada (K_s) fue determinada a partir de datos de la tasa de infiltración, los cuales fueron graficados contra el tiempo para intensidades de 60 y 100 mm h⁻¹ de lluvia aplicada en cada área de muestreo y se calculó el promedio aritmético de los tres últimos valores de la tasa de infiltración. Estos valores correspondieron a la porción de la curva de velocidad de infiltración donde ésta se hace constante. La infiltración acumulada (I_a) fue obtenida de la diferencia entre la lluvia total y el escurrimiento. La sorbilidad (S_o) fue calculada de acuerdo con Chong (1983).

4.3.2 Análisis estadístico de las parcelas de escurrimiento

Un análisis de correlación fue desarrollado con 17 atributos de suelo medidos en la capa arable del mismo usando el software SAS Institute (1999). Los atributos usados para el análisis de correlación fueron: resistencia mecánica (RM), densidad aparente (ρ_a), materia orgánica (MO), conductividad eléctrica (CE), porosidad total (f), contenido de arena (Ar), limo (Li) y arcilla (Ac); humedad aprovechable (θ_a), humedad saturada (θ_s), humedad residual (θ_r), conductividad hidráulica saturada (K_s), infiltración acumulada (I_a), sorbilidad (S_o) y rendimiento de haba (\hat{Y}_h), maíz (\hat{Y}_m) y frijol (\hat{Y}_f).

Además se realizaron separadamente análisis de regresión lineal simple y múltiple usando el rendimiento de grano de los cultivos de haba (\hat{Y}_h), maíz (\hat{Y}_m) y frijol (\hat{Y}_f) como variables dependientes y las propiedades del suelo como variables independientes.

4.4 Los cultivos de haba, maíz y frijol

La semilla de haba se adquirió en el Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP), ésta fue la criolla de color morado; la longitud promedio de vaina es de 11 cm, una anchura de 1.54 cm. El espesor promedio de la semilla de haba es de 0.8 cm, con un rango entre 0.48 y 1.8 cm y un rendimiento promedio de 1 500-2 500 kg ha⁻¹. Se sembró a equidistancias de 30 cm entre hileras y entre plantas.

La variedad de maíz utilizada fue la HS-22 con una altura de 2.6 a 2.9 m, de ciclo intermedio de 115 a 125 días a la cosecha, el grano es de color blanco cremoso, longitud de 11.8 mm y ancho de 8.8 mm, la mazorca tiene 14.6 cm de longitud y 4.5 cm de diámetro, con 12 a 14 hileras irregulares, y rendimiento promedio de 4 800-6 800 kg ha⁻¹. El maíz se sembró a 30 cm entre hileras y entre plantas.

La variedad de frijol sembrada fue Bayomex, se sembró de la misma forma que el maíz, esta variedad tiene una altura de 37-40 cm, su semilla de color amarillo con flores blancas y vainas de color verde oscuro de 10.9 cm de longitud y 1.36 cm de ancho. Su ciclo biológico es de precoz a intermedio con base en el sitio de siembra, aproximadamente de 35-55 días a la floración y de 85-110 a la madurez, con un rendimiento promedio de 1 500-2 939 kg ha⁻¹.

La fertilización de los cultivos se realizó utilizando las dosis de 220-120-60 en el maíz y de 30-60-00 para el frijol y el haba. En el maíz se aplicó la mitad del nitrógeno en la siembra y la otra mitad a los 60 días de emergido. En el caso del haba y el frijol se aplicó todo el fertilizante a la siembra. Se controlaron las malezas con herbicidas y se aplicó un riego de auxilio en la siembra.

4.4.1 Estimación del rendimiento

Se establecieron siete franjas de 15 metros de ancho por 80 metros de largo, en las cuales se intercalaron los cultivos de haba, maíz y frijol de cinco metros de ancho por 80 metros de largo para cada cultivo; con un total de 21 lotes en la parcela experimental. La siembra se efectuó en la primera quincena de mayo en forma manual; la separación entre hileras y entre plantas fue de 0.3 m, se depositaron 3 semillas por metro lineal para garantizar una densidad de población de 100 000 plantas ha⁻¹ en cada uno de los cultivos evaluados, como se muestra en la Figura 4.9. Los cultivos (rendimiento de grano) fueron cosechados en cuadrículas de 5 m * 5 m, sistemáticamente en la parcela experimental definida.



Figura 4.9. Cultivos intercalados y rotación de haba, maíz y frijol.

5. Resultados y discusión

5.1 Estadística descriptiva de la parcela experimental

Se trazaron cuadrículas de 5 m * 5 m en la parcela experimental, y en las 374 intersecciones resultantes se realizaron mediciones de contenido de humedad volumétrica (θ_v), resistencia mecánica (RM), conductividad eléctrica (CE), materia orgánica (MO) y distribución del tamaño de partículas (DTP). Se analizaron las estadísticas descriptivas de datos obtenidos para cada variable y en casos que lo requieran se ajustaron los valores de cada variable a una distribución normal, con la finalidad de construir semivariogramas y mapas de variabilidad espacial. Los ajustes se efectuaron obteniendo raíz cuadrada ($\sqrt{\cdot}$), logaritmo natural (\ln) y $\ln(x-a)$; donde: $a=$ se obtiene ajustando funciones log normales de 2 o 3 parámetros (Webster y Oliver, 2001).

5.1.1 Contenido de humedad volumétrica del suelo

El contenido de humedad volumétrica (θ_v) del suelo se determinó en 374 puntos de la parcela experimental a 15 cm de profundidad con reflectometría de dominio del tiempo (TDR), se ajustaron los valores a una distribución normal mediante la eliminación de cinco datos aberrantes para calcular la estadística descriptiva, la cual presentó un coeficiente de asimetría de -0.44 y curtosis de -0.29, los otros valores estadísticos se muestran en el Cuadro 5.1.

La Figura 5.1 muestra el histograma de frecuencia del contenido de humedad del suelo y la curva de la función de densidad de probabilidades normal, construida a partir de estimadores estadísticos provenientes de la muestra. Se puede observar que esta curva tiene un ligero sesgo a la izquierda, como se espera de un valor negativo de asimetría, con curtosis platicúrtica y el hecho que los valores de la media, mediana y moda no son iguales. El coeficiente de variación (CV) es considerado bajo (0-15%) según la clasificación de Warrick y Nielsen (1980), y es similar al reportado para contenidos de humedad en otros estudios (Warrick, 2003).

Las tres pruebas de bondad de ajuste ensayadas indican que los datos observados no se ajustaron a un modelo de distribución normal, pero presentan coeficientes de curtosis y asimetría aceptables para realizar el análisis geoestadístico clásico (Webster y Oliver, 2001).

Cuadro 5.1. Estadísticas de la humedad volumétrica (θ_v) del suelo a 15 cm de profundidad.

Estadística descriptiva	Humedad volumétrica ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$)			
	Original		Ajustada (-5 aberrantes)	
Número de datos	374		369	
Mínimo	8.90		18.10	
Máximo	33.80		33.80	
Media	26.94		27.11	
Mediana	27.50		27.50	
Moda	28.20		28.20	
Desviación estándar	3.740		3.463	
Media de error estándar	0.193		0.180	
Coefficiente de variación (%)	13.8		12.8	
Curtosis	1.202		- 0.295	
Coefficiente de asimetría	- 0.810		- 0.449	
Shapiro-Wilk	Pr<0.9635	<0.0001	Pr<0.9776	<0.0001
Kolmogorov-Smirnow	Pr>0.0699	<0.01	Pr>0.0621	<0.01
Cramer-von Mises	Pr>0.4940	<0.005	Pr>0.3366	<0.005

Donde: Pr= probabilidad.

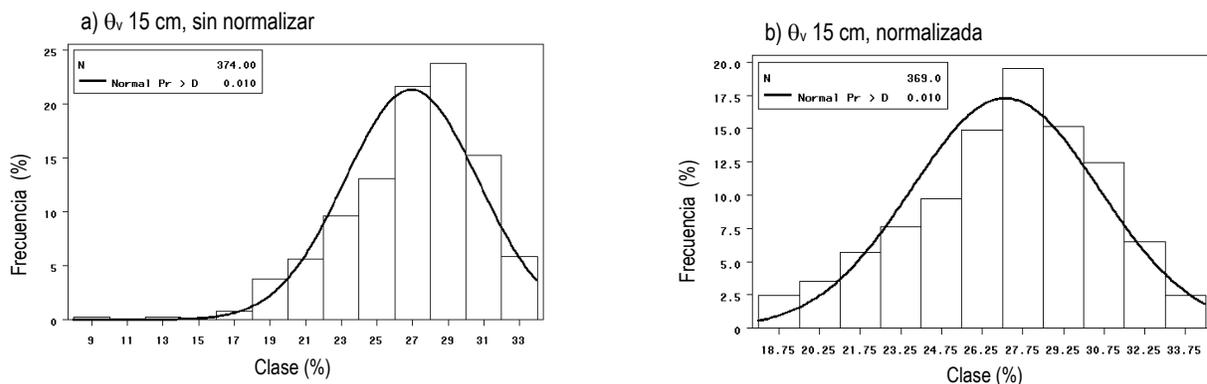


Figura 5.1. Histogramas de frecuencia de la humedad volumétrica (θ_v) del suelo.

5.1.2 Resistencia mecánica del suelo

La resistencia mecánica (RM) del suelo se midió a 2, 5, 10, 15, 20, 30 y 40 cm de profundidad, con un total de 374 datos por profundidad. Para lograr que su coeficiente de simetría fueran menor a 0.5 como lo recomienda Webster y Oliver (2001), se realizaron las siguientes acciones: a 2 cm de profundidad se obtuvo la raíz cuadrada ($\sqrt{}$) de los valores; a 5 cm los valores originales se ajustaron a una distribución normal; a 10 cm se eliminaron tres datos aberrantes y se obtuvo el ln de los valores; a 15 cm se eliminaron dos datos aberrantes; a 20 cm se eliminó un dato aberrante y se obtuvo el ln de los valores; a 30 cm se eliminaron dos datos aberrantes y se obtuvo el ln de los valores y a 40 cm se obtuvo ln de los valores, logrando así un coeficiente de asimetría aceptable para el análisis de variabilidad espacial.

En el Cuadro 5.2a se muestran las estadísticas básicas a 2 cm de profundidad. Cerca de 40% de las observaciones presentaron valores mayores de 0.8 MPa. Según Keith y Mullins (2001) valores entre 0.8 MPa y 5 MPa se consideran críticos para el crecimiento de raíces. De la misma manera en los Cuadros 5.2b - 5.2g se indican los resultados de las estadísticas descriptivas de la resistencia mecánica del suelo de 5 a 40 cm de profundidad respectivamente; de acuerdo con el análisis realizado, se observa que la resistencia se incrementa conforme aumenta la profundidad del suelo.

Cuadro 5.2a. Estadísticas de la resistencia mecánica (RM) del suelo a 2 cm de profundidad.

Estadística descriptiva	Resistencia mecánica (kPa)			
		Original		Ajustada ($\sqrt{}$ RM)
Número de datos		374		374
Mínimo		0		0
Máximo		3 257		57.07
Media		910.41		27.58
Mediana		602.50		24.54
Moda		234		15.30
Desviación estándar		753.158		12.249
Media de error estándar		38.944		0.633
Coefficiente de variación (%)		82.7		44.4
Curtosis		0.1264		- 0.717
Coefficiente de asimetría		1.038		0.406
Shapiro-Wilk	Pr<0.8783	<0.0001	Pr<0.9649	<0.0001
Kolmogorov-Smirnow	Pr>0.1601	<0.01	Pr>0.1006	<0.01
Cramer-von Mises	Pr>2.7938	<0.005	Pr>0.8583	<0.005

Donde: Pr= probabilidad; $\sqrt{}$ = raíz cuadrada.

Cuadro 5.2b. Estadísticas de la resistencia mecánica (RM) del suelo a 5 cm de profundidad.

Estadística descriptiva	Resistencia mecánica (kPa)	
	Original	
Número de datos	374	
Mínimo	46.5	
Máximo	4 127.5	
Media	1 927.26	
Mediana	1 929.75	
Moda	1 062.50	
Desviación estándar	677.396	
Media de error estándar	35.027	
Coefficiente de variación (%)	35.1	
Curtosis	- 0.147	
Coefficiente de asimetría	- 0.027	
Shapiro-Wilk	Pr<0.9983	<0.0001
Kolmogorov-Smirnow	Pr>0.0223	>0.15
Cramer-von Mises	Pr>0.0219	>0.25

Donde: Pr= probabilidad.

Cuadro 5.2c. Estadísticas de la resistencia mecánica (RM) del suelo a 10 cm de profundidad.

Estadística descriptiva	Resistencia mecánica (kPa)			
		Originales	Ajustada [ln RM (-3 aberrantes)]	
Número de datos		374		371
Mínimo		70		6.74
Máximo		4 182		8.34
Media		1 798.40		7.47
Mediana		1 745.50		7.46
Moda		1 697		7.44
Desviación estándar		425.414		0.216
Media de error estándar		21.998		0.011
Coefficiente de variación (%)		23.6		2.9
Curtosis		5.073		1.493
Coefficiente de asimetría		0.730		- 0.030
Shapiro-Wilk	Pr<0.9353	<0.0001	Pr<0.9813	<0.0001
Kolmogorov-Smirnow	Pr>0.0680	<0.01	Pr>0.0573	<0.01
Cramer-von Mises	Pr>0.6882	<0.005	Pr>0.2753	<0.005

Donde: Pr= probabilidad; ln= logaritmo natural.

Cuadro 5.2d. Estadísticas de la resistencia mecánica (RM) del suelo a 15 cm de profundidad.

Estadística descriptiva	Resistencia mecánica (kPa)			
		Originales	Ajustada (-2 aberrantes)	
Número de datos		374		372
Mínimo		90		90
Máximo		3 786		2 775
Media		1 522.80		1 511.96
Mediana		1 488		1 485
Moda		1 593		1 307
Desviación estándar		352.088		321.185
Media de error estándar		18.206		16.653
Coefficiente de variación (%)		23.1		21.2
Curtosis		6.121		1.489
Coefficiente de asimetría		0.989		0.079
Shapiro-Wilk	Pr<0.9324	<0.0001	Pr<0.9794	<0.0001
Kolmogorov-Smirnow	Pr>0.0701	<0.01	Pr>0.0527	0.013
Cramer-von Mises	Pr>0.4869	<0.005	Pr>0.2444	<0.005

Donde: Pr= probabilidad.

Cuadro 5.2e. Estadísticas de la resistencia mecánica (RM) del suelo a 20 cm de profundidad.

Estadística descriptiva	Resistencia mecánica (kPa)			
		Originales	Ajustada [ln RM (-1 aberrante)]	
Número de datos		374		373
Mínimo		60		6.17
Máximo		3 570		8.18
Media		1 439.13		7.24
Mediana		1 396.50		7.24
Moda		1 418		7.15
Desviación estándar		380.879		0.254
Media de error estándar		19.695		0.013
Coefficiente de variación (%)		26.5		3.5
Curtosis		3.063		0.890
Coefficiente de asimetría		0.874		- 0.087
Shapiro-Wilk	Pr<0.9575	<0.0001	Pr<0.9937	0.130
Kolmogorov-Smirnow	Pr>0.0807	<0.01	Pr>0.0347	>0.15
Cramer-von Mises	Pr>0.4978	<0.005	Pr>0.0629	>0.25

Donde: Pr= probabilidad; ln= logaritmo natural.

Cuadro 5.2f. Estadísticas de la resistencia mecánica (RM) del suelo a 30 cm de profundidad.

Estadística descriptiva	Resistencia mecánica (kPa)			
	Originales		Ajustada [ln RM (-2 aberrantes)]	
Número de datos		374		372
Mínimo		607		6.41
Máximo		4 288		8.15
Media		1 501.85		7.26
Mediana		1 421.50		7.26
Moda		1 120		7.02
Desviación estándar		499.057		0.287
Media de error estándar		25.806		0.015
Coefficiente de variación (%)		33.2		3.9
Curtosis		5.489		0.683
Coefficiente de asimetría		1.852		0.339
Shapiro-Wilk	Pr<0.8641	<0.0001	Pr<0.9860	0.0012
Kolmogorov-Smirnow	Pr>0.1226	<0.01	Pr>0.0528	0.013
Cramer-von Mises	Pr>1.6852	<0.005	Pr>0.1679	0.015

Donde: Pr= probabilidad; ln= logaritmo natural.

Cuadro 5.2g. Estadísticas de la resistencia mecánica (RM) del suelo a 40 cm de profundidad.

Estadística descriptiva	Resistencia mecánica (kPa)			
	Originales		Ajustada (ln RM)	
Número de datos		374		374
Mínimo		526		6.26
Máximo		4 426		8.39
Media		1 581.01		7.27
Mediana		1 374		7.23
Moda		1 256		7.14
Desviación estándar		705.288		0.414
Media de error estándar		36.470		0.021
Coefficiente de variación (%)		44.6		5.7
Curtosis		1.482		- 0.240
Coefficiente de asimetría		1.270		0.268
Shapiro-Wilk	Pr<0.8949	<0.0001	Pr<0.9874	0.003
Kolmogorov-Smirnow	Pr>0.1550	<0.01	Pr>0.0709	<0.01
Cramer-von Mises	Pr>2.1828	<0.005	Pr>0.3161	< 0.005

Donde: Pr= probabilidad; ln= logaritmo natural.

En la Figura 5.2 se muestran los histogramas de frecuencia de la resistencia mecánica para cada una de las profundidades, construidos sin normalizar y a partir de valores normalizados. En la Figura 5.2a, 5.2d, 5.2f, 5.2h, 5.2j y 5.2l, son histogramas y curvas de la función de densidad de probabilidades normal

construidos con valores sin normalizar a profundidades de 2, 10, 15, 20, 30 y 40 cm respectivamente, estas se graficaron con la finalidad mostrar el comportamiento de los datos originales. Únicamente discutiremos los histogramas y curvas de función de densidad de probabilidades normal con valores normalizados en el siguiente orden: en las Figuras 5.2b, 5.2c y 5.2m, se muestran los histogramas que corresponden a 2, 5 y 40 cm de profundidad del suelo, que presenta una distribución platicúrtica; las Figuras 5.2e, 5.2g, 5.2i y 5.2k, son histogramas a 10, 15, 20 y 30 cm de profundidad del suelo, que presentan una distribución leptocúrtica.

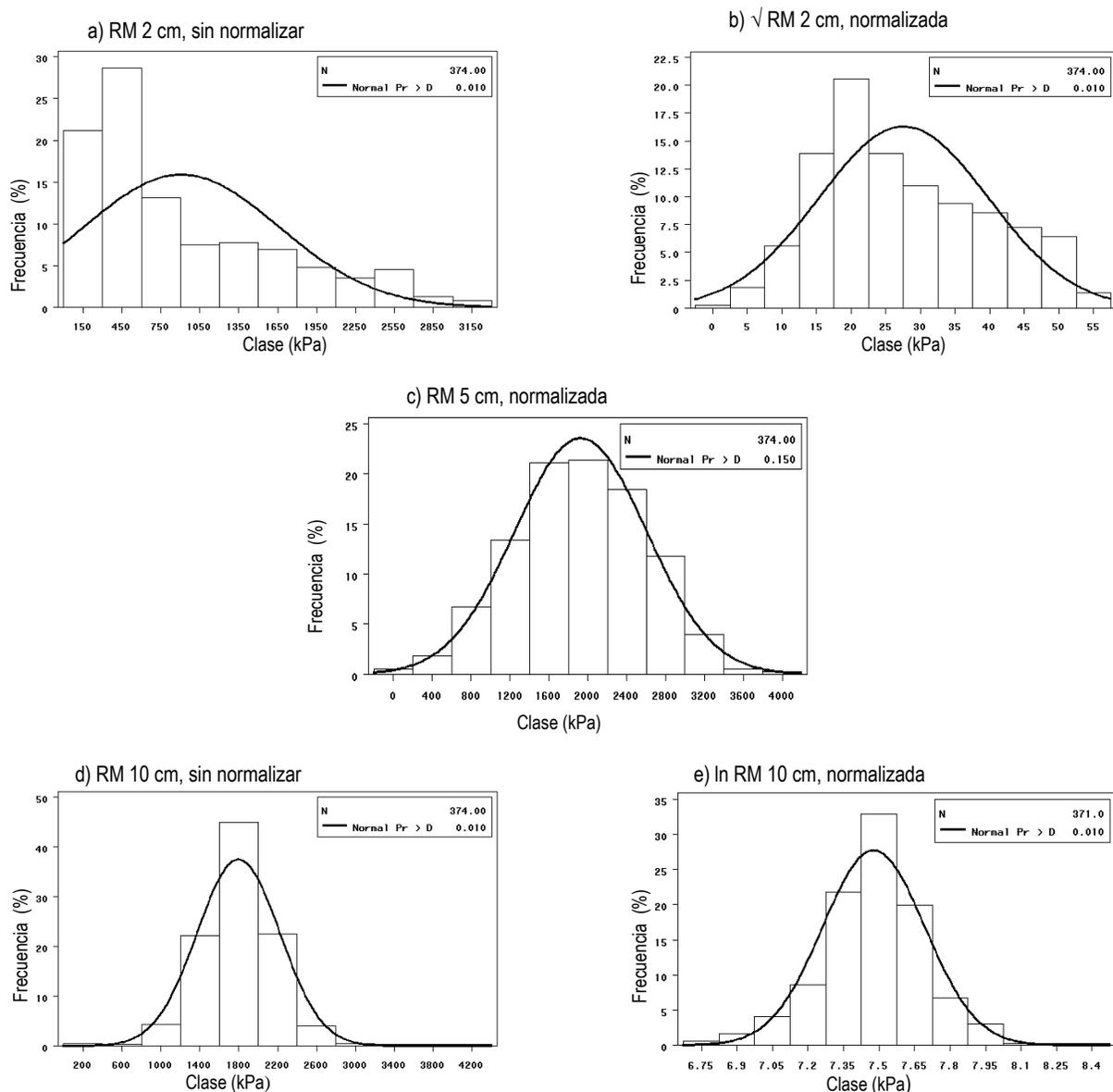


Figura 5.2. Histograma de frecuencia de la resistencia mecánica (RM) del suelo.

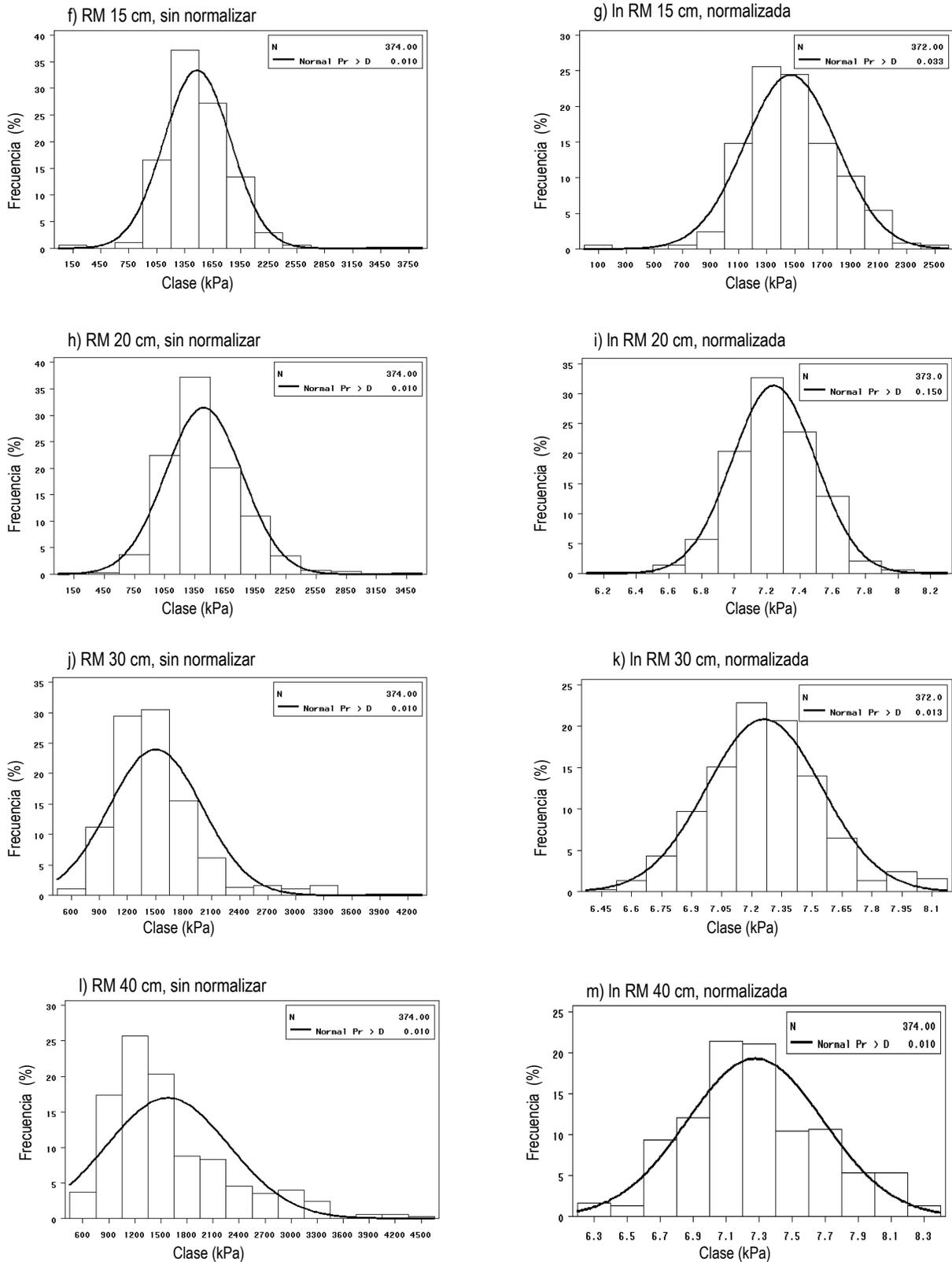


Figura 5.2. Histograma de frecuencia de la resistencia mecánica (RM) del suelo (continuación).

La Figura 5.3 muestra valores, máximos, mínimos, media, mediana, cuartiles 25 y 75, además se destaca los valores críticos y sin restricción de resistencia a la penetración del suelo, hasta los 48 cm de profundidad, obtenidos de las distribuciones de los 374 puntos muestreados. La gráfica muestra, para fines de comparación y como características importantes, los valores críticos y sin restricción para el crecimiento de las raíces de los cultivos.

Como se nota en la información la mayoría de los puntos se consideran dentro del rango de valores de resistencia del suelo clasificada como no adecuada al crecimiento de los cultivos de 800 a 2 500 kPa (Carter, 1998; Keit y Mullins, 2001); de hecho pocos valores entre el mínimo y el cuartil 25 están por debajo del valor de resistencia crítica. Otro aspecto a resaltar es la presencia en el terreno de una capa más resistente entre 5 y 6 cm de profundidad, relacionada sin duda con el poco movimiento del suelo y las operaciones mecanizadas que se realizan diferentes a la labranza primaria.

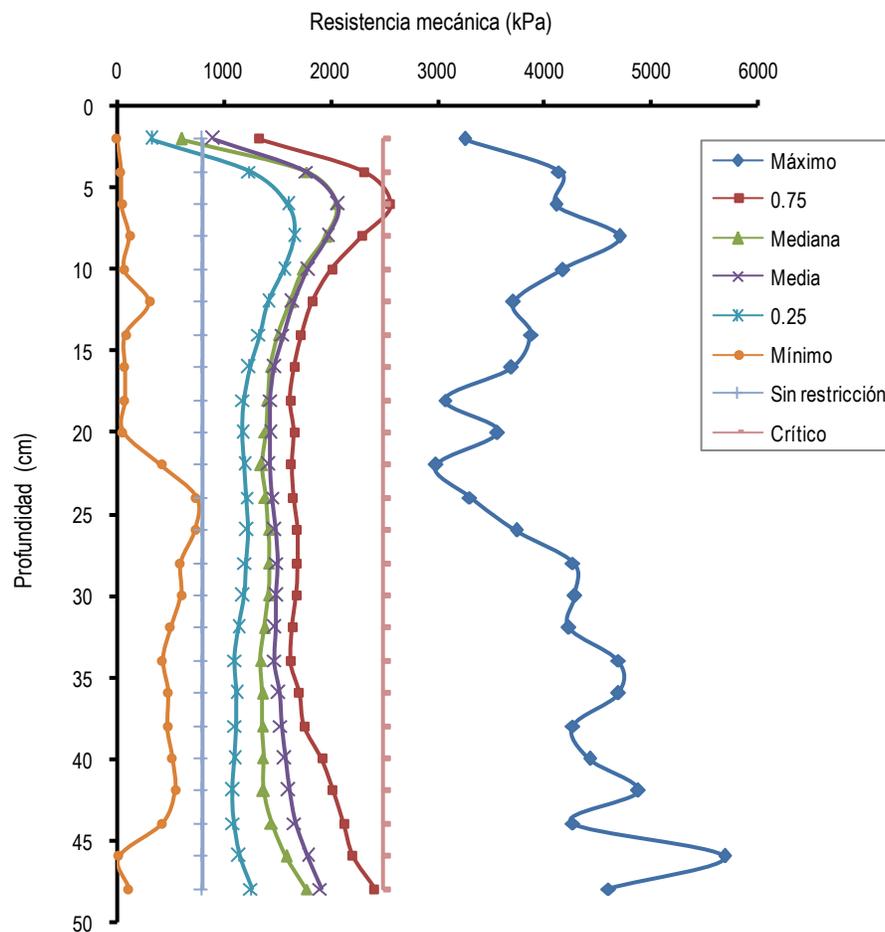


Figura 5.3. Valores máximos, mínimos, media, mediana, cuartiles 25 y 75 de resistencia mecánica del suelo.

5.1.3 Conductividad eléctrica del suelo

La conductividad eléctrica (CE) del suelo, se midió en la parcela experimental a tres profundidades de 0-5, 5-10 y 10-15 cm, obteniendo 374 datos por profundidad, estos se normalizaron de acuerdo a la teoría de Webster y Oliver (2001) para el análisis de variabilidad espacial. En la profundidad de 0-5 cm se eliminaron cuatro datos aberrantes, a la profundidad de 5-10 cm se eliminaron dos datos aberrantes, en la profundidad de 10-15 cm se eliminaron tres datos aberrantes, posteriormente en las tres profundidades estudiadas, se restó una constante $a = 0.2$ y se calculó el \ln de los valores. El resumen de estadísticas se muestra en el Cuadro 5.3a, 5.3b y 5.3c para cada profundidad explorada.

Se considera que los valores de conductividad eléctrica medidos en el suelo a las tres profundidades no afectan el rendimiento de los cultivos, debido que se clasifica como un suelo no salino que poseen valores menores de 2.0 dS m^{-1} (Vázquez, 1997) como se muestra en la Figura 5.4, aunque existen en todas las profundidades algunos puntos con valores superiores a los 2.0 dS m^{-1} que son inferiores en número al 4% de las observaciones totales.

Cuadro 5.3a. Estadísticas de la conductividad eléctrica (CE) del suelo de 0-5 cm de profundidad.

Estadística descriptiva	Conductividad eléctrica (dS m^{-1})			
		Originales	Ajustada [$\ln \text{CE} - 0.2$ (- 4 aberrantes)]	
Número de datos		374		370
Mínimo		0.36		- 1.81
Máximo		3.92		0.97
Media		0.81		- 0.98
Mediana		0.64		- 1.05
Moda		0.58		- 1.24
Desviación estándar		0.510		0.709
Media de error estándar		0.026		0.037
Coefficiente de variación (%)		62.3		72.2
Curtosis		10.531		0.037
Coefficiente de asimetría		2.916		0.375
Shapiro-Wilk	Pr<0.6775	<0.0001	Pr<0.9856	0.001
Kolmogorov-Smirnow	Pr>0.2237	<0.01	Pr>0.0594	<0.01
Cramer-von Mises	Pr> 6.5713	<0.005	Pr>0.2571	<0.005

Donde: Pr= probabilidad; ln= logaritmo natural.

Cuadro 5.3b. Estadísticas de la conductividad eléctrica (CE) del suelo de 5-10 cm de profundidad.

Estadística descriptiva	Conductividad eléctrica (dS m ⁻¹)			
		Originales	Ajustada [ln CE - 0.2 (-2 aberrantes)]	
Número de datos		374		372
Mínimo		0.12		- 2.50
Máximo		2.14		0.37
Media		0.57		- 1.13
Mediana		0.51		- 1.15
Moda		0.46		- 1.32
Desviación estándar		0.231		0.505
Media de error estándar		0.012		0.026
Coefficiente de variación (%)		40.2		44.8
Curtosis		9.167		0.237
Coefficiente de asimetría		2.420		0.287
Shapiro-Wilk	Pr<0.7953	<0.0001	Pr<0.9890	0.007
Kolmogorov-Smirnow	Pr>0.1684	<0.01	Pr>0.0552	<0.01
Cramer-von Mises	Pr> 3.2194	<0.005	Pr>0.1569	0.02

Donde: Pr= probabilidad; ln= logaritmo natural.

Cuadro 5.3c. Estadísticas de la conductividad eléctrica (CE) del suelo de 10-15 cm de profundidad.

Estadística descriptiva	Conductividad eléctrica (dS m ⁻¹)			
		Originales	Ajustada [ln CE - 0.2 (-3 aberrantes)]	
Número de datos		374		371
Mínimo		0.25		- 2.85
Máximo		4.16		0.44
Media		0.56		- 1.19
Mediana		0.51		- 1.20
Moda		0.51		- 1.16
Desviación estándar		0.298		0.502
Media de error estándar		0.015		0.026
Coefficiente de variación (%)		52.7		42.2
Curtosis		62.427		0.582
Coefficiente de asimetría		6.250		0.168
Shapiro-Wilk	Pr<0.5636	<0.0001	Pr<0.9899	0.012
Kolmogorov-Smirnow	Pr>0.2116	<0.01	Pr>0.0684	<0.01
Cramer-von Mises	Pr> 5.6924	<0.005	Pr>0.1546	0.022

Donde: Pr= probabilidad; ln= logaritmo natural.

En la Figura 5.4, se muestran los histogramas de frecuencia sin normalizar y normalizada de la conductividad eléctrica (CE) de 0-5, 5-10 y 10-15 cm de profundidad; en la cual, se observa que la curva normalizada de la Figura 5.4b es simétrica de tipo mesocúrtica que corresponde a la profundidad de 0-5 cm; la Figura 5.4d y 5.4f que representa la profundidad de 5-10 cm y 10-15 cm respectivamente, se presenta los histogramas de frecuencia, con asimetría positiva y curtosis de tipo leptocúrtica.

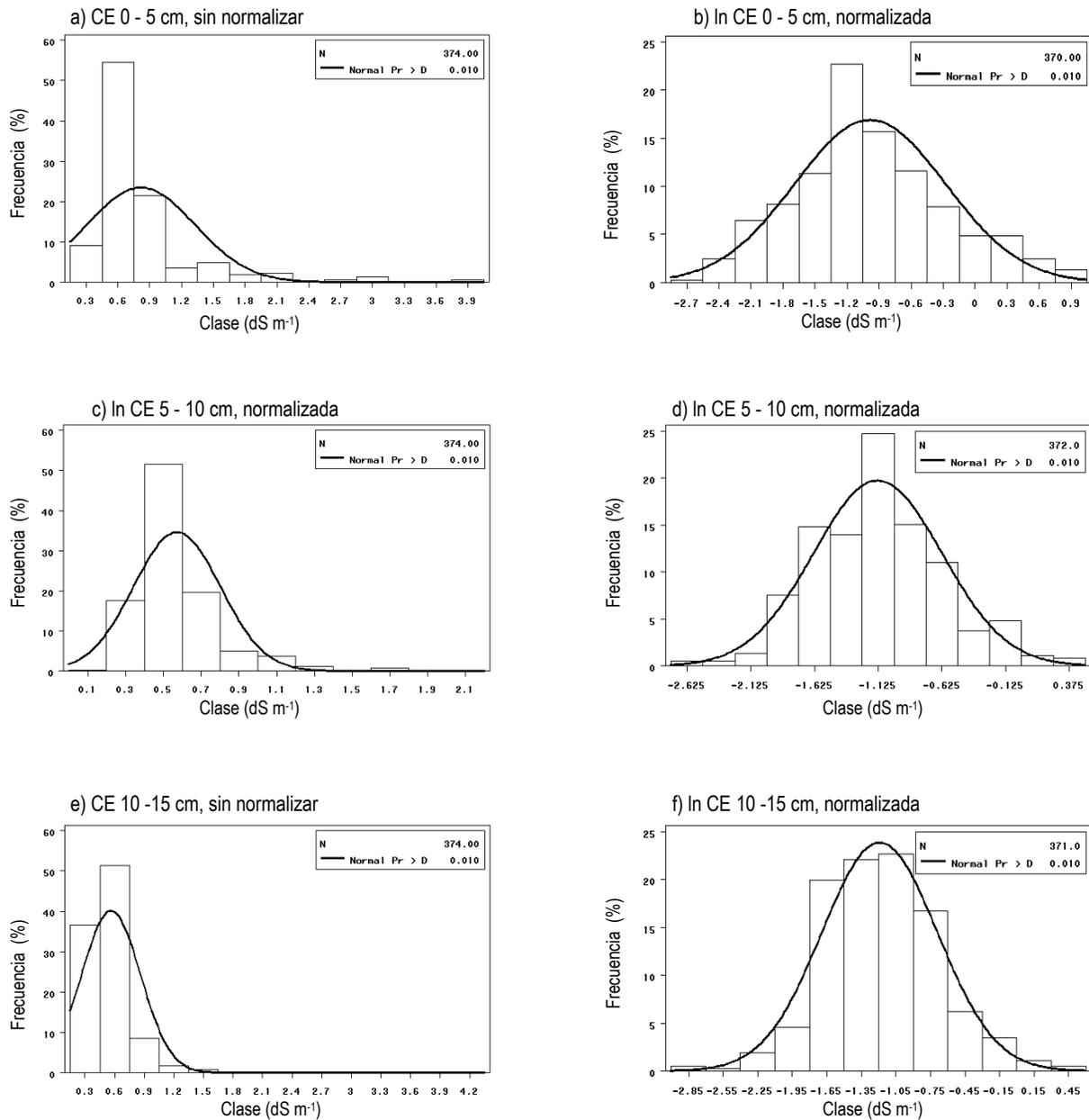


Figura 5.4. Histogramas de frecuencia de la conductividad eléctrica (CE) del suelo.

La Figura 5.5 muestra valores, máximos, mínimos, media, mediana, cuartiles 25 y 75, a los 15 cm de profundidad, obtenidos de las distribuciones de los 374 puntos muestreados. La gráfica muestra, para fines de comparación entre las tres profundidades exploradas, que existe a la profundidad de 5-10 cm un valor menor de conductividad eléctrica que en las profundidades de 0-5 cm y 10-15 cm.

A pesar que existen valores críticos de conductividad eléctrica para el desarrollo de cultivos, la media, mediana y el cuartil 75 muestran que existe alrededor de 80% de los puntos muestreados con valor menor a 1 dS m⁻¹ como se indica en la Figura 5.5.

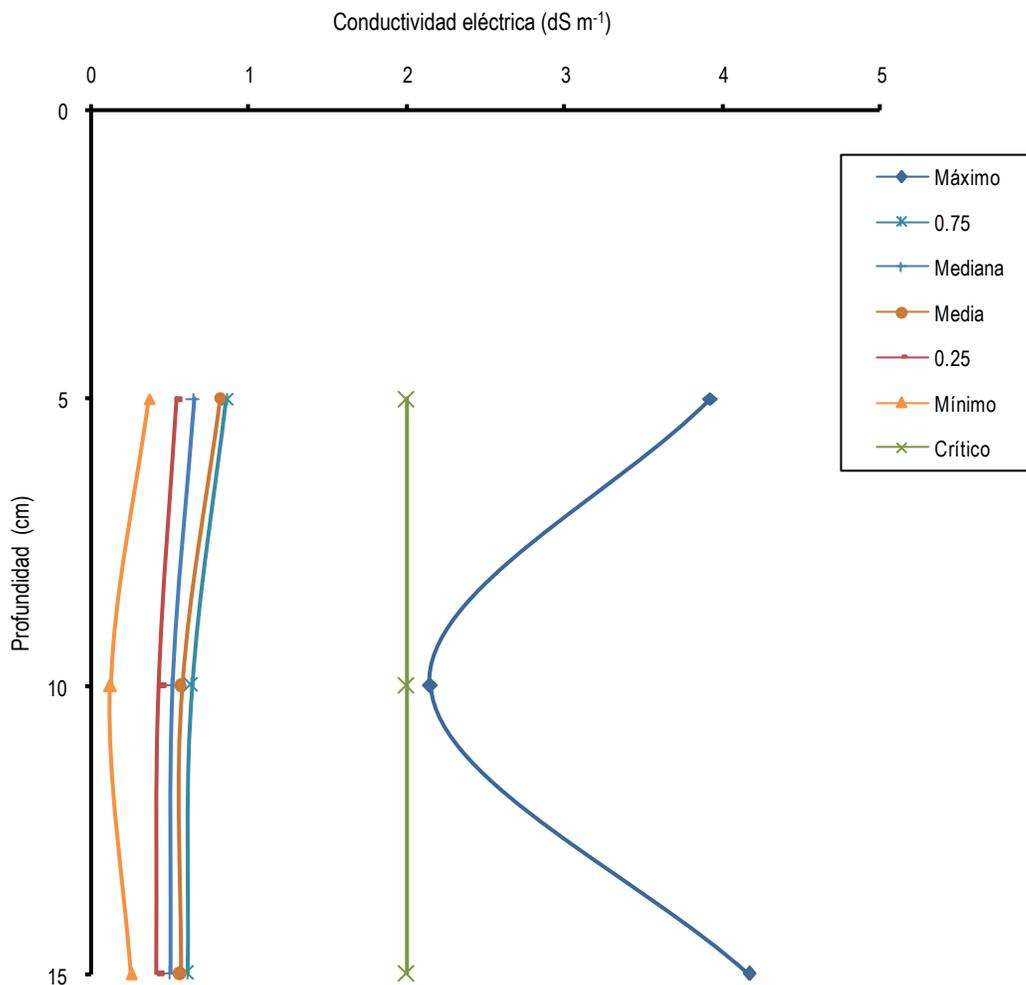


Figura 5.5. Valores máximos, mínimos, media, mediana, cuartiles 25 y 75 de conductividad eléctrica del suelo.

5.1.4 Materia orgánica del suelo

La materia orgánica (MO) del suelo, en la parcela experimental se obtuvo a tres profundidades 0-5, 5-10 y 10-15 cm, con un total de 374 datos por profundidad, los datos obtenidos se ajustaron para obtener valores normalizados. La profundidad de 0-5 cm se eliminaron dos datos aberrantes y se obtuvo el ln de los valores; la profundidad de 5-10 cm únicamente se obtuvo el ln de los valores y la profundidad de 10-15 cm se eliminó un dato aberrante y se obtuvo el ln de los valores, de esta forma se lograron obtener valores normalizados, y el resumen de estadísticas se muestran en los Cuadros 5.4a, 5.4b y 5.4c.

En los Cuadros 5.4a, 5.4b y 5.4c, se muestran como estadística importante a los coeficientes de asimetría con los datos originales (sin normalizar) y con los valores ajustados (normalizados), y se observa que los coeficiente de asimetría de los datos ajustados son menores a 0.5, esto indica que los valores provienen de una distribución normal como lo sugiere Webster y Oliver (2001), para construir los semivariogramas y la variabilidad espacial.

Cuadro 5.4a. Estadísticas de la materia orgánica (MO) del suelo de 0-5 cm de profundidad.

Estadística descriptiva	Materia orgánica (%)			
		Originales		Ajustada [ln MO (-2 aberrantes)]
Número de datos		374		372
Mínimo		1.50		0.40
Máximo		3.10		1.13
Media		1.97		0.66
Mediana		1.90		0.64
Moda		1.70		0.53
Desviación estándar		0.278		0.132
Media de error estándar		0.014		0.007
Coefficiente de variación (%)		14.1		19.8
Curtosis		0.812		- 0.333
Coefficiente de asimetría		0.869		0.389
Shapiro-Wilk	Pr<0.9374	<0.0001	Pr<0.9641	<0.0001
Kolmogorov-Smirnow	Pr>0.1368	<0.01	Pr>0.1301	<0.01
Cramer-von Mises	Pr> 7.1651	<0.005	Pr>0.8432	<0.005

Donde: Pr= probabilidad; ln= logaritmo natural.

Cuadro 5.4b. Estadísticas de la materia orgánica (MO) del suelo de 5-10 cm de profundidad.

Estadística descriptiva	Materia orgánica (%)			
	Originales		Ajustada (ln MO)	
Número de datos		374		374
Mínimo		1.30		0.26
Máximo		2.30		0.83
Media		1.63		0.48
Mediana		1.60		0.47
Moda		1.50		0.41
Desviación estándar		0.188		0.113
Media de error estándar		0.010		0.006
Coefficiente de variación (%)		11.5		23.3
Curtosis		0.605		0.054
Coefficiente de asimetría		0.619		0.273
Shapiro-Wilk	Pr<0.9482	<0.0001	Pr<0.9622	<0.0001
Kolmogorov-Smirnow	Pr>0.1411	<0.01	Pr>0.1372	<0.01
Cramer-von Mises	Pr> 6.6318	<0.005	Pr>1.0753	<0.005

Donde: Pr= probabilidad; ln= logaritmo natural.

Cuadro 5.4c. Estadísticas de la materia orgánica (MO) del suelo de 10-15 cm de profundidad.

Estadística descriptiva	Materia orgánica (%)			
	Originales		Ajustada [ln MO (-1 aberrante)]	
Número de datos		374		373
Mínimo		1.10		0.09
Máximo		2.00		0.58
Media		1.39		0.33
Mediana		1.40		0.34
Moda		1.30		0.26
Desviación estándar		0.139		0.096
Media de error estándar		0.007		0.005
Coefficiente de variación (%)		9.9		29.2
Curtosis		0.870		- 0.066
Coefficiente de asimetría		0.677		0.256
Shapiro-Wilk	Pr<0.9170	<0.0001	Pr<0.9305	<0.0001
Kolmogorov-Smirnow	Pr>0.2064	<0.01	Pr>0.2050	<0.01
Cramer-von Mises	Pr> 2.3298	<0.005	Pr>2.2641	<0.005

Donde: Pr= probabilidad; ln= logaritmo natural.

En la Figura 5.6 se muestra los histogramas de frecuencias y curvas de función de densidad de probabilidades normal, sin normalizar (Figura 5.6a, 5.6c y 5.6e) y normalizadas (Figura 5.6b, 5.6d y 5.6f) a las profundidades de 0-5, 5-10 y 10-15 cm, en la cual se observa que la Figura 5.6b el histograma normalizado y la curva de distribución normal con asimetría positiva y curtosis platicúrtica; pero la Figura 5.6d y 5.6f, la curva de distribución normal presenta asimetría positiva, con curtosis del tipo mesocúrtica.

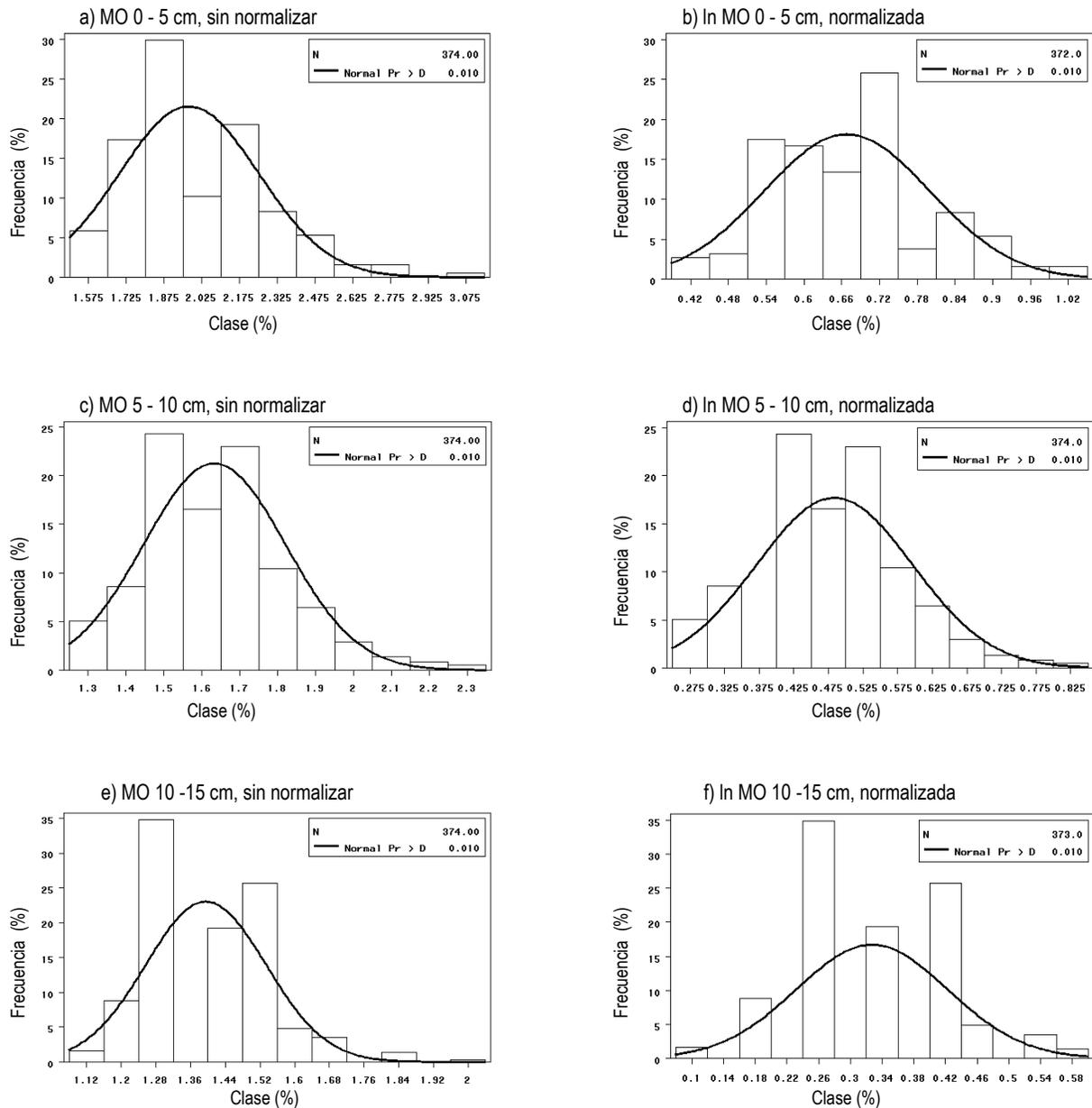


Figura 5.6. Histogramas de frecuencia de la materia orgánica (MO) del suelo.

La Figura 5.7 se muestra el valor máximo, mínimo, media, mediana, cuantiles 0.25 y 0.75 del contenido de materia orgánica del suelo, esta propiedad disminuyen conforme aumenta la profundidad, pero están por arriba del valor crítico de 1.2% (Vazquez, 1997); es decir, se tiene un suelo con condiciones adecuadas para la producción de cultivos. Las medidas de tendencia central representada por la media y la mediana, indican que a 5 cm de profundidad del suelo, el contenido de materia orgánica es más variable que a 10 y 15 cm.

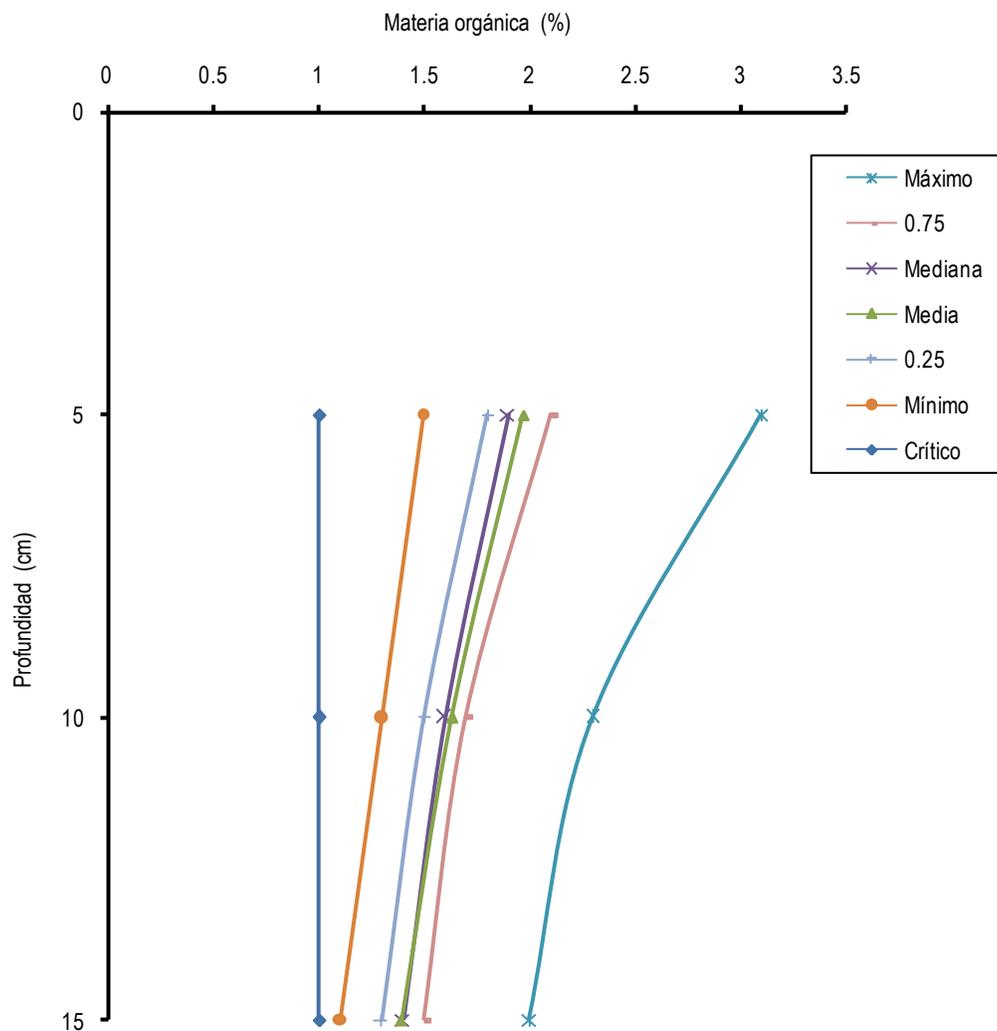


Figura 5.7. Valores máximos, mínimos, media, mediana, cuartiles 25 y 75 de materia orgánica del suelo.

5.1.5 Distribución del tamaño de partículas

La distribución del tamaño de partículas (DTP), se determinó de 0-5 cm de profundidad en toda la parcela experimental con un total de 374 datos. Los datos originales del contenido de arena se ajustaron a una distribución normal, el contenido de limo se eliminó un valor aberrante para que se ajustaran una distribución normal, en lo referente al contenido de arcilla, los valores se normalizaron mediante la resta de una constante ($a= 20$) y posteriormente se obtuvo el ln de los valores. El resumen de estadísticas se muestra en los Cuadros 5.5a, 5.5b y 5.5c.

En este suelo estudiado predomina mayormente el contenido de arcilla, seguido del limo y en menor porcentaje el contenido de arena. En los Cuadros 5.5a, 5.5b y 5.5c, se muestran las estadísticas descriptivas para los datos originales y con los valores normalizados. Los datos originales del contenido de arena proviene de una distribución normal con coeficiente de asimetría -0.209; por el contrario, el contenido de limo y arcilla los valores originales se normalizaron, para obtener coeficientes de asimetría aceptables y construir los semivariogramas y variabilidad espacial correspondientes (Webster y Oliver, 2001).

Cuadro 5.5a. Estadísticas de la distribución del tamaño de partículas (arena) del suelo.

Estadística descriptiva	Tamaño de partículas (%)	
	Originales	
Número de datos		374
Mínimo		5.66
Máximo		25.11
Media		14.57
Mediana		14.75
Moda		14.34
Desviación estándar		3.557
Media de error estándar		0.184
Coeficiente de variación (%)		24.39
Curtosis		0.131
Coeficiente de asimetría		- 0.209
Shapiro-Wilk	Pr<0.9809	<0.0001
Kolmogorov-Smirnow	Pr>0.0736	<0.01
Cramer-von Mises	Pr>0.4914	<0.005

Donde: Pr= probabilidad.

Cuadro 5.5b. Estadísticas de la distribución del tamaño de partículas (limo) del suelo.

Estadística descriptiva	Tamaño de partículas (%)			
		Originales		Ajustada [limo (-1 aberrante)]
Número de datos		374		373
Mínimo		32		36.85
Máximo		65		64.08
Media		53.13		53.19
Mediana		53		52.72
Moda		52		52.53
Desviación estándar		4.127		3.971
Media de error estándar		0.213		0.206
Coefficiente de variación (%)		7.76		7.47
Curtosis		2.875		1.692
Coefficiente de asimetría		- 0.524		- 0.252
Shapiro-Wilk	Pr<0.9479	<0.0001	Pr<0.9636	<0.0001
Kolmogorov-Smirnow	Pr>0.1120	<0.01	Pr>0.0813	<0.01
Cramer-von Mises	Pr> 0.7965	<0.005	Pr>0.5958	<0.005

Donde: Pr= probabilidad.

Cuadro 5.5c. Estadísticas de la distribución del tamaño de partículas (arcilla) del suelo.

Estadística descriptiva	Tamaño de partículas (%)			
		Originales		Ajustada [ln (arcilla - 20)]
Número de datos		374		374
Mínimo		22.10		0.74
Máximo		58.88		3.66
Media		32.28		2.46
Mediana		31.78		2.46
Moda		32.20		2.50
Desviación estándar		3.969		0.294
Media de error estándar		0.205		0.015
Coefficiente de variación (%)		12.29		11.92
Curtosis		12.338		5.020
Coefficiente de asimetría		2.516		- 0.201
Shapiro-Wilk	Pr<0.8170	<0.0001	Pr<0.9382	<0.0001
Kolmogorov-Smirnow	Pr>0.1287	<0.01	Pr>0.0750	<0.01
Cramer-von Mises	Pr> 2.0360	<0.005	Pr>0.7050	<0.005

Donde: Pr= probabilidad; ln= logaritmo natural.

En la Figura 5.8 se ilustran los histogramas de frecuencia para el contenido de arena, limo y arcilla con valores sin normalizar (como referencia) y normalizadas. El histograma de frecuencia del contenido de arena de la Figura 5.8a normalizada su distribución tiene un ligero sesgo a la izquierda pero con curtosis leptocúrtica. El contenido de limo y arcilla de la Figura 5.8c y 5.8e normalizadas la distribución de la curva tiene un ligero sesgo a la izquierda pero también con curtosis leptocúrtica.

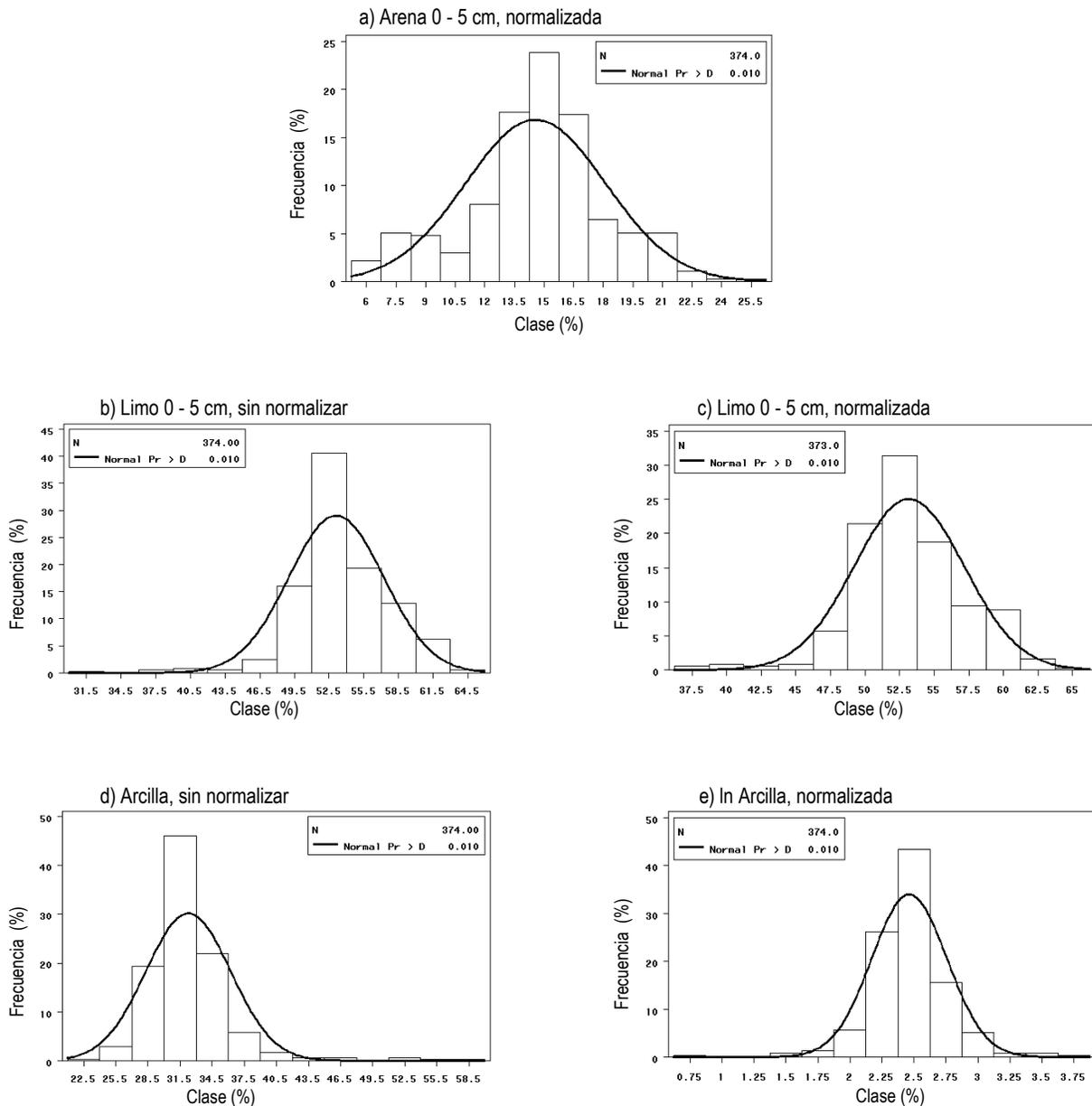


Figura 5.8. Histogramas de frecuencia de la distribución del tamaño de partículas del suelo.

5.1.6 Contenido de humedad gravimétrica y densidad aparente del suelo

En la parcela experimental también se muestrearon 100 puntos (centro del terreno) usando la cuadrícula de 5 m * 5 m original, pero utilizando solo la parte central de la parcela experimental, para determinar el contenido de humedad gravimétrica (θ_g) y densidad aparente (ρ_a) del suelo a dos profundidades de 0-5 y de 25-30 cm. Para que estos datos se ajustaran a una distribución normal, únicamente se eliminó un dato aberrante de humedad gravimétrica a la profundidad de 25-30 cm. El resumen de estadísticas se indica en el Cuadro 5.6.

Cuadro 5.6. Estadísticas de la humedad gravimétrica (θ_g) y densidad aparente (ρ_a) del suelo.

Estadística descriptiva	Humedad gravimétrica (%)		Densidad aparente (g cm ⁻³)					
	0 - 5 cm	25 - 30 cm	0 - 5 cm	25 - 30 cm				
Número de datos	100	99	100	100				
Mínimo	17.04	19.84	1.06	0.97				
Máximo	31.60	39.23	1.35	1.33				
Media	24.79	30.78	1.22	1.14				
Mediana	24.74	30.59	1.22	1.14				
Moda	24.46	28.76	1.19	1.11				
Desviación estándar	2.399	3.362	0.055	0.069				
Media de error estándar	0.239	0.338	0.006	0.007				
Coef. de variación (%)	9.68	10.92	4.54	6.03				
Curtosis	0.674	1.386	- 0.147	0.119				
Coefficiente de asimetría	0.078	- 0.1288	- 0.101	0.052				
Shapiro-Wilk	Pr<0.9891	0.588	Pr<0.9695	0.0212	Pr<0.9883	0.5344	Pr<0.9929	0.8833
Kolmogorov-Smirnow	Pr>0.0559	>0.150	Pr>0.0788	0.1328	Pr>0.0782	0.1352	Pr>0.0579	>0.150
Cramer-von Mises	Pr>0.0364	>0.25	Pr>0.1329	0.0413	Pr>0.0827	0.1964	Pr>0.0441	>0.25

Donde: Pr= probabilidad.

En la Figura 5.9a y 5.9b se muestran los histogramas de frecuencia del contenido de humedad gravimétrica del suelo, de 0-5 cm y 25-30 cm de profundidad respectivamente; la curva de distribución normal, la primera presentan un ligero sesgo a la derecha y la segunda tiene sesgo a la izquierda, pero ambas muestran curtosis leptocúrtica. En la Figura 5.9c y 5.9d; corresponde a los histogramas de frecuencia de la densidad aparente, a las mismas profundidades que la humedad gravimétrica, en la cual se observa, que la primer curva de distribución normal tiene un pequeño sesgo a la izquierda y la segunda posee sesgo a la derecha, pero también muestran curtosis leptocúrtica.

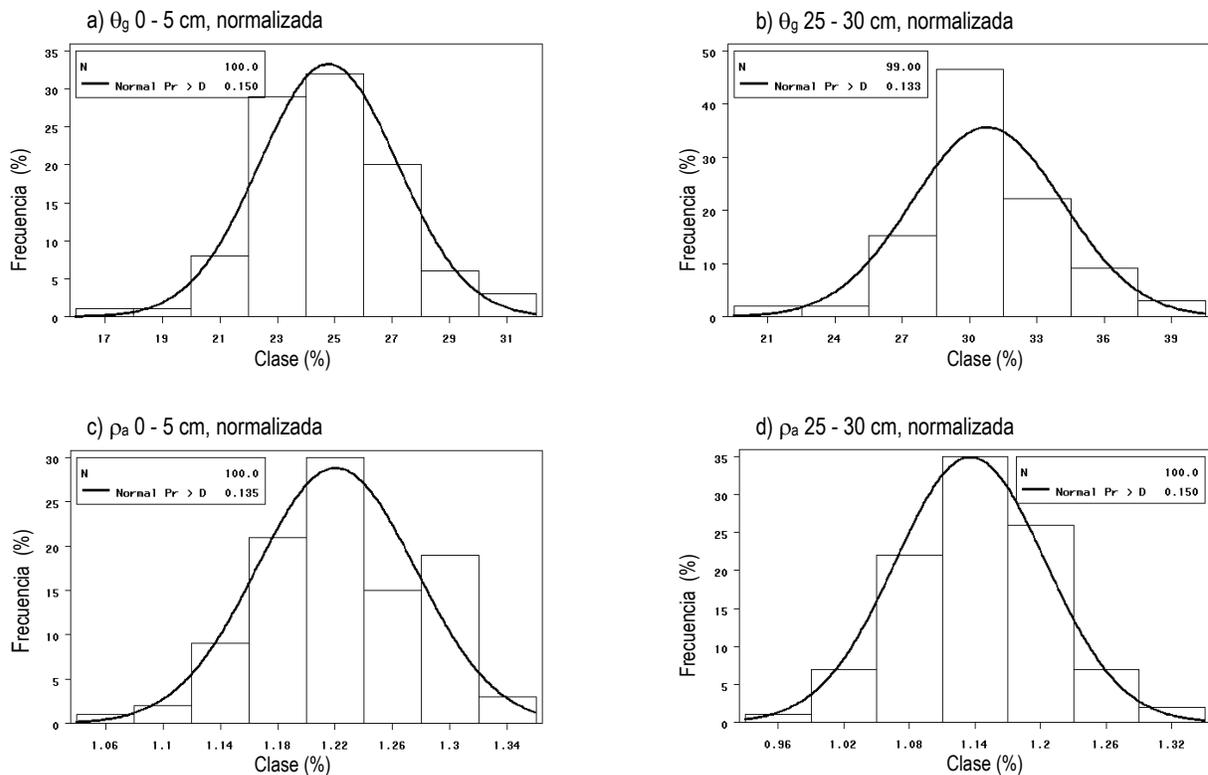


Figura 5.9. Histogramas de frecuencia de la humedad gravimétrica (θ_g) y densidad aparente (ρ_a) del suelo.

5.1.7 Rendimiento de los cultivos

Para el análisis del rendimiento de grano de los cultivos estudiados (haba-maíz-frijol), se obtuvieron 112 datos de rendimiento para cada cultivo en un ciclo agrícola provenientes de lotes de aproximadamente 25 m², estos valores siguieron una distribución normal, con coeficiente de asimetría menor que 0.5, como lo indica Webster y Oliver (2001) para valores normalizados. Después estos valores se estandarizaron con media cero y varianza uno para los tres cultivos, con los cuales se realizó un análisis en conjunto de los tres cultivos, para observar el patrón de rendimiento en toda la parcela experimental. El resumen de estadísticas se muestra en los Cuadros 5.7a, 5.7b y 5.7c.

En la Figura 5.10, se ilustran los histogramas de frecuencia que corresponde al rendimiento de los cultivos de haba, maíz, frijol y estandarizada de haba-maíz-frijol. La Figura 5.10a y 5.10c la curva de función de densidad de probabilidades normal es sesgada a la derecha e izquierda respectivamente, ambas con curtosis platicúrtica; la Figura 5.10b y 5.10d, la primera curva es sesgada a la derecha y la segunda es sesgada a la izquierda, pero con curtosis mesocúrtica y leptocúrtica respectivamente.

Cuadro 5.7. Estadísticas del rendimiento de haba, maíz y frijol.

Estadística descriptiva	Rendimiento (kg ha ⁻¹)							
	Haba	Maíz	Frijol	Estandarizada Haba-maíz-frijol				
Número de datos	112	111	112	335				
Mínimo	872.76	3 064.5	114.29	- 3.673				
Máximo	3 486.67	10 000	2720	3.24				
Media	2 205.31	5 846.11	1 613.34	- 0.01				
Mediana	2 212.15	5 967.31	1 727.92	0.12				
Moda	2 488.37	----	1 818.18	0.33				
Desviación estándar	603.738	1 286.854	632.750	1.020				
Media de error estándar	57.048	122.143	59.789	0.056				
Coef. de variación (%)	27.39	22.01	39.22	----				
Curtosis	- 0.544	0.076	- 0.636	0.108				
Coeficiente de asimetría	0.048	0.302	- 0.421	- 0.053				
Shapiro-Wilk	Pr<0.9887	0.4829	Pr<0.9835	0.1891	Pr<0.9681	0.0089	Pr<0.9903	0.0255
Kolmogorov-Smirnow	Pr>0.0467	>0.15	Pr>0.0472	>0.150	Pr>0.0832	0.055	Pr>0.0546	0.0161
Cramer-von Mises	Pr>0.0364	>0.25	Pr>0.0617	>0.250	Pr>0.1569	0.0202	Pr>0.1866	0.0081

Donde: Pr= probabilidad.

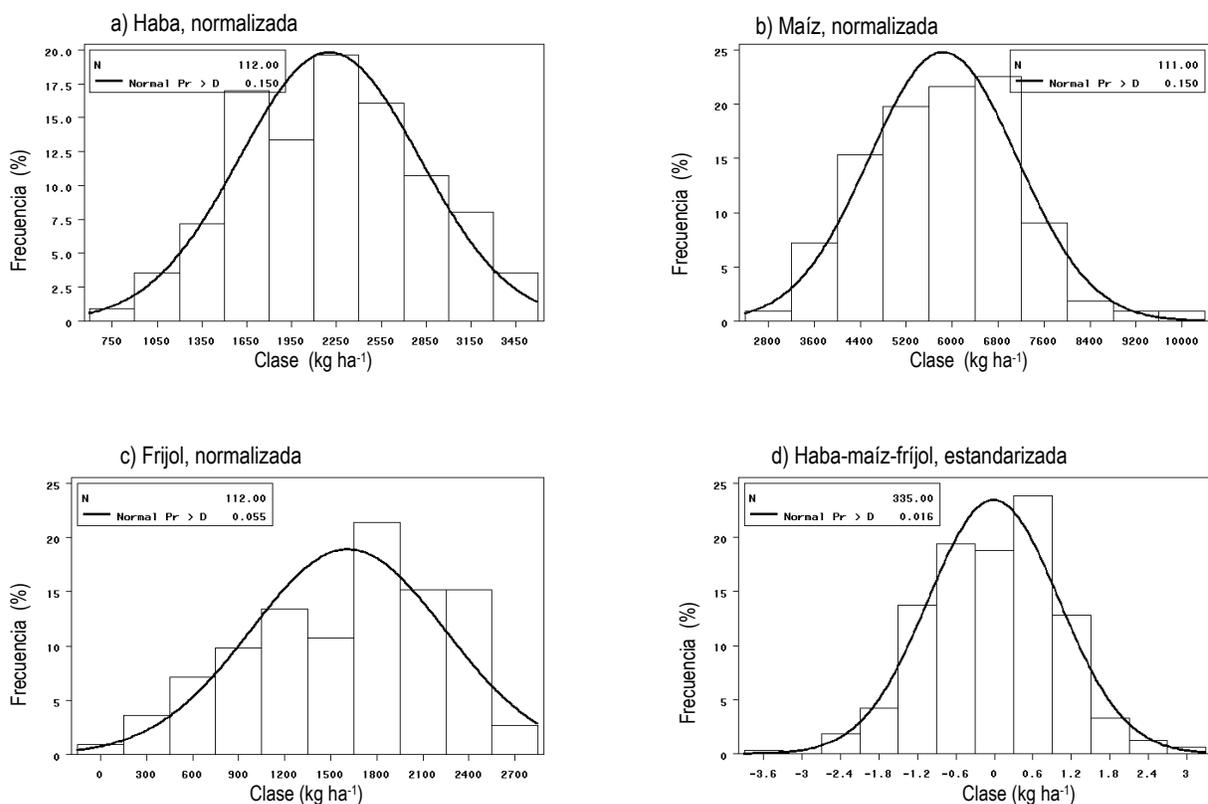


Figura 5.10. Histogramas de frecuencia del rendimiento de haba, maíz y frijol.

5.2 Análisis geoestadístico de la parcela experimental

Antes de comenzar un estudio geoestadístico, se deben discutir todos los elementos que aporten conocimientos del problema a resolver, en que se desarrolló el fenómeno en estudio, organización y verificación de la información disponible y finalmente realizar el análisis exploratorio de los datos. Una vez obtenido los datos, es necesario que se controlen integralmente a fin de verificar de una parte su exactitud y de otra su representatividad. Es importante que esté familiarizado con los datos, para discutir todos los elementos necesarios a fin de conocer el problema a resolver. El análisis geoestadísticos de este trabajo se realizaron con los datos normalizados.

5.2.1 Semivariograma de variabilidad espacial de la humedad volumétrica del suelo

El contenido de humedad volumétrica (θ_v) del suelo, se determinó en 374 puntos de la parcela experimental a una profundidad de 15 cm mediante la reflectometría de dominio del tiempo (TDR). Las características de su variabilidad espacial se muestran en el Cuadro 5.8; en éste se observa que la humedad volumétrica tuvo un efecto nugget de 0.388 y una dependencia espacial de 89 m de distancia.

Cuadro 5.8. Valores del semivariograma de la humedad volumétrica (θ_v) del suelo.

Propiedad (cm)	Modelo de ajuste	Nugget C_0	Sill C_0+C	Rango (m) A_0	Proporción $C/(C_0+C)$	RSS	R^2
θ_v 15	Lineal	0.388	1.454	89	0.733	0.226	0.81

Donde: θ_v = humedad volumétrica; RSS= suma de cuadrados de los residuales.

La Figura 5.11 ilustra el semivariograma del contenido de humedad volumétrica (θ_v) del suelo, ajustada a un modelo lineal con un $R^2 = 0.81$.

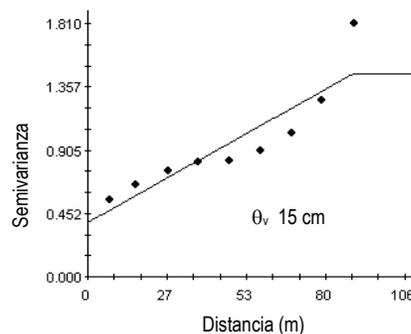


Figura 5.11. Semivariograma de la humedad volumétrica (θ_v) del suelo.

5.2.2 Semivariograma de variabilidad espacial de la resistencia mecánica del suelo

La consistencia del suelo, comprende los atributos del material edáfico que se expresa con relación al grado y clase de cohesión o por la resistencia a la deformación y ruptura. La resistencia mecánica (RM) del suelo estudiado se realizó hasta una profundidad de 40 cm. En el Cuadro 5.9 se muestran los valores geoestadísticos calculados a siete profundidades, en la cual se observa que en todas las profundidades existe una dependencia espacial a 89 m de distancia, con un efecto nugget mayor de 0.69 en las profundidades exploradas.

Cuadro 5.9. Valores de los semivariogramas de la resistencia mecánica (RM) del suelo.

Propiedad (cm)	Modelo de ajuste	Nugget C_0	Sill C_0+C	Rango (m) A_0	Proporción $C/(C_0+C)$	RSS	R^2
RM 2	Lineal	0.837	1.129	89	0.259	0.008	0.90
RM 5	Lineal	0.855	1.100	89	0.223	0.010	0.81
RM 10	Lineal	0.754	1.158	89	0.349	0.010	0.92
RM 15	Lineal	0.764	1.180	89	0.353	0.029	0.82
RM 20	Lineal	0.813	1.133	89	0.283	0.006	0.92
RM 30	Lineal	0.803	1.510	89	0.302	0.012	0.88
RM 40	Lineal	0.697	1.221	89	0.429	0.006	0.97

Donde: RM= resistencia mecánica; RSS= suma de cuadrados de los residuales.

En la Figura 5.12 se muestran los semivariogramas de la resistencia mecánica del suelo a 2, 5, 10, 15, 20, 30 y 40 cm de profundidad, en la cual se observa que las gráficas se ajustaron adecuadamente al modelo lineal en todas las profundidades, además muestra un efecto nugget alto, con umbral no definido y un $R^2 > 0.80$, con dependencia espacial de 89 m de distancia en toda la parcela experimental.

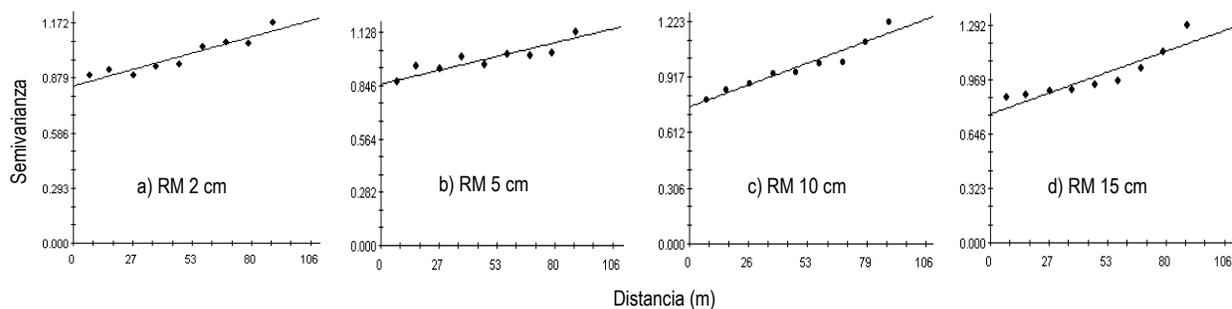


Figura 5.12. Semivariogramas de la resistencia mecánica (RM) del suelo.

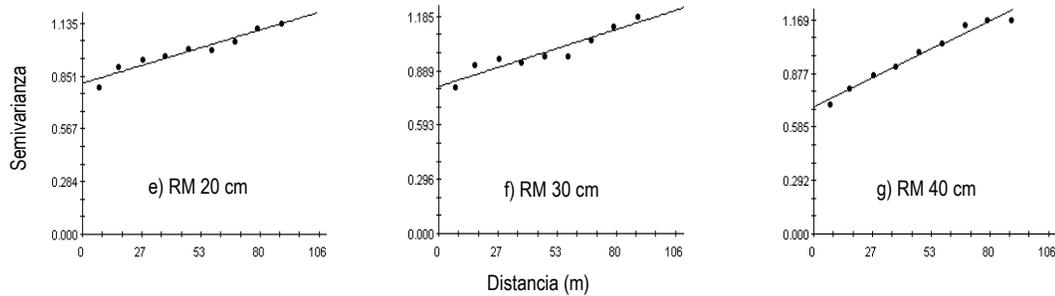


Figura 5.12. Semivariogramas de la resistencia mecánica (RM) del suelo (continuación).

5.2.3 Semivariograma de variabilidad espacial de la conductividad eléctrica del suelo

La conductividad eléctrica (CE), es una propiedad del suelo que generalmente es utilizado para la clasificación de suelos salinos y sódicos, se basa en el contenido de sales solubles del extracto de saturación y del porcentaje de la capacidad de intercambio de cationes ocupado por el suelo. En el Cuadro 5.10 se muestran los valores geoestadísticos del comportamiento de la conductividad eléctrica del suelo estudiado, en el cual podemos observar que la conductividad eléctrica de 0-5 y 5-10 cm de profundidad presenta un efecto nugget de 0.47, con una dependencia espacial de 26 y 32 m de distancia respectivamente; pero a la profundidad de 10-15 cm, tuvo un efecto nugget de 0.28 y una dependencia espacial de 21 m de distancia.

Cuadro 5.10. Valores de los semivariogramas de la conductividad eléctrica (CE) del suelo.

Propiedad (cm)	Modelo de ajuste	Nugget C_0	Sill C_0+C	Rango (m) A_0	Proporción $C/(C_0+C)$	RSS	R^2
CE 0-5	Esférico	0.470	1.012	26	0.536	0.011	0.89
CE 5-10	Esférico	0.474	1.022	32	0.536	0.021	0.85
CE 10-15	Exponencial	0.285	1.010	21	0.718	0.046	0.65

Donde: CE= conductividad eléctrica; RSS= suma de cuadrados residuales.

En la Figura 5.13 se muestran los semivariogramas de la conductividad eléctrica de 0-5, 5-10 y 10-15 cm de profundidad, en donde se ilustra que la profundidad de 0-5 y 5-10 cm, el semivariograma se ajustó al modelo esférico, con umbral definido y R^2 de 0.89 y 0.85 respectivamente; la profundidad de 10-15 cm, se ajusto al modelo exponencial, con umbral definido a 21 m de distancia y $R^2= 0.65$, que significa poca confiabilidad de la dependencia espacial.

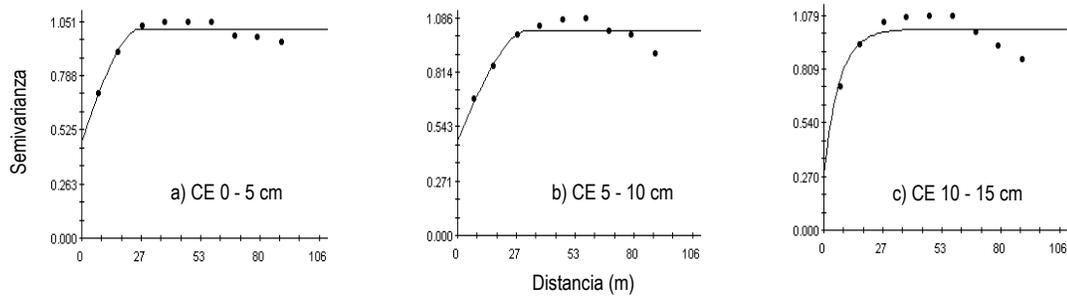


Figura 5.13. Semivariogramas de la conductividad eléctrica (CE) del suelo.

5.2.4 Semivariograma de variabilidad espacial de la materia orgánica del suelo

El proceso de formación de la materia orgánica (MO) del suelo es básicamente de origen biológico, en este proceso intervienen directa o indirectamente toda la fauna y la flora del suelo. En el Cuadro 5.11 se muestra los valores geoestadísticos de la materia orgánica de 0-5, 5-10 y 10-15 cm de profundidad; de acuerdo con los datos obtenidos, las profundidades de 0-5 cm y 5-10 cm presentan una alta dependencia espacial, debido que el rango es mayor a 89 m de distancia y con efecto nugget alto mayor de 0.75, pero la profundidad de 10-15 cm el rango se alcanza a 12 m de distancia, con un efecto nugget de 0.312.

Cuadro 5.11. Valores de los semivariogramas de la materia orgánica (MO) del suelo.

Propiedad (cm)	Modelo de ajuste	Nugget C_0	Sill C_0+C	Rango (m) A_0	Proporción $C/(C_0+C)$	RSS	R^2
MO 0-5	Lineal	0.853	1.101	89	0.223	0.012	0.75
MO 5-10	Lineal	0.794	1.169	89	0.321	0.007	0.93
MO 10-15	Exponencial	0.312	0.998	12	0.687	0.012	0.40

Donde: MO= materia orgánica; RSS= suma de cuadrados de los residuales.

En la Figura 5.14 se muestran los semivariogramas del contenido de materia orgánica del suelo, en la cual se observa que la profundidad de 0-5 cm y 5-10 cm, esta propiedad se ajusto al modelo lineal, con umbral no definido y un R^2 mayor de 0.75, que corrobora la alta dependencia espacial de esta propiedad hasta los 10 cm de profundidad, pero de 10-15 cm de profundidad el semivariograma se ajustó a un modelo exponencial con umbral definido a 12 m de distancia y un $R^2= 0.40$, valor relativamente bajo que

nos indica la poca confiabilidad de afirmar que la baja dependencia espacial a esta profundidad sea correcta, pero fue el modelo exponencial el que más ajustó el contenido de MO de 10-15 cm de profundidad.

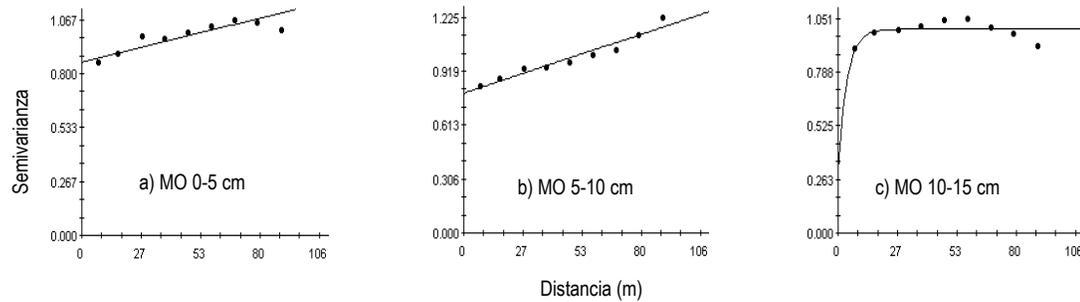


Figura 5.14. Semivariogramas de la materia orgánica (MO) del suelo.

5.2.5 Semivariograma de variabilidad espacial de la distribución del tamaño de partículas del suelo

La distribución del tamaño de partículas tiene influencia en las propiedades de retención y transmisión de humedad en el suelo, la facilidad de abastecimiento de nutrientes, agua, aire y calor, todas de gran importancia para la vida de las plantas y es una propiedad poco variable en el tiempo. En el Cuadro 5.12 se muestra los valores de variabilidad espacial del tamaño de partículas (arena, limo y arcilla). El contenido de arena no tuvo efecto nugget, pero si un rango de 89 m de distancia, por el contrario, el contenido de limo y arcilla tuvieron un efecto nugget de 0.61 y 0.56 con un rango de 89 m de distancia; en consecuencia, este suelo presenta alta dependencia espacial con respecto a la distribución del tamaño de partículas que lo conforman.

Cuadro 5.12. Valores de los semivariogramas de la distribución del tamaño de partículas del suelo.

Propiedad (cm)	Modelo de ajuste	Nugget C_0	Sill C_0+C	Rango (m) A_0	Proporción $C/(C_0+C)$	RSS	R^2
Arena	Lineal	0.001	1.718	89	0.999	0.352	0.87
Limo	Lineal	0.610	1.250	89	0.512	0.141	0.70
Arcilla	Lineal	0.566	1.323	89	0.572	0.144	0.75

Donde: RSS= suma de cuadrados de los residuales.

En la Figura 5.15 se observa los semivariogramas para el contenido de arena, limo y arcilla del suelo, en la cual se ilustra que en los tres casos los semivariogramas se ajustaron a un modelo lineal, con umbral definido para el contenido de arena y $R^2= 0.87$; pero el contenido de limo y arcilla presentaron umbral no definido con R^2 de 0.70 y 0.75 respectivamente.

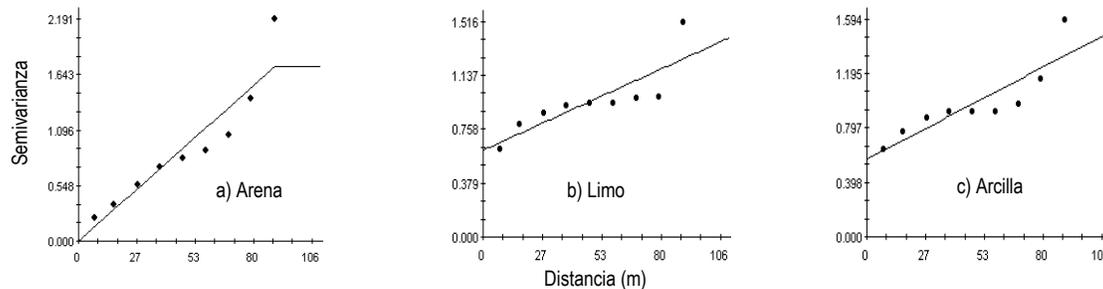


Figura 5.15. Semivariogramas de la distribución del tamaño de partículas del suelo.

5.2.6 Semivariograma de variabilidad espacial de la humedad gravimétrica y densidad aparente del suelo

Se considera que las propiedades, tales como: el contenido de humedad gravimétrico (θ_g) y la densidad aparente (ρ_a) del suelo varían fuertemente en el espacio, esta característica define su heterogeneidad; en consecuencia, una porción definida de la superficie del suelo se puede subdividir en diferentes áreas de acuerdo con sus características cuantitativas y cualitativas. En el Cuadro 5.13 se presentan los parámetros geoestadísticos correspondientes al contenido de humedad gravimétrico y densidad aparente del suelo, a profundidades de 0-5 y 25-30 cm provenientes de 100 puntos centrales de la parcela experimental.

Los valores del Cuadro 5.13, muestran que el contenido de humedad gravimétrico del suelo a estas dos profundidades, resultaron ser muy similares y presentaron un efecto nugget de 0.588 a la profundidad de 25-30 cm y de 0.380 para la profundidad de 0-5 cm, con una dependencia espacial a 43 m de distancia en ambos casos.

Con respecto a la densidad aparente del suelo, ésta propiedad presentó a la profundidad de 0-5 cm un efecto nugget de 0.594 con una dependencias espacial de 43 m de distancia; por consiguiente, la

profundidad de 25 a 30 cm el efecto nugget fue de 0.536 y una dependencia espacial a 19 m de distancia, que significa que a mayor profundidad existe menor dependencia espacial de esta propiedad.

Cuadro 5.13. Valores de los semivariogramas de la humedad gravimétrica (θ_g) y densidad aparente (ρ_a) del suelo.

Propiedad (cm)	Modelo de ajuste	Nugget C_0	Sill C_0+C	Rango (m) A_0	Proporción $C/(C_0+C)$	RSS	R^2
θ_g 0-5	Lineal	0.380	1.402	43	0.729	0.068	0.92
θ_g 25-30	Lineal	0.588	1.291	43	0.545	0.042	0.90
ρ_a 0-5	Lineal	0.594	1.283	43	0.537	0.018	0.95
ρ_a 25-30	Lineal	0.536	1.073	19	0.510	0.004	0.98

Donde: θ_g = humedad gravimétrica (%); ρ_a = densidad aparente ($g\ cm^{-3}$); RSS= suma de cuadrados de los residuales.

En la Figura 5.16 se ilustran los semivariogramas del contenido de humedad gravimétrico y densidad aparente del suelo a dos profundidades de 0-5 y 25-30 cm. En la Figura 5.16a se observa, que el semivariograma del contenido de humedad gravimétrico se ajustó a un modelo lineal con umbral definido a 43 m de distancia y $R^2= 0.90$; en la Figura 5.16b, el semivariograma también se ajustó a un modelo lineal con umbral no definido y un $R^2= 0.92$.

El semivariograma de la densidad aparente del suelo de 0-5 cm (Figura 5.16c), se ajustó a un modelo lineal con $R^2= 0.95$ con umbral no definido, pero la profundidad de 25-30 cm (Figura 5.16d), también se ajustó a un modelo lineal con umbral definido a 19 m de distancia y un $R^2= 0.98$.

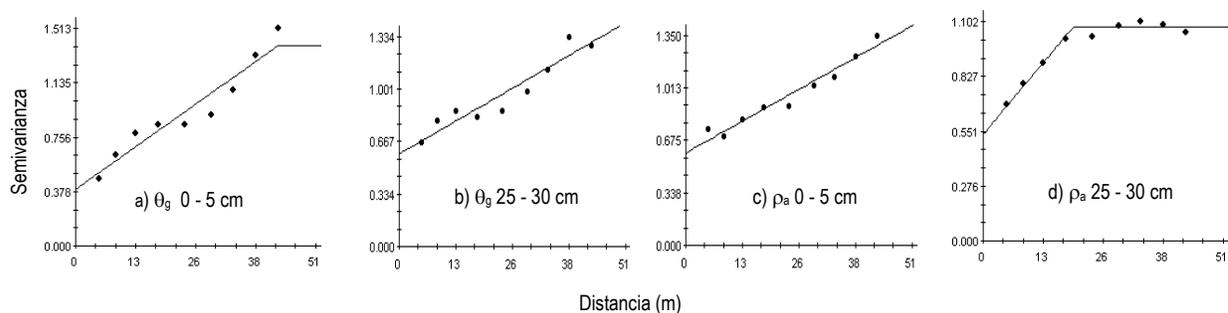


Figura 5.16. Semivariogramas de la humedad gravimétrica (θ_g) y densidad aparente (ρ_a) del suelo.

5.2.7 Semivariograma de variabilidad espacial del rendimiento de los cultivos de haba, maíz y frijol

Los valores geoestadísticos de rendimiento en grano de haba, maíz y frijol se muestran en el Cuadro 5.14, en la cual se observa, que el rendimiento en grano de haba tiene un efecto nugget de 0.269, el maíz de 0.240 y el frijol no tuvo efecto nugget, pero el haba tiene una dependencia espacial de 73 m, el maíz de 44 m y el frijol de 64 m de distancia. También podemos observar que los resultados geoestadísticos para los tres cultivos juntos con valores estandarizados, se obtuvo un efecto nugget de 0.795, con una dependencia espacial de 94 m de distancia.

Cuadro 5.14. Valores de los semivariogramas del rendimiento de haba, maíz y frijol.

Cultivos	Modelo de ajuste	Nugget C_0	Sill C_0+C	Rango (m) A_0	Proporción $C/(C_0+C)$	RSS	R^2
Haba	Lineal	0.269	1.404	73	0.808	0.003	0.99
Maíz	Esférico	0.240	1.076	44	0.776	0.037	0.93
Frijol	Esférico	0.001	1.223	64	0.999	0.158	0.91
Haba-maíz-frijol	Lineal	0.795	1.207	94	0.341	0.033	0.82

Donde: RSS= suma de cuadrados de los residuales.

En la Figura 5.17 se ilustra los semivariogramas para los cultivos de haba, maíz, frijol y haba-maíz-frijol estandarizada, mediante este método de análisis se obtuvo que el haba se ajustó a un modelo lineal, con umbral definido y $R^2 = 0.99$; el maíz y frijol se ajustó al modelo esférico con umbral definido y R^2 de 0.93 y 0.91 respectivamente, y el rendimiento de haba-maíz-frijol con valores estandarizados, se ajustó al modelo lineal con umbral no definido y $R^2 = 0.82$.

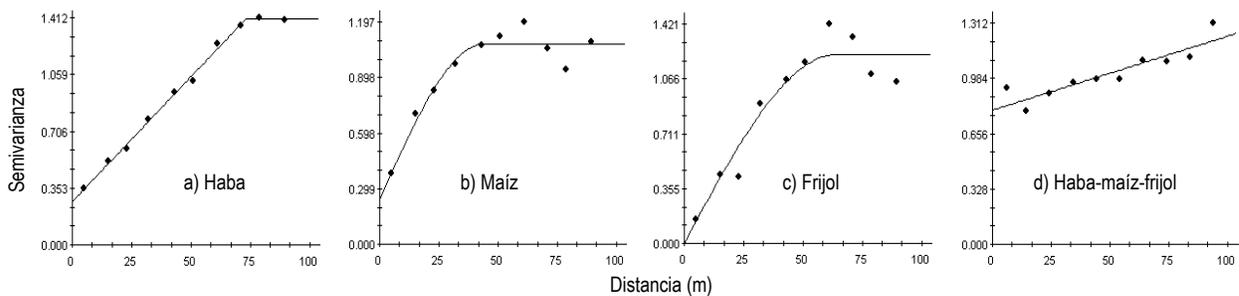


Figura 5.17. Semivariogramas del rendimiento de haba, maíz y frijol.

5.2.8 Mapa de variabilidad espacial de la humedad volumétrica del suelo

Para obtener el mapa de variabilidad espacial, se utilizó la técnica del krigado de la humedad volumétrica (θ_v) del suelo a 15 cm de profundidad, primeramente se ajustaron los valores a una distribución normal y se calculó el semivariograma, posteriormente se construyó el mapa de variabilidad espacial que se ilustra en la Figura 5.18.

El mapa de la variabilidad espacial de la humedad volumétrica del suelo que se muestra en la Figura 5.18, observamos en la parte superior de la parcela experimental con coordenadas de 2-76 m (eje X) y 94-102 m (eje Y), fue el área con menos humedad, incluso llegó en algunos puntos a humedad de punto de marchitamiento permanente (PMP), pero en algunas áreas muy pequeñas ubicadas en las coordenadas de 0-44 m (eje X) y 0-2 m (eje Y); 2-6 m (eje X) y 12-16 m (eje Y); 70-72 m (eje X) y 58-62 m (eje Y), la humedad volumétrica se aproximó a humedad de capacidad de campo (CC), en toda el área restante la humedad fue muy uniforme, es decir, se mantuvo entre PMP y CC, que es la humedad aprovechable (θ_a) para las plantas.

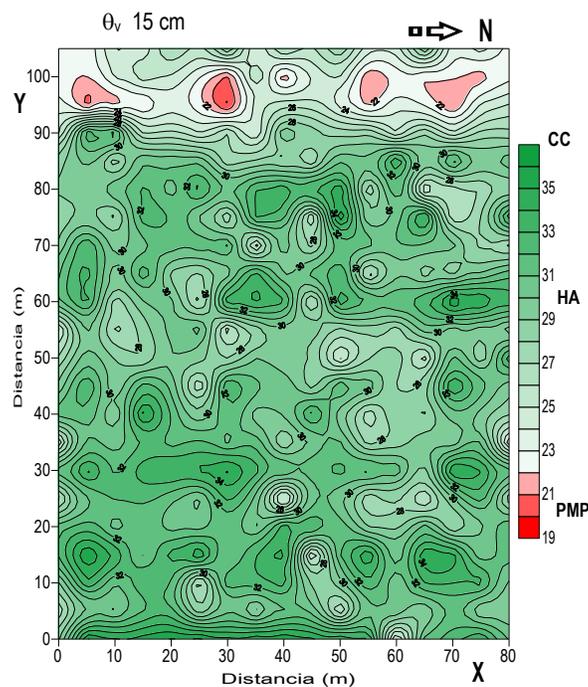


Figura 5.18. Mapa de variabilidad espacial de la humedad volumétrica (θ_v) del suelo.

5.2.9 Mapa de variabilidad espacial de la resistencia mecánica del suelo

En la Figura 5.19a, se muestra que a dos centímetros de profundidad la resistencia mecánica del suelo es menor en comparación a las otras profundidades estudiadas, a esta profundidad la parcela experimental se divide en dos áreas. Por ejemplo, la que se ubica de 0-80 m y 10-52 m; 10-80 m y 84-94 m; entre otras, eje X y eje Y respectivamente, son áreas con valores menores a 800 kPa favorables para el desarrollo de los cultivos (Keith y Mullins, 2001). De acuerdo con el mismo autor las franjas ubicadas de 0-80 m y 94-103 m; 8-80 m y 4-12 m; entre otras, eje X y eje Y respectivamente, los valores son comprendidos de 800-2 500 kPa, que son críticos para el crecimiento de las plantas.

En la profundidad de cinco centímetros la variabilidad espacial de la resistencia mecánica se muestra en la Figura 5.19b, en la cual, se observa áreas pequeñas con valores menores a 800 kPa y una área predominante de 800-2 500 kPa que son críticos para el crecimiento de las plantas (Keith y Mullins, 2001); pero también existen áreas con valores de 2 500 kPa, estas son valores no aptos para el uso agrícola (Carter, 1988); además encontramos áreas con valores de 3 000-3 500 kPa, estos valores de resistencia indican que las raíces de las plantas se reduce su exploración en 80% (Oades, 1993).

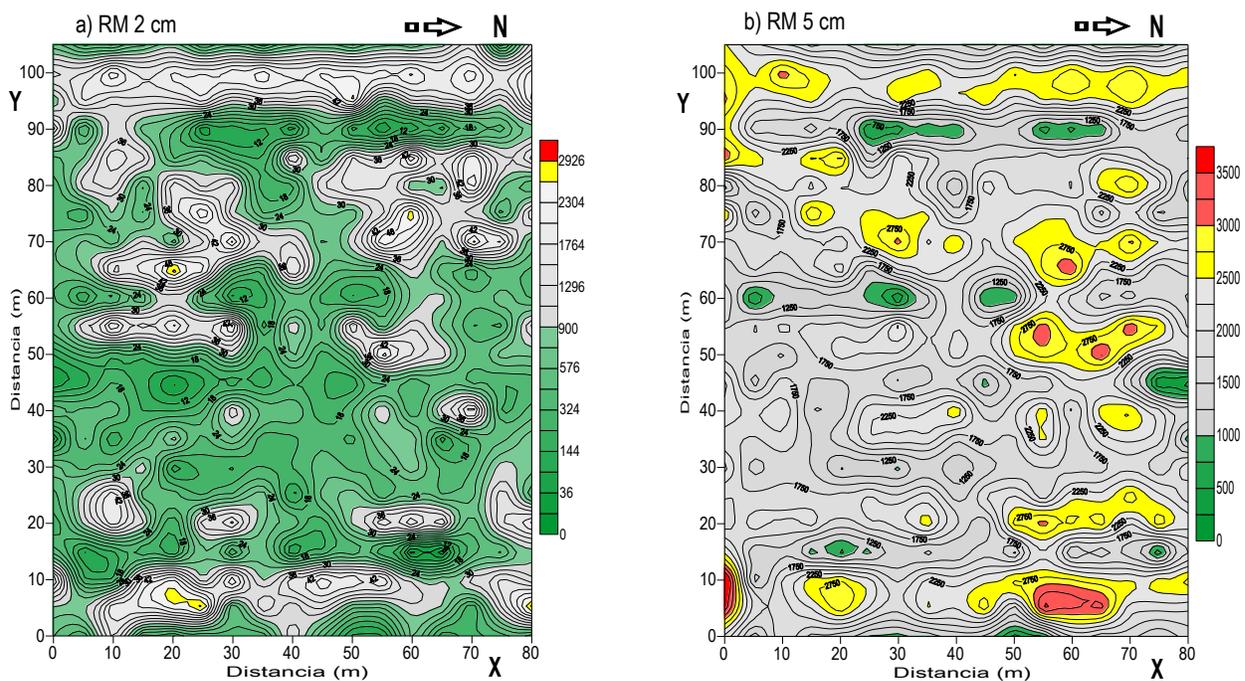


Figura 5.19. Mapas de variabilidad espacial de la resistencia mecánica (RM) del suelo.

En la Figura 5.19c y 5.19d, se ilustra el mapa de variabilidad espacial de la resistencia mecánica a 10 y 15 cm de profundidad, se observa que estos mapas son muy parecidos por que en ambos casos la superficie total de la parcela experimental presenta valores mayores a 800 kPa, que es crítico para el desarrollo de las plantas (Keith y Mullins, 2001), con excepción de algunas áreas muy pequeñas de la Figura 5.19c localizadas de 0-6 m y 2-16 m; 63-67 m y 4-10 m; entre otras, eje X y eje Y respectivamente, que muestran valores mayores a 2 500 kPa e indican una dureza del suelo no apta para el uso agrícola (Carter, 1988).

La Figura 5.19e representa el mapa de la variabilidad espacial a la profundidad de 20 cm, éste mapa es muy parecido a la Figura 5.19d; de la misma manera la Figura 5.19f, corresponde al mapa de la variabilidad espacial de la resistencia mecánica a 30 cm de profundidad, también muestra una área con valores mayores a 800 kPa, pero hay una franja localizada de 0-36 m (eje X), y 0-16 m (eje Y), en la cual existen pequeñas áreas con valores de resistencia mecánica mayores a 2 500 kPa. Finalmente en la Figura 5.19g se muestra el mapa de variabilidad espacial a 40 cm de profundidad, en éste mapa las áreas con mayor dureza se localizan en la franja de 0-40m (eje X) y 0-40 m (eje Y), éstas mismas áreas de la figura 5.19f se han expandido, es decir, a mayor profundidad la dureza del suelo aumenta en estos puntos.

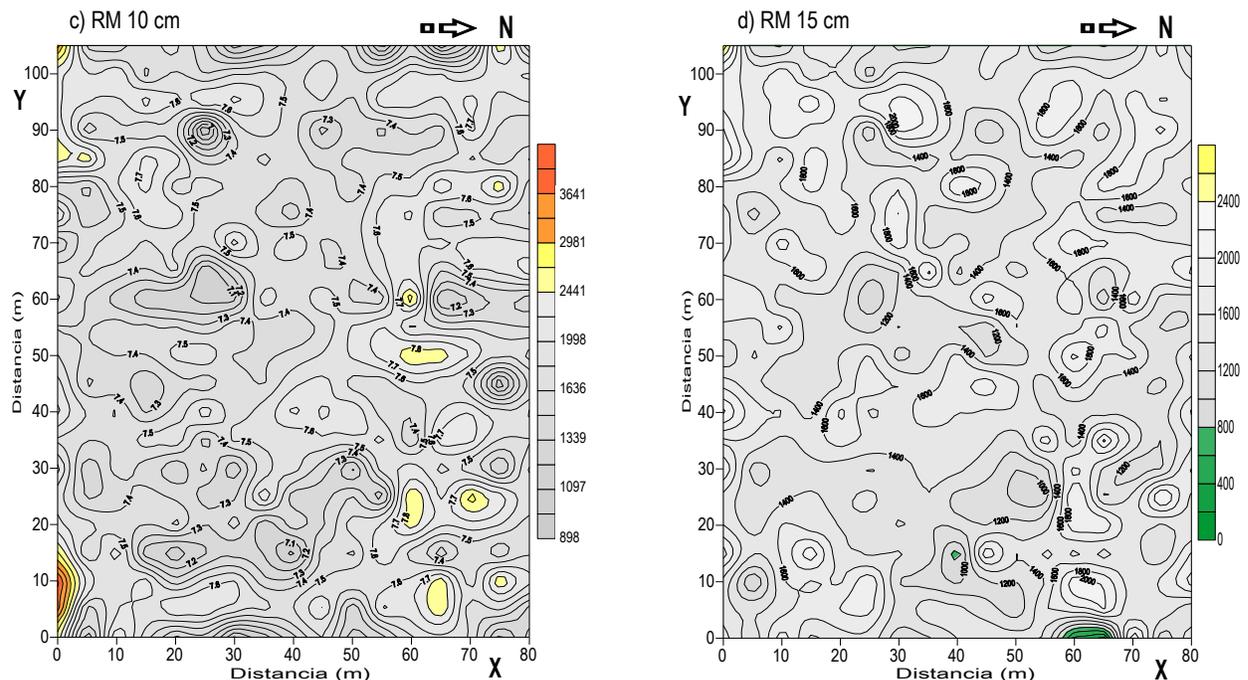


Figura 5.19. Mapas de variabilidad espacial de la resistencia mecánica (RM) del suelo (continuación).

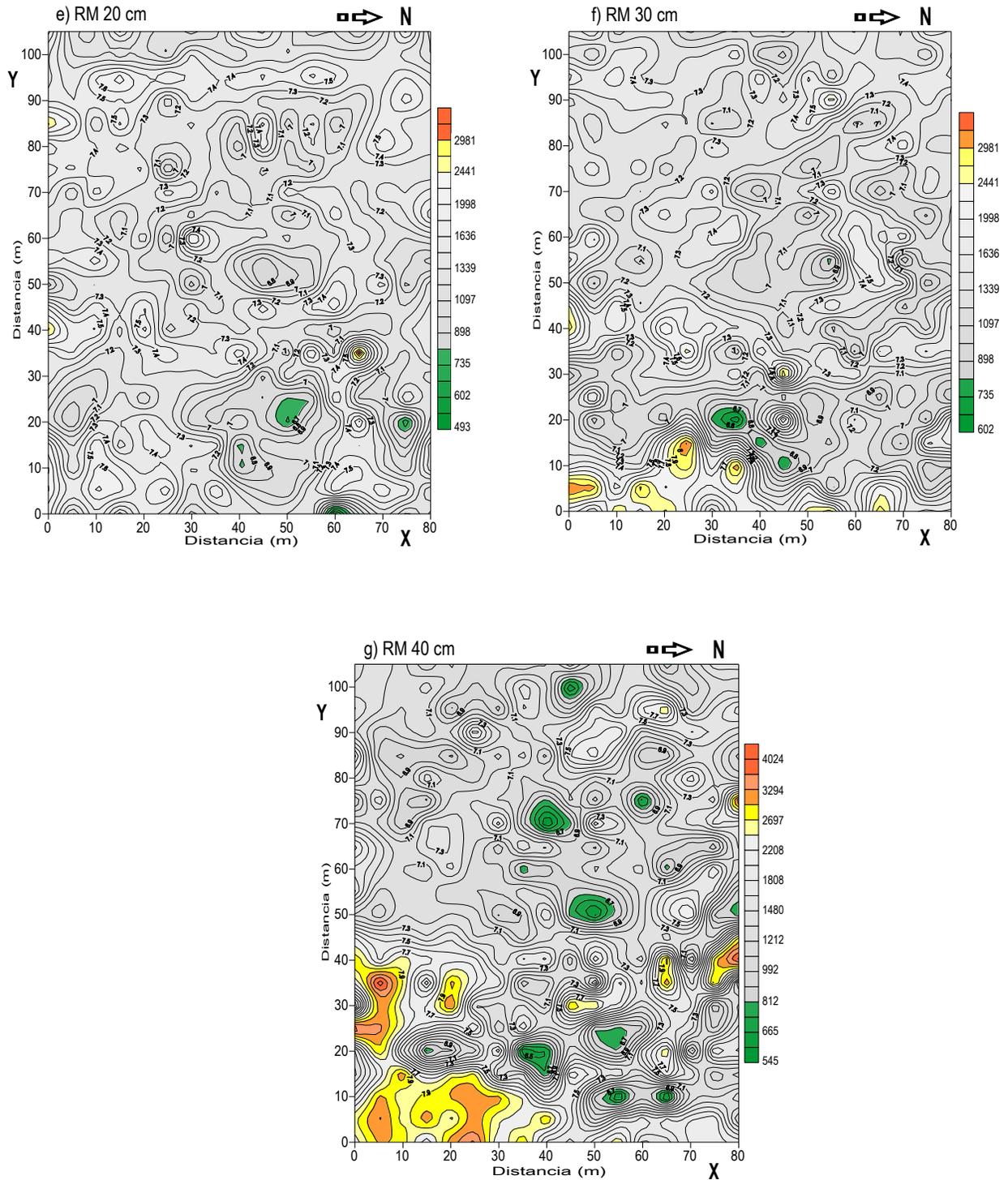


Figura 5.19. Mapas de variabilidad espacial de la resistencia mecánica (RM) del suelo (continuación).

5.2.10 Mapa de variabilidad espacial de la conductividad eléctrica del suelo

Los valores de la conductividad eléctrica del suelo, se ajustaron a una distribución normal y posteriormente se construyeron los mapas de variabilidad espacial de esta propiedad a tres profundidades (0-5, 5-10 y 10-15 cm), éstas se ilustran en la Figura 5.20.

En la Figura 5.20a, se ilustra las curvas de variabilidad espacial a la profundidad de 0-5 cm, se observa que en los tramos 8-30 m y 72-100 m; 50-60 m y 48-62 m; 16-72 m y 4-14 m (eje X y eje Y respectivamente), se muestra una conductividad eléctrica alta, pero no se considera como un suelo salino o con problemas para el desarrollo de las plantas (Vázquez 1997); este comportamiento es muy similar en las tres profundidades estudiadas en los mismos tramos de distancia (Figura 5.20b y 5.20c). Esta técnica es indispensable para localizar áreas o posibles puntos críticos donde se necesiten hacer adecuaciones para un buen funcionamiento del sistema.

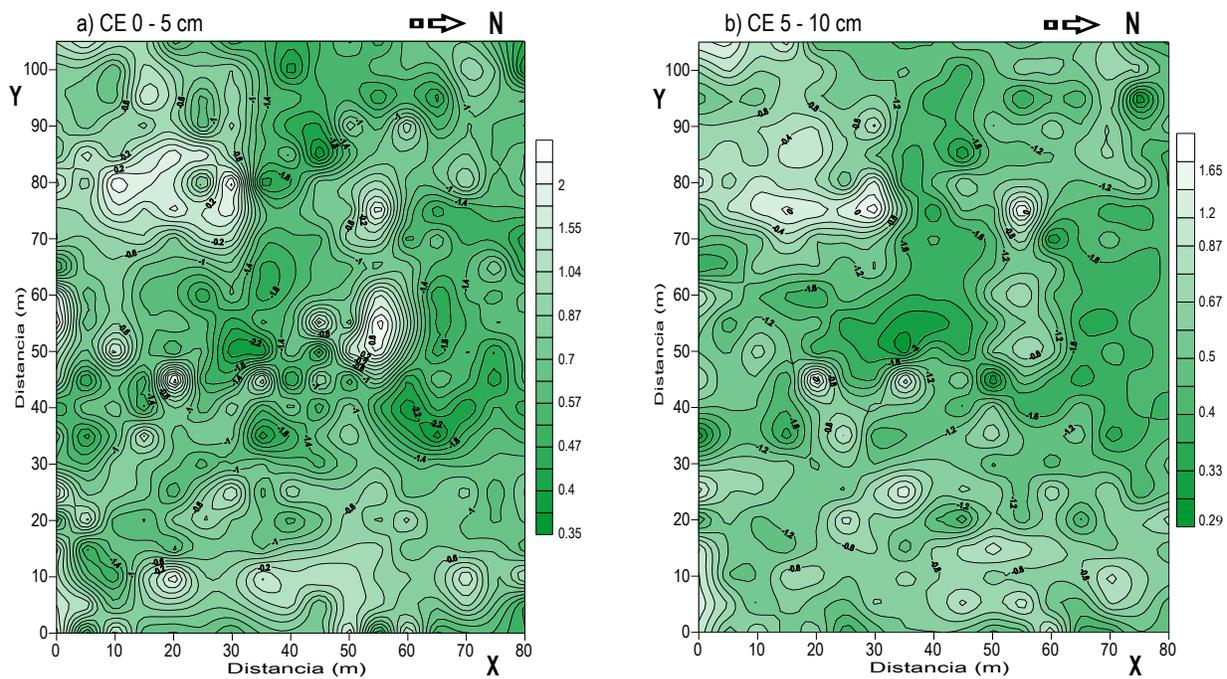


Figura 5.20. Mapas de variabilidad espacial de la conductividad eléctrica (CE) del suelo.

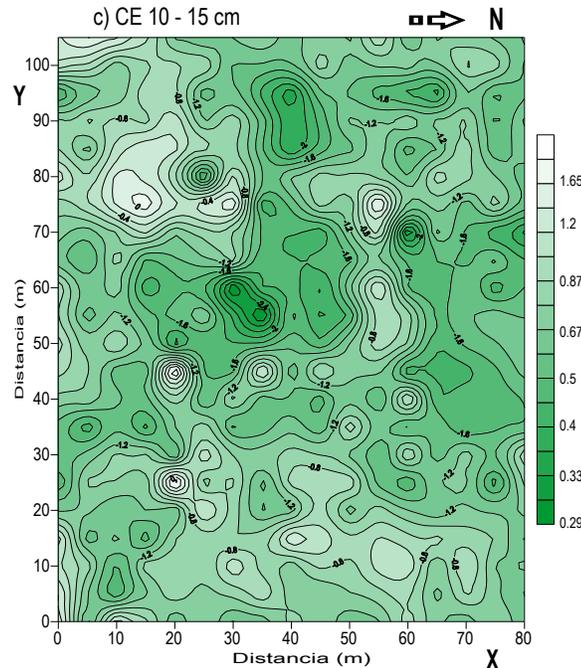


Figura 5.20. Mapa de variabilidad espacial de la conductividad eléctrica (CE) del suelo (continuación).

5.2.11 Mapa de variabilidad espacial de la materia orgánica del suelo

En la Figura 5.21 se muestra la variabilidad espacial de la materia orgánica del suelo de 0-5, 5-10 y 10-15 cm de profundidad. En estos mapas se pueden observar franjas de la parcela experimental donde existe mayor o menor cantidad de materia orgánica en el suelo. Por ejemplo en la Figura 5.21a, se observa que en los tramos de 0-15 m y 0-20 m; 27-47 m y 10-20 m; 57-77 m y 5-15 m; entre otros puntos (eje X y eje Y respectivamente), la cantidad de materia orgánica se clasifica como rico (2.41-4.2%) y en la mayor área de ésta parcela el contenido de materia orgánica se clasifica como medio (1.21-2.4%). En la profundidad de 5-10 cm (Figura 5.21b), el contenido de materia orgánica se clasifica como medio en toda el área de la parcela experimental (Vázquez 1997).

Sin embargo, en la Figura 5.21c, que representa a la profundidad de 10-15 cm, el contenido de materia orgánica disminuye con respecto a las profundidades anteriores, podemos mencionar algunas áreas pequeñas de 10-27 m (eje X) y 57-70 (eje Y), así también en el tramo 53-58 m (eje X) y 68-74 m (eje Y) muestran un contenido de materia orgánica clasificada como pobre (<1.2%) y en el resto de la parcela el contenido de materia orgánica es clasificada como medio de 1.21 a 2.4% (Vázquez 1997).

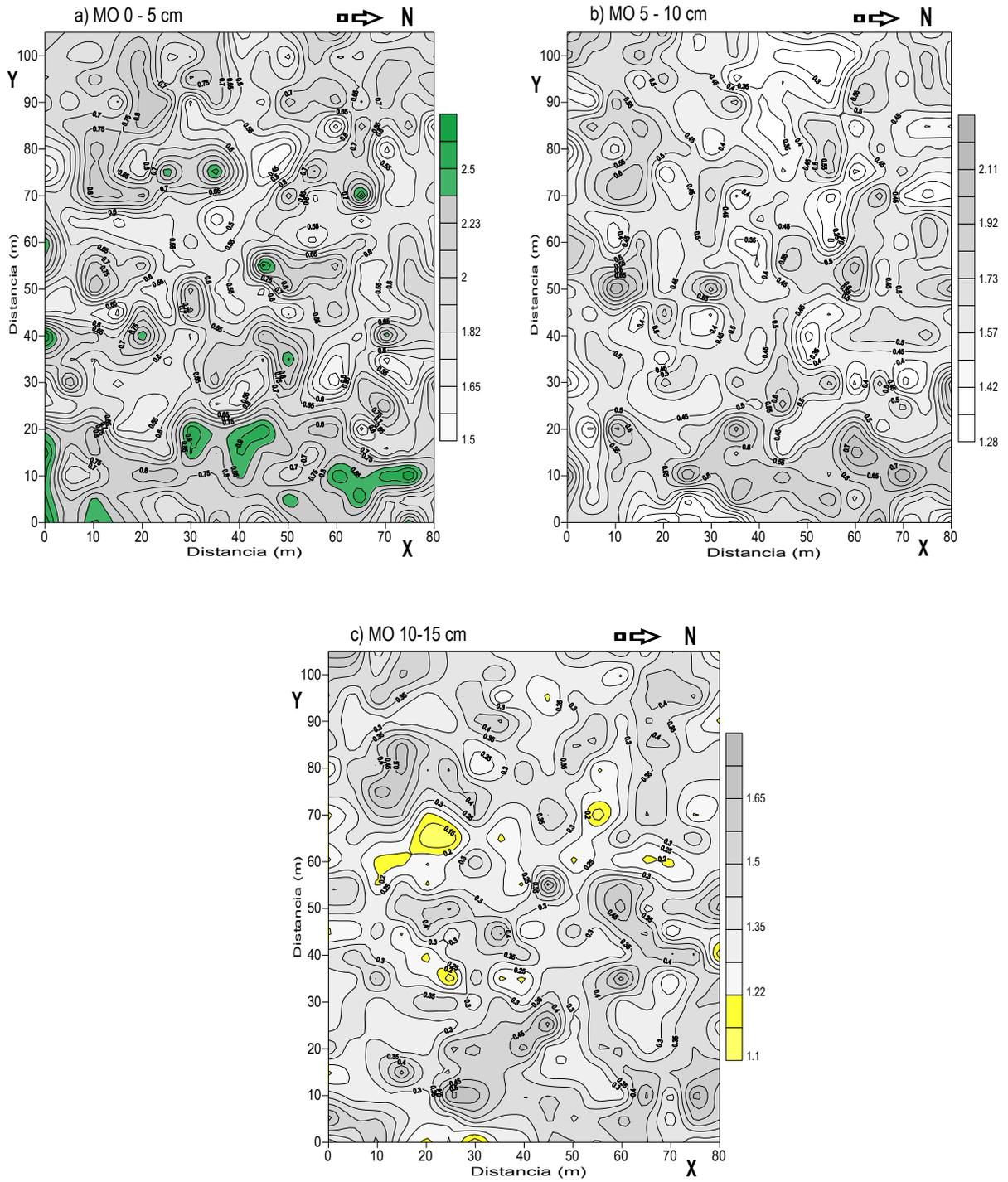


Figura 5.21. Mapas de variabilidad espacial de la materia orgánica (MO) del suelo.

5.2.12 Mapa de variabilidad espacial de la distribución del tamaño de partículas del suelo

En la Figura 5.22 se muestra la distribución del tamaño de partículas en la parcela, esta propiedad física se determinó a la profundidad de 0-5 cm, predominando una textura franco arcillo-limosa. En la Figura 5.22a, se observa que la mayor cantidad de arena se localiza en la franja de 0-10 m (eje X) y 0-80 m (eje Y), aunque también existe una franja bien marcada con porcentajes menores de arena que se localiza en las coordenadas de 0-80 m (eje X) y 90-105 m (eje Y).

En la Figura 5.22b, se ilustra el contenido de limo de la parcela, destacando una franja con mayor contenido de limo, éstas se localizan de 0-80 m (eje X) y 90-100 m (eje Y) y una pequeña área de 60-70 m (eje X) y 17-24 m (eje Y), también existen pequeñas áreas en el terreno con menor porcentaje de contenido de limo. En la Figura 5.22c se refiere al contenido de arcilla que representa una alta cantidad para este suelo, en la parcela existe una franja con altos contenidos de arcilla, ésta se localiza de 30-80 m (eje X) y 100-105 m (eje Y), una segunda área se localiza de 40-50 (eje X) y 47-54 m (eje Y).

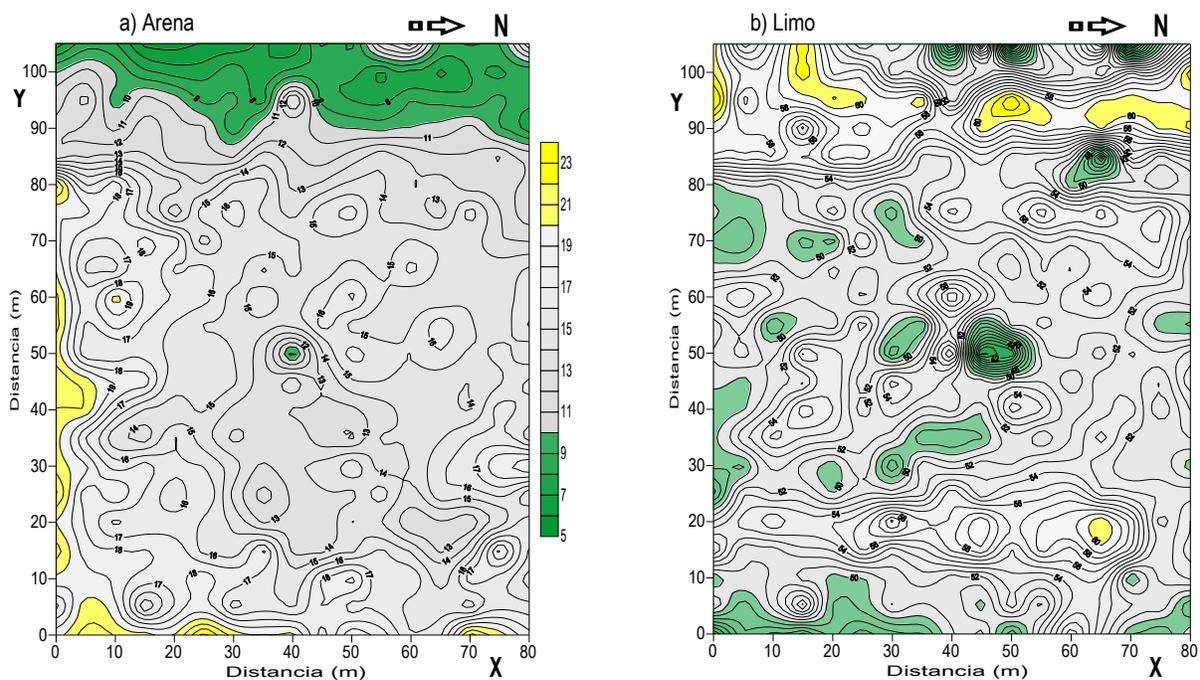
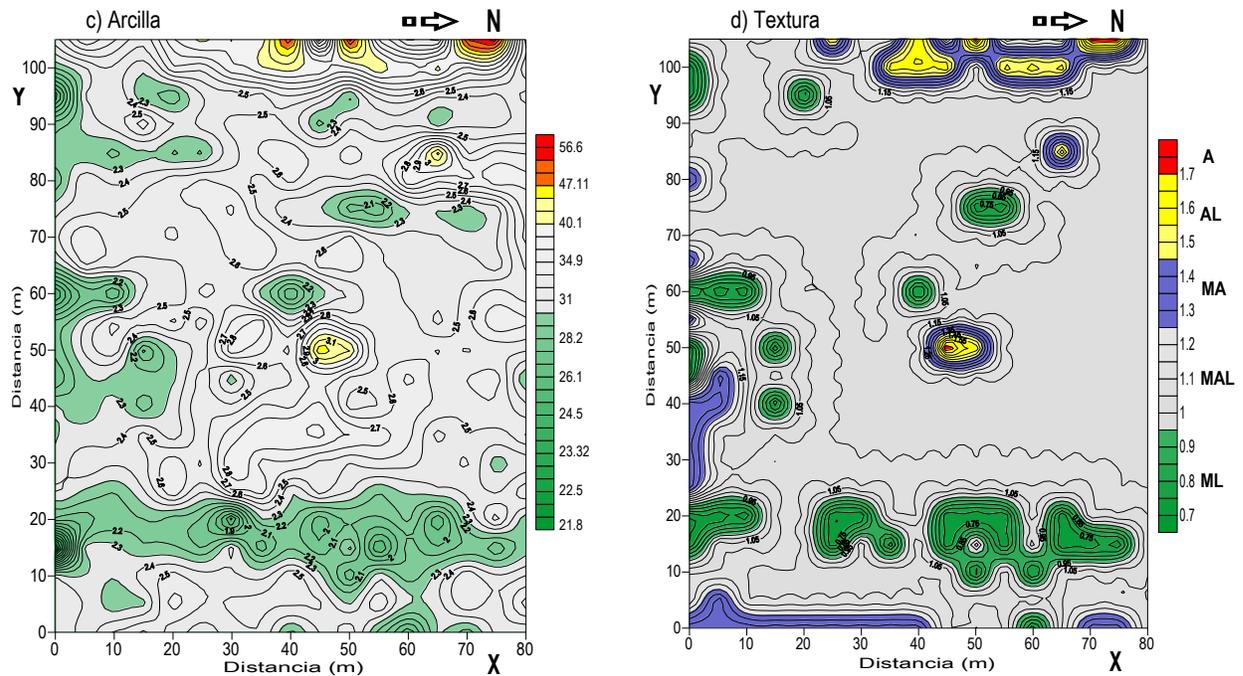


Figura 5.22. Mapas de variabilidad espacial de la distribución del tamaño de partículas del suelo.

Finalmente en la Figura 5.22d se ilustra la variabilidad espacial de la textura del suelo en la parcela experimental, la textura migajón arcillo-limoso predomina con mayor área, siguiendo textura migajón limoso que se destaca en una franja de 0-80 m (eje X) y 10-23 m (eje Y) y otros puntos aislados, la textura migajón arcilloso, arcillo limoso y arcilloso se ubican en la franja de 30-80 m (eje X) y 95-105 m (eje Y), entre otras pequeñas áreas.



Donde: A= arcilloso; AL= arcillo limoso; MA= migajon arcilloso; MAL= migajon arcillo limoso; M L= migajon limoso.

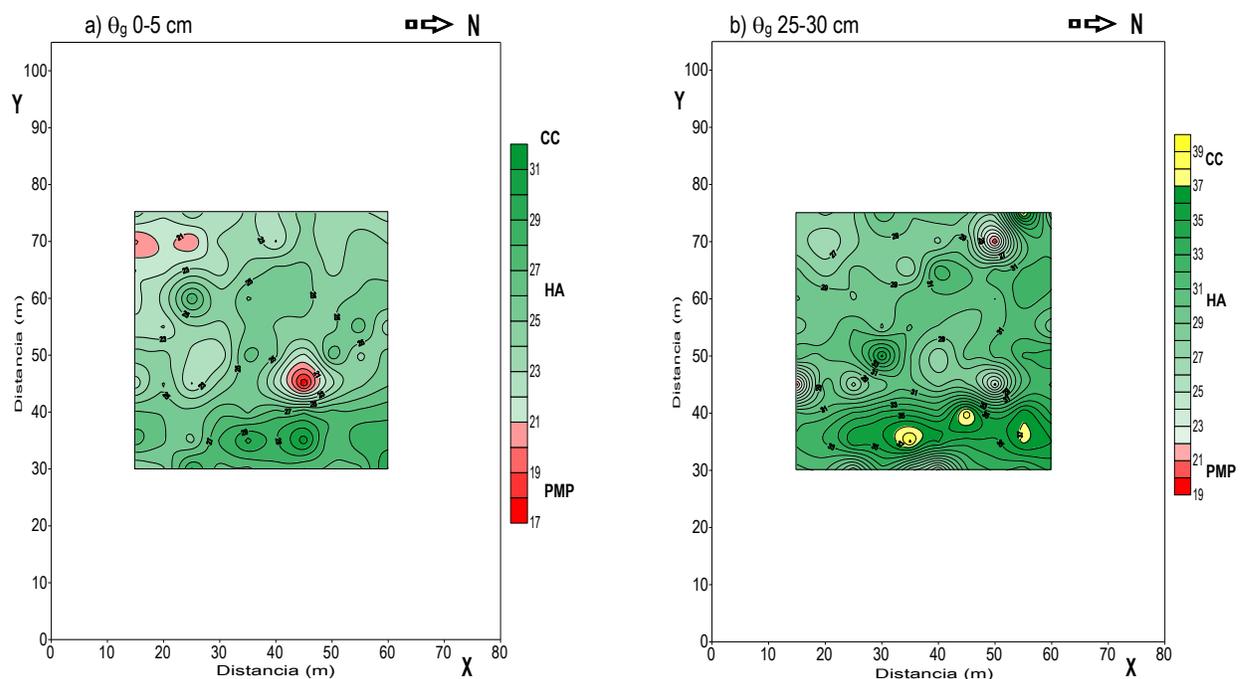
Figura 5.22. Mapas de variabilidad espacial de la distribución del tamaño de partículas del suelo (continuación).

5.2.13 Mapa de variabilidad espacial del contenido de humedad gravimétrica y densidad aparente del suelo

En la Figura 5.23a y 5.23b, se ilustran las curvas de variabilidad espacial del contenido de humedad gravimétrica (θ_g) del suelo de 0-5 y 25-30 cm de profundidad, en la cual se observa que en la profundidad de 0-5 cm, existen algunos puntos localizados en las coordenadas 42-48 m (eje X) y 43-49 m (eje Y), así también de 15-26 m (eje X) y 67-72 m (eje Y), en donde la humedad llegó a punto de marchitamiento permanente (PMP), en la mayor parte del área muestreada de la parcela experimental se mantuvo con

humedad aprovechable para las plantas, en esta profundidad no se obtuvieron valores de humedad a capacidad de campo (CC).

Con respecto a la Figura 5.23b se muestra un pequeño punto localizado en las coordenada de 49-51 m (eje X) y 69-71 m (eje Y), en la cual la humedad se mantuvo en punto de marchitamiento permanente PMP); también se muestra una franja localizada de 33-56 m (eje X) y 35-40 m (eje Y) en donde la humedad llego a capacidad de campo (CC), en la mayor superficie de la parcela muestreada se mantuvo a humedad aprovechable para los cultivos.



Donde: PMP= punto de marchitamiento permanente; HA= humedad aprovechable; CC= capacidad de campo.

Figura 5.23. Mapas de variabilidad espacial de la humedad gravimétrica (θ_g) del suelo.

Los mapas de variabilidad espacial de la densidad aparente (ρ_a) del suelo se ilustra en la Figura 5.24a y 5.24b de 0-5 y 25-30 cm de profundidad respectivamente, se observa que en la Figura 5.24a de la profundidad de 0-5 cm se identifican áreas con diferentes densidades aparentes, la primera se ubica de 30-60 m (eje X) y 30-50 m (eje Y); 40-48 m (eje X) y 50-60 m (eje Y) entre otras, que corresponde a una densidad aparente de suelos labrados recientemente ($1.0-1.1 \text{ g cm}^{-3}$), la segunda área que comprende la mayor superficie de la parcela experimental corresponde a una densidad aparente de suelo labrado

compactado (1.2 g cm^{-3}) y una tercera se localiza en las coordenadas de 15-26 m (eje X) y 44-51 m (eje Y), también de 15-20 (eje X) y 73-74 m (eje Y) se clasifica como suelo labrado muy compactado de $1.3-1.4 \text{ g cm}^{-3}$ (Kaúrichev, 1984).

En la Figura 5.24b que corresponde a la profundidad de 25-30 cm, la mayor parte de la superficie de la parcela experimental tuvo densidad aparente de $1.0-1.1 \text{ g cm}^{-3}$ y se clasifica como de un suelo labrado recientemente, también se observan pequeñas áreas como la localizada de 25-45 m (eje X) y 44-52 m (eje Y), así también la que se localiza de 35-50 m (eje X) y 58-67 m (eje Y) que corresponde a una densidad aparente mayor a 1.2 g cm^{-3} para suelos labrados compactados (Kaúrichev, 1984).

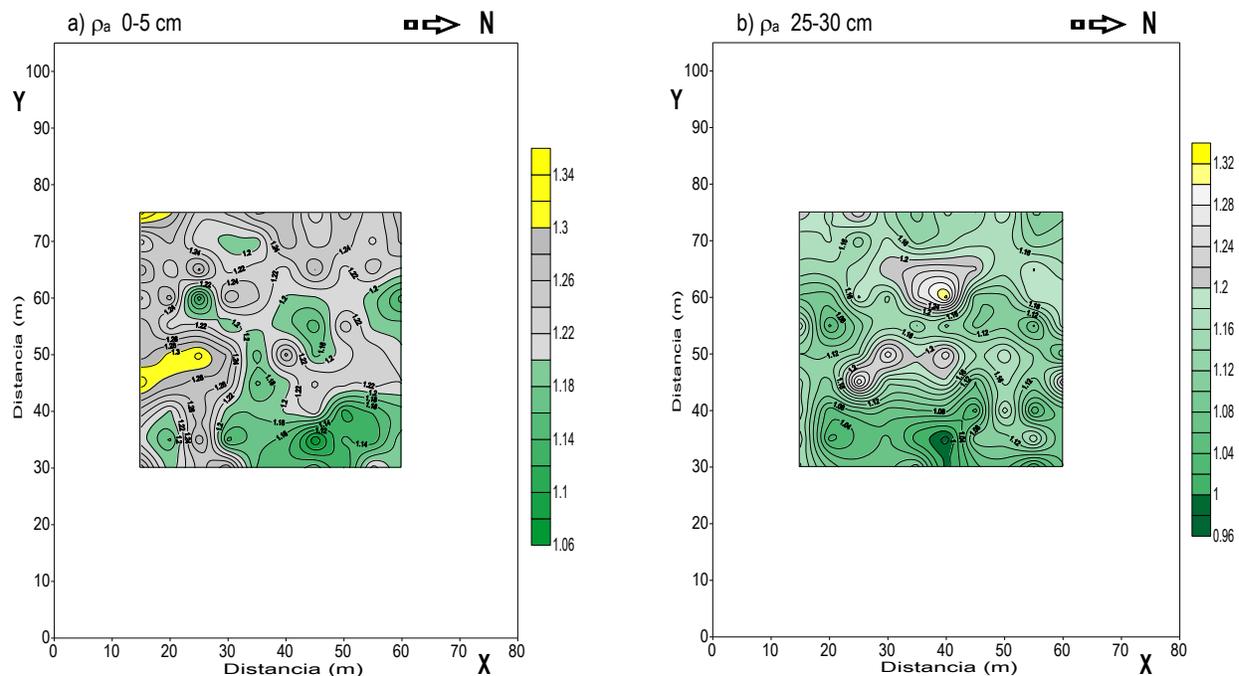


Figura 5.24. Mapas de variabilidad espacial de la densidad aparente (ρ_a) del suelo.

5.2.14 Mapa de variabilidad espacial del rendimiento de haba, maíz y frijol

En la Figura 5.25 se muestra la variabilidad espacial del rendimiento de los cultivos de haba, maíz, frijol y el rendimiento de los tres cultivos con valores estandarizados. En la Figura 5.25a, se ilustra la variabilidad espacial del rendimiento del haba, en la cual, se puede observar tres áreas con diferentes rendimientos, la primera corresponde a una superficie pequeña localizada de 76-80 m y 90-95 m; 0-5 m y 45-50 m (eje X y

eje Y respectivamente), este rendimiento es menor al promedio de la variedad ($1\ 100\ \text{kg ha}^{-1}$); la segunda área que corresponde a la mayor superficie de la parcela experimental los rendimientos obtenidos son iguales al promedio recomendado de la variedad ($1\ 100\text{-}2\ 500\ \text{kg ha}^{-1}$) y una tercera área localizada de 26-80 m (eje X) y 0-55 m (eje Y), el rendimiento es mayor al promedio de la variedad.

La Figura 5.25b se ilustra el mapa de variabilidad espacial del rendimiento de maíz, en dicho mapa se observa que el rendimiento obtenido es menor a la media ($>4\ 800\ \text{kg ha}^{-1}$) recomendada por el híbrido, ésta se localiza en las coordenadas de 0-60 m (eje X) y 20-55 m (eje Y), pero el rendimiento igual a la media ($4\ 800\text{-}6\ 800\ \text{kg ha}^{-1}$) se localiza en la mayor parte de la superficie de la parcela experimental; rendimiento mayores a la media se ubican de 0-22 m (eje X) y 95-100 m (eje Y); 50-80 m (eje X) y 65- 85 m (eje Y); entre otras.

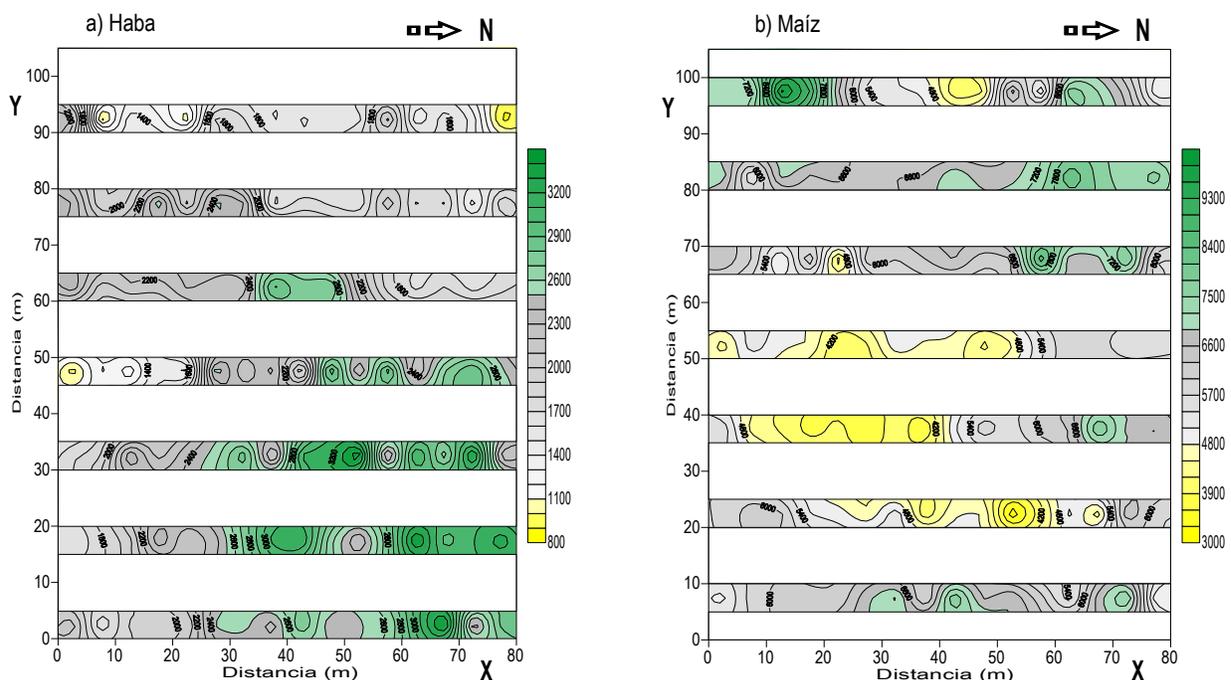


Figura 5.25. Mapas de variabilidad espacial del rendimiento de haba y maíz.

Los rendimientos del cultivo del frijol fueron menores con respecto al haba y maíz, el mapa de variabilidad espacial del rendimiento del frijol se ilustra en la Figura 5.25c, en la cual se observa que existen dos áreas con rendimientos iguales o menores al promedio nacional ($>700\ \text{kg ha}^{-1}$) localizadas de 15-36 m (eje X) y 100-105 m (eje Y), y de 60-78 m (eje X) y 100-105 m (eje Y). También hubo una franja que se localiza de

0-60 m (eje X) y 85-90 m (eje Y), así también de 8-50 m (eje X) y 10-15 m (eje Y), entre otras, en donde el rendimiento del frijol es menor a la media recomendada por la variedad ($1\ 300\ \text{kg ha}^{-1}$); en la mayor parte de la superficie de la parcela experimental el rendimiento del frijol fue igual al promedio de la variedad ($1\ 300\text{-}2\ 900\ \text{kg ha}^{-1}$) pero no se obtuvo rendimientos mayores al promedio recomendado.

La Figura 5.25d, representa el mapa de variabilidad espacial del rendimiento de los tres cultivos juntos, construido a partir de los valores estandarizados, en donde se puede observar que los menores rendimientos pueden obtenerse en varias áreas de la parcela, por ejemplo, podemos mencionar algunas localizadas de 0-80 m (eje X) y 100-105 m (eje Y); 0-80 m (eje X) y 86-94 m (eje Y); 0-28 (eje X) y 46-52 m (eje Y), entre otras; los rendimientos medios de los tres cultivos se localizaron en la mayor superficie de la parcela experimental; los rendimientos altos se localizaron en varios puntos del terreno, podemos mencionar algunos localizados de 44-80 m (eje X) y 30-48 m (eje Y); 58-78 m (eje X) y 66-74 m (eje Y); 8-20 m (eje X) y 94-100 m (eje Y), entre otros.

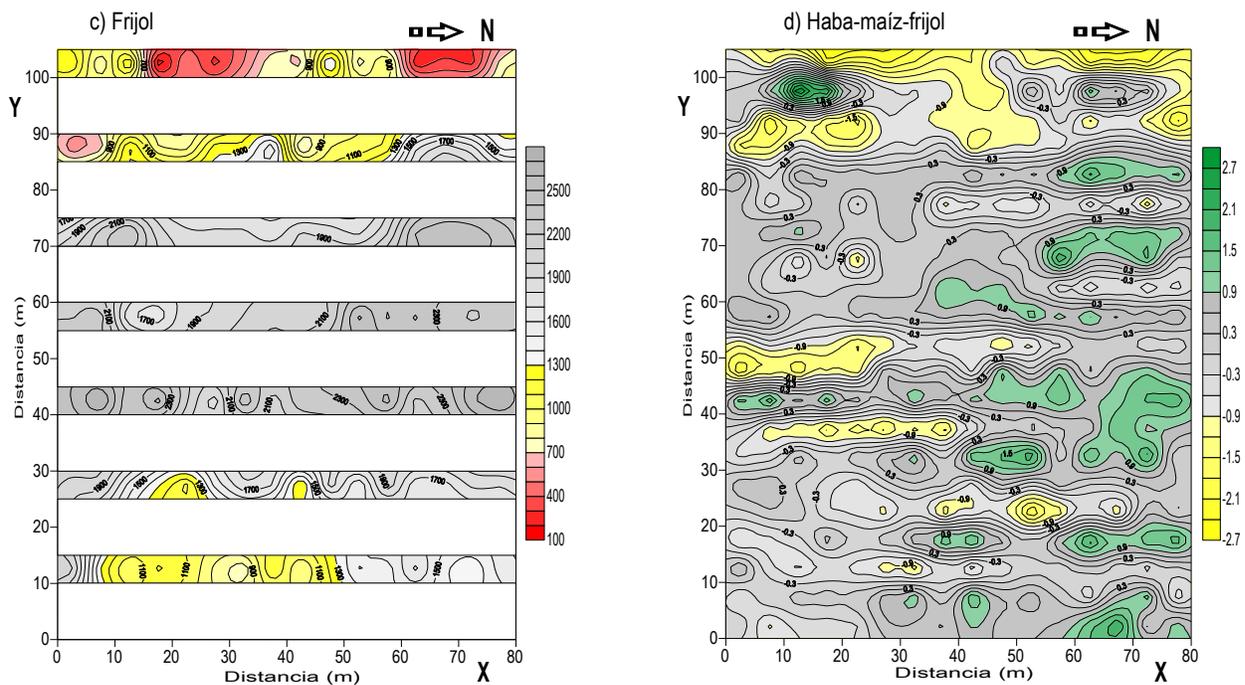


Figura 5.26. Mapas de variabilidad espacial del rendimiento de frijol y haba-maíz-frijol.

5.3 Análisis a través de conglomerados

En el estudio se efectuó un análisis conglomerados (Cluster analysis) a las variables de resistencia mecánica (RM), conductividad eléctrica (CE) y materia orgánica (MO), con el objetivo principal de agrupar objetos en conglomerados, de forma que cada objeto sea muy parecido a los que hay en el conglomerado total de acuerdo con el criterio de Ward (1963), quien argumentó que los conglomerados deberían constituirse de tal manera que, al fundirse dos objetos, la pérdida de información resultante de la fusión fuera mínima. En este contexto, la cantidad de información se cuantifica como la suma de las distancias al cuadrado de cada objeto respecto al centroide del conglomerado al que pertenece. Los conglomerados resultantes deben mostrar un alto grado de homogeneidad dentro de los grupos (mínima varianza) y un alto grado de heterogeneidad entre conglomerados (máxima varianza); gráficamente, los objetos dentro de los conglomerados estarán muy próximos, y los diferentes conglomerados muy alejados.

5.3.1 Conglomerados de la resistencia mecánica del suelo

En el Cuadro 5.15 se muestran 36 conglomerados de la resistencia mecánica del suelo, de acuerdo al coeficiente de aglomeración que es un valor numérico entre 0 y 1, que mide el grado de interrelación de los conglomerados desde el inicio del proceso, en el que todos los casos son conglomerados individuales, hasta la conclusión del mismo en el que hay un solo conglomerado que aglomera todos los casos. Los conglomerados formados presentan una estructura fuerte de aglomeración de 0.8, que indica que la última fusión es muy disimilar, mientras los conglomerados que se fusionan tienen sus objetos poco disimilares. Se trabajaron con valores estandarizados para evitar problemas de multicolinealidad.

Los 36 conglomerados del Cuadro 5.15, muestran que en algunos casos existe una correlación alta entre la resistencia mecánica del suelo con la profundidad de éste. Por ejemplo el cluster 22 se ajustó a una ecuación lineal con un $R^2 = 0.77$, que significa que a mayor profundidad existe mayor resistencia mecánica, pero en algunos casos sucedió al contrario como el cluster 1, aunque el cluster 11 fue el que menos se ajustó a la ecuación lineal con R^2 de 0.32. De los 36 cluster 21 de ellos se ajustaron a una ecuación polinómica con R^2 que varía de 0.43 a 0.92. Esto explica que la resistencia mecánica del suelo es muy variable en todas las profundidades exploradas.

Cuadro 5.15. Ecuaciones de regresión de conglomerados de la resistencia mecánica (RM) con la profundidad del suelo.

Conglomerados	Datos	Ecuación	Tipo	R ²
1	147	$Y = -33.022x + 2253.8$	Lineal	0.63
2	161	$Y = 0.127x^3 - 8.459x^2 + 139.9x + 829.1$	Polinómica	0.25
3	91	$Y = 0.069x^3 - 5.559x^2 + 130.67x + 455.7$	Polinómica	0.49
4	189	$Y = 0.117x^3 - 9.422x^2 + 223.5x + 41.7$	Polinómica	0.66
5	287	$Y = 0.185x^3 - 12.718x^2 + 234.86x + 393.5$	Polinómica	0.45
6	63	$Y = 361\ln x + 450.8$	Logarítmica	0.40
7	56	$Y = 0.269x^3 - 17.278x^2 + 290.91x + 516.2$	Polinómica	0.46
8	42	$Y = 0.243x^3 - 17.761x^2 + 371.72x - 556.9$	Polinómica	0.82
9	91	$Y = 0.217x^3 - 13.546x^2 + 242.6x + 218.3$	Polinómica	0.73
10	91	$Y = 0.154x^3 - 11.122x^2 + 228.19x + 296.7$	Polinómica	0.52
11	147	$Y = -18.022x + 2079.3$	Lineal	0.32
12	91	$Y = 0.179x^3 - 10.934x^2 + 181.79x + 1050.1$	Polinómica	0.28
13	119	$Y = 0.431x^2 - 34.253x + 1887.5$	Cuadrática	0.31
14	84	$Y = 0.125x^3 - 10.245x^2 + 233.11x + 370.6$	Polinómica	0.64
15	56	$Y = 0.276x^3 - 18.519x^2 + 332.25x + 358.4$	Polinómica	0.46
16	70	$Y = 0.138x^3 - 9.365x^2 + 140.1x + 1732.1$	Polinómica	0.58
17	84	$Y = 0.051x^3 - 3.919x^2 + 102.39x + 288.6$	Polinómica	0.44
18	98	$Y = 0.145x^3 - 7.681x^2 + 60.58x + 1913$	Polinómica	0.45
19	91	$Y = 0.3088x^3 - 18.03x^2 + 278.91x + 507.4$	Polinómica	0.58
20	56	$Y = 0.2372x^3 - 15.679x^2 + 303.74x + 344.9$	Polinómica	0.57
21	70	$Y = 0.262x^3 - 18.811x^2 + 350.1x - 491.9$	Polinómica	0.65
22	49	$Y = 59.601x + 368.6$	Lineal	0.77
23	63	$Y = -44.224x + 2746.5$	Lineal	0.63
24	42	$Y = 1.311x^2 - 75.799x + 2912.5$	Cuadrática	0.38
25	35	$Y = 0.416x^3 - 23.963x^2 - 393.91x - 90.4$	Polinómica	0.92
26	35	$Y = 24.939x + 1317.9$	Lineal	0.40
27	49	$Y = 59.873x + 439.7$	Lineal	0.75
28	21	$Y = 0.206x^3 - 11.49x^2 + 119.04x + 2090.8$	Polinómica	0.63
29	21	$Y = 3.217x^2 - 100.42x + 2057.4$	Cuadrática	0.71
30	35	$Y = 40.854x + 1472.8$	Lineal	0.51
31	21	$Y = 62.232x + 713.4$	Logarítmica	0.54
32	14	$Y = 0.263x^3 - 15.988x^2 + 241.82x + 1591.6$	Polinómica	0.43
33	14	$Y = 0.252x^3 - 17.959x^2 + 391.35x + 87.9$	Polinómica	0.74
34	14	$Y = -0.266x^3 + 18.152x^2 - 303.78x + 1703.3$	Polinómica	0.44
35	14	$Y = 0.357x^3 - 24.365x^2 + 407.1x + 1470.3$	Polinómica	0.65
36	7	$Y = 0.072x^3 - 5.1718x^2 + 80.12x + 3229.5$	Polinómica	0.33

Donde: Y= resistencia mecánica (kPa); x= profundidad del suelo (cm).

En la Figura 5.27a hasta la 5.27g se muestran las gráficas de cajas de cada conglomerado (cluster) por profundidad explorada, contruidos a partir de los cuantiles de cada grupo de conglomerado formado mediante el método de Ward. Las cajas simétricas significan que los valores de los conglomerados provienen de una distribución normal; la Figura 5.27a se observa que el 63% de los conglomerados de resistencia mecánica del suelo están formados con valores menores a 1 000 kPa. En cambio la Figura 5.27b el mayor número de conglomerados se encuentran formados con valores de 1 000 a 3 000 kPa, es decir, esta tiene valores de resistencia mecánica mayores que a dos centímetros de profundidad.

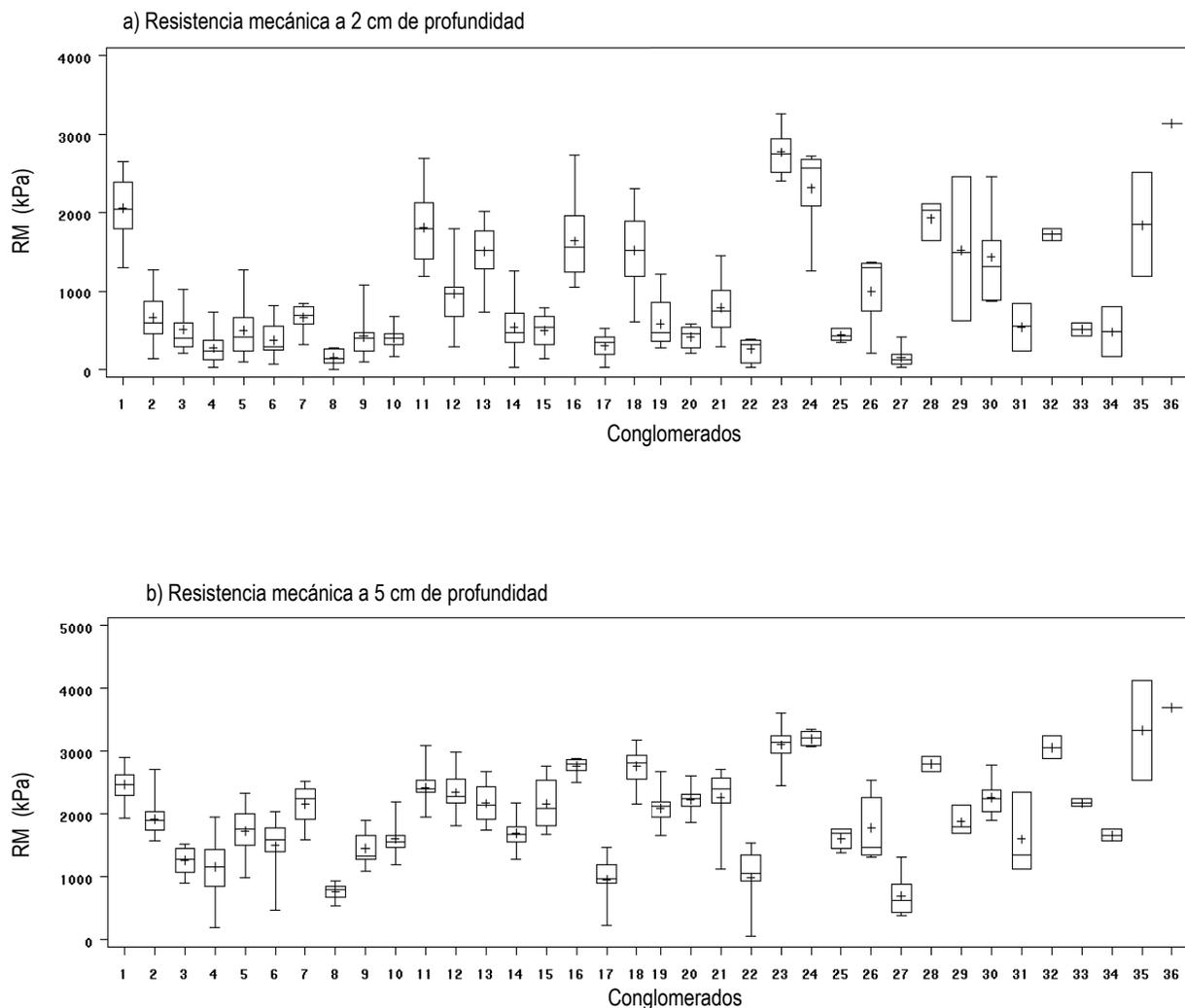


Figura 5.27. Gráficas de cuartiles de conglomerados de la resistencia mecánica (RM) del suelo.

En las Figuras 5.27c, d y e, el mayor número de conglomerados se localizan entre valores de 1 000 y 200 kPa de resistencia mecánica, que significa que en estas profundidades la resistencia mecánica son muy similares.

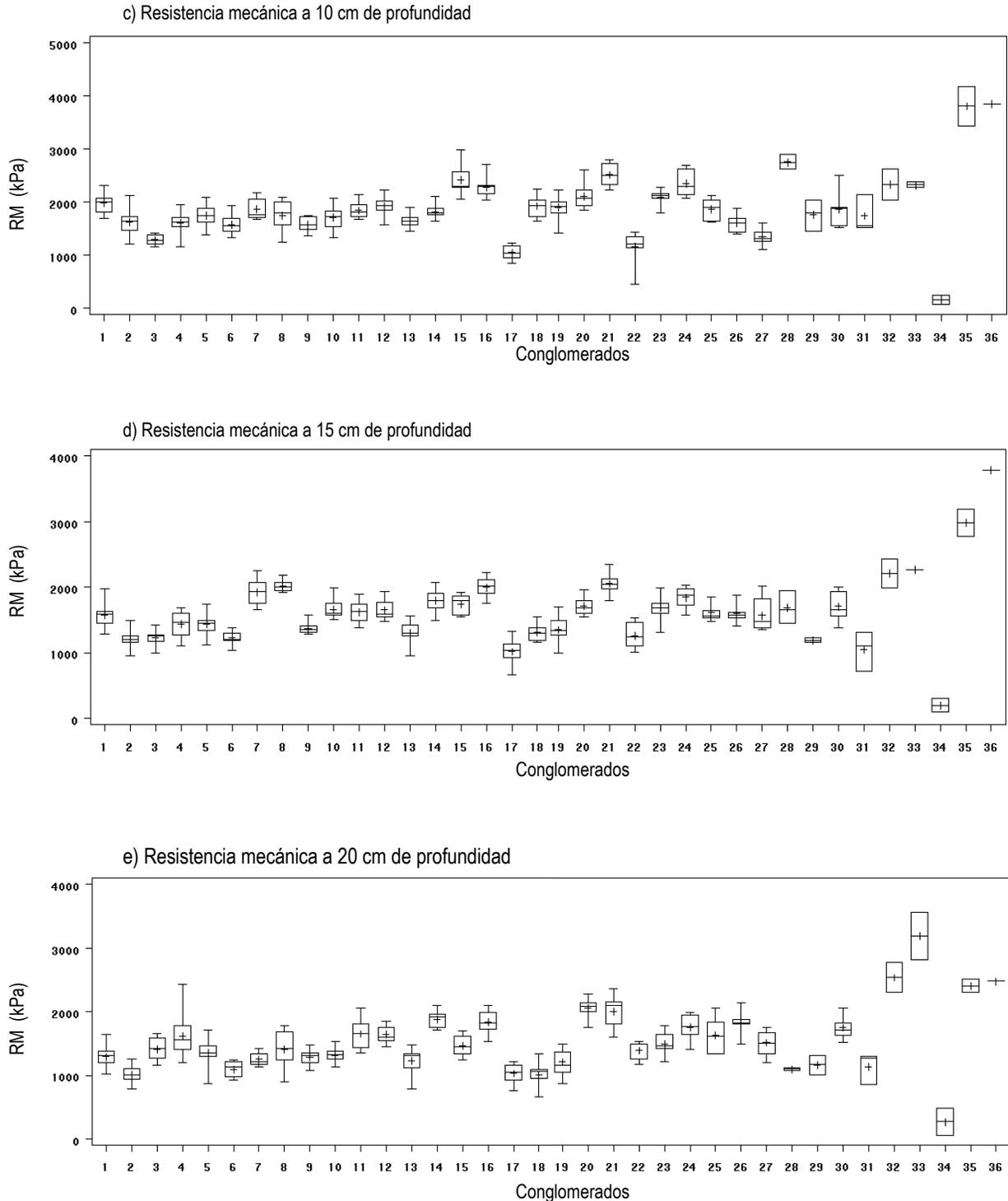


Figura 5.27. Gráficas de cuartiles conglomerados de la resistencia mecánica (RM) del suelo (continuación).

Los conglomerados de la Figura 5.27f y g, se observa que a partir del conglomerado 20 al 36 estos comienzan a dispersarse con valores de resistencia mecánica altos de hasta 4 000 kPa, por lo cual, empieza a mostrar zonas en la parcela experimental con alta resistencia mecánica.

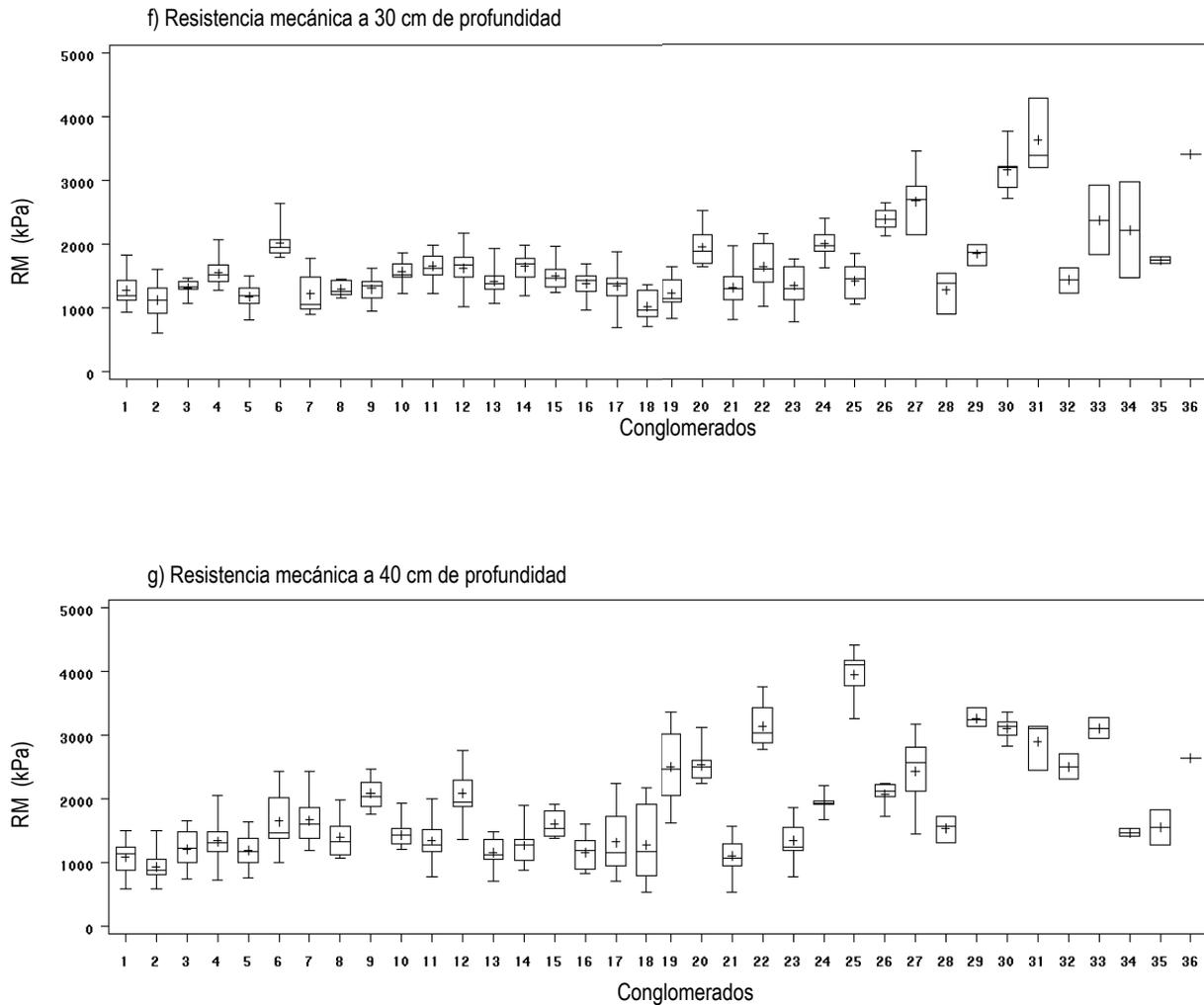


Figura 5.27. Gráficas de cuartiles de conglomerados de la resistencia mecánica (RM) del suelo (continuación).

En el Cuadro 5.16 se muestran las correlaciones de Pearson de la resistencia mecánica del suelo, en la cual, se observa que existe correlación entre las profundidades consecutivas o próximas, a medida que esta se aleja la correlación entre ellas disminuye drásticamente. Por ejemplo, la profundidad de dos y cinco centímetros presenta un R^2 de 0.73, pero entre 2 cm y 40 cm disminuye hasta -0.11 y así sucede en todas las profundidades.

Cuadro 5.16. Matriz de correlaciones de Pearson de la resistencia mecánica (RM) del suelo.

	RM 2 cm	RM 5 cm	RM 10 cm	RM 15 cm	RM 20 cm	RM 30 cm	RM 40 cm
RM 2 cm	1						
RM 5 cm	0.726	1					
RM 10 cm	0.404	0.625	1				
RM 15 cm	0.246	0.348	0.692	1			
RM 20 cm	0.087	0.164	0.437	0.652	1		
RM 30 cm	0.001	-0.068	0.011	0.139	0.289	1	
RM 40 cm	-0.113	-0.073	-0.006	0.071	0.219	0.449	1

Donde: RM= resistencia mecánica (kPa) del suelo a diferentes profundidades.

En la Figura 5.28, se muestra el mapa de variabilidad espacial de la distribución de los 36 conglomerados (cluster) de la resistencia mecánica del suelo en la parcela experimental, podemos mencionar que los últimos cluster formados de 30 a 36 representan los valores más altos de la resistencia mecánica del suelo, que se ubican en la parte sureste de la parcela.

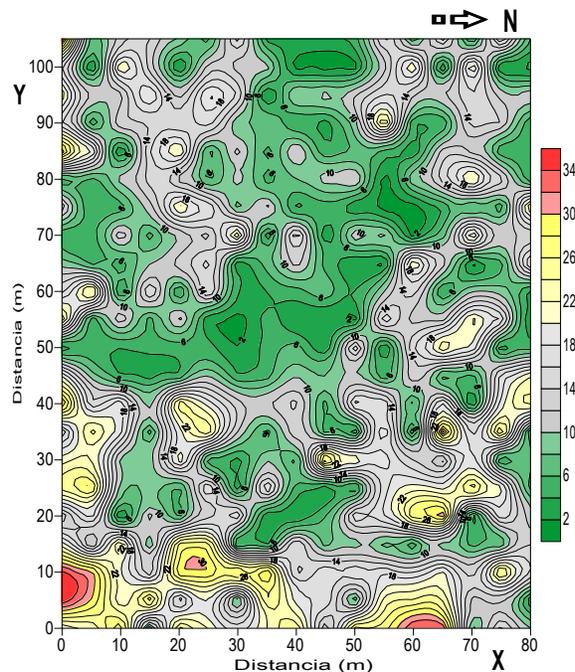


Figura 5.28. Distribución de conglomerados de la resistencia mecánica (RM) en la parcela experimental.

5.3.2 Conglomerados de la conductividad eléctrica del suelo

Los siete conglomerados de la conductividad eléctrica del suelo formados por medio del método de Ward presentan una estructura fuerte de aglomeración de 0.81. Estos conglomerados se formaron a través de tres profundidades de 0-5, 5-10 y 10-15 cm. En el Cuadro 5.17, se muestran las ecuaciones de regresión del comportamiento de los conglomerados de la conductividad eléctrica con la profundidad, se observa que el conglomerado cinco con 39 valores se ajustó a una ecuación cuadrática con $R^2= 0.81$ y el conglomerado siete con tres valores se ajustó a una ecuación lineal con $R^2= 0.71$, los otros conglomerados no se ajustaron adecuadamente.

Cuadro 5.17. Ecuaciones de regresión de conglomerados de la conductividad eléctrica (CE) con la profundidad del suelo.

Conglomerados	Datos	Ecuación	Tipo	R^2
1	453	$Y= 0.0023x^2 - 0.059x + 0.77$	Cuadrática	0.38
2	384	$Y= 0.0027x^2 - 0.069x + 0.98$	Cuadrática	0.34
3	186	$Y= 0.0073x^2 - 0.189x + 1.88$	Cuadrática	0.45
4	45	$Y= 0.0066x^2 - 0.161x + 2.02$	Cuadrática	0.17
5	39	$Y= 0.0323x^2 - 0.830x + 6.02$	Cuadrática	0.81
6	12	$Y= 0.0116x^2 - 0.314x + 3.74$	Cuadrática	0.50
7	3	$Y= 0.3519x - 1.76$	Lineal	0.71

Donde: Y= conductividad eléctrica ($dS\ m^{-1}$); x= profundidad del suelo (cm).

En la Figura 5.29a, b y c, se muestran las gráficas de caja de los siete conglomerados formados con cada una de las profundidades exploradas. En Figura 5.29a las graficas de caja de los conglomerados 1, 2 y 6 se observan que los datos son normalizados, por el contrario el 5, 6 y 7 no son normalizados y en particular el conglomerado cinco tiene un valor extremo de $3.8\ dS\ m^{-1}$. La Figura 5.29b, se observa que por la forma de las gráficas de caja los conglomerados 2 y 3 sus valores son normalizados y los demás conglomerados los datos no presentan una distribución normal. En cambio la figura 5.29c los conglomerados 1, 2, 3 y 6 sus valores son normalizados con un coeficiente de asimetría menor de 0.5, siendo no así los conglomerados 4, 5 y 7.

En las tres Figuras (5.29a, b y c) el conglomerado siete fue formado con un solo valor de cada profundidad, debido que en ese punto muestreado en la profundidad de 10-15 cm se obtuvo un valor extremo de $4.16\ dS\ m^{-1}$, considerado como un dato aberrante de la conductividad eléctrica del suelo.

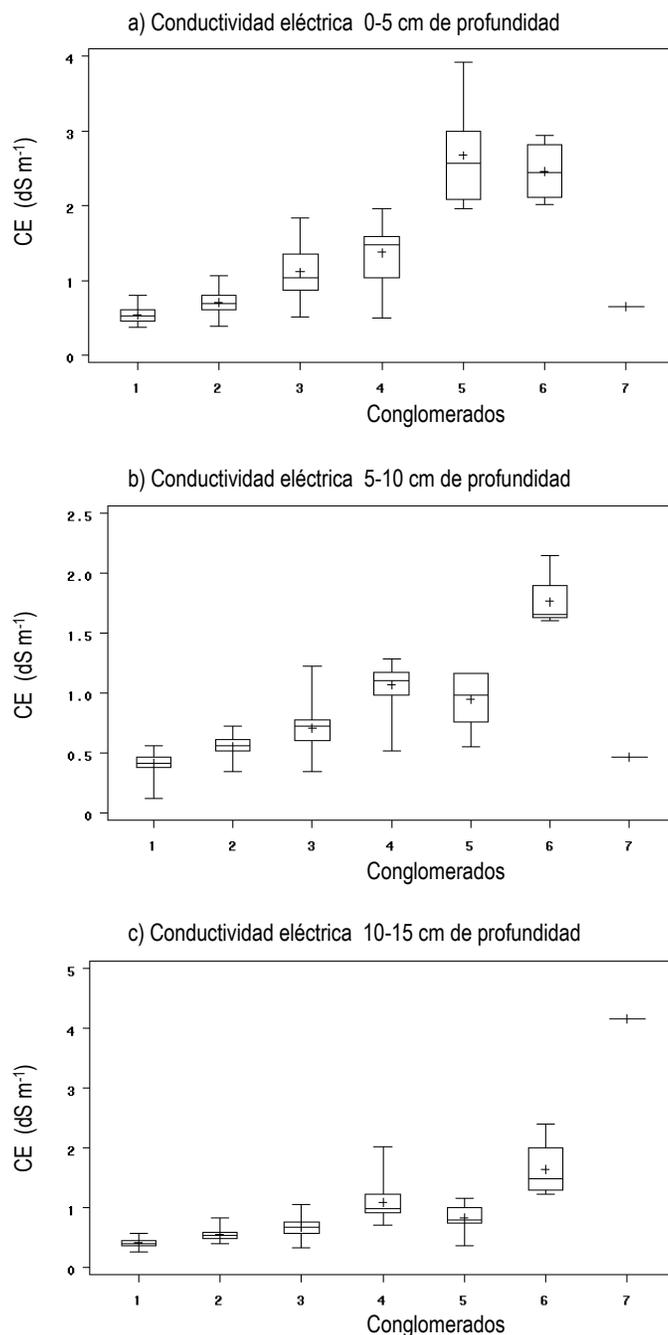


Figura 5.29. Gráficas de cuartiles de conglomerados de la conductividad eléctrica (CE) del suelo.

La correlación de la conductividad eléctrica del suelo entre las profundidades exploradas se muestra en el Cuadro 5.18, en la cual se observa que, la correlación es mayor con la profundidad más próxima entre ellas, pero con un coeficiente menor de 0.7; es decir, no existe una buena correlación de aumento o disminución de la conductividad eléctrica con la profundidad.

Cuadro 5.18. Matriz de correlaciones de Pearson de la conductividad eléctrica (CE) del suelo.

	CE 0-5 cm	CE 5-10 cm	CE 10-15 cm
CE 0-5 cm	1		
CE 5-10 cm	0.696	1	
CE 10-15 cm	0.446	0.577	1

Donde: CE = conductividad eléctrica del suelo a diferentes profundidades.

La Figura 5.30, muestra el mapa de la variabilidad espacial de la ubicación de los conglomerados en la parcela experimental, en esta figura se observa que mediante un análisis de conglomerados se pueden visualizar también los puntos con mayor contenido de la conductividad eléctrica del suelo, en este caso el conglomerado siete contiene un valor aberrante en la profundidad de 10-15 cm de profundidad, que corresponde a la observación 61 en la parcela experimental.

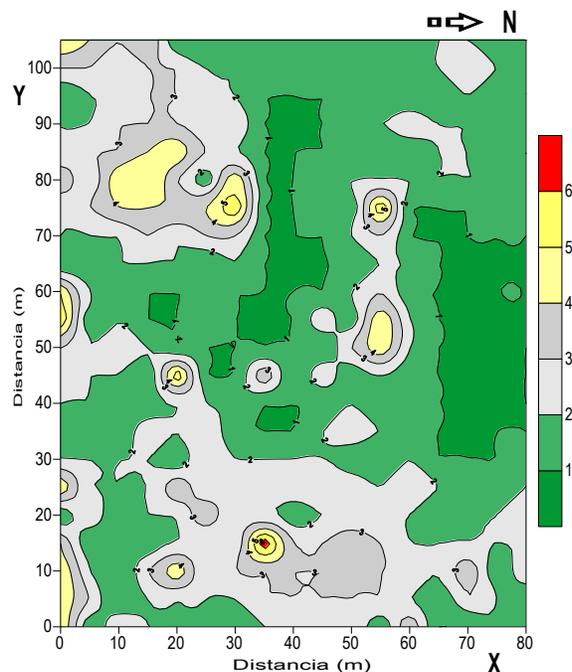


Figura 5.30. Distribución de conglomerados de la conductividad eléctrica (CE) en la parcela experimental.

5.3.3 Conglomerados de la materia orgánica del suelo

Los conglomerados formados a través del método de Ward referente al contenido de materia orgánica del suelo presentan una estructura fuerte de aglomeración de 0.80. Estos conglomerados se formaron a

través de tres profundidades de 0-5, 5-10 y 10-15 cm. En el Cuadro 5.19, se muestran las ecuaciones de regresión del comportamiento de los conglomerados de la materia orgánica con la profundidad, los 13 conglomerados formados se ajustaron a la ecuación lineal, solamente el conglomerado cinco y nueve presentaron coeficientes bajos de 0.01 y 0.63 respectivamente, pero 11 conglomerados (mayoría) presentan coeficientes de regresión de 0.77 hasta 0.94. Esto explica claramente que el contenido de materia es mayor de 0-5 cm y disminuye a la profundidad de 10-15 cm.

Cuadro 5.19. Ecuaciones de regresión de conglomerados de la materia orgánica (MO) con la profundidad del suelo.

Conglomerados	Datos	Ecuación	Tipo	R ²
1	120	$Y = -0.049x + 1.956$	Lineal	0.77
2	141	$Y = -0.065x + 2.263$	Lineal	0.85
3	168	$Y = -0.052x + 2.187$	Lineal	0.80
4	66	$Y = -0.074x + 2.644$	Lineal	0.81
5	99	$Y = -0.004x + 1.843$	Lineal	0.01
6	60	$Y = -0.071x + 2.517$	Lineal	0.86
7	45	$Y = -0.039x + 2.258$	Lineal	0.84
8	120	$Y = -0.045x + 1.973$	Lineal	0.90
9	102	$Y = -0.025x + 1.797$	Lineal	0.63
10	54	$Y = -0.099x + 2.811$	Lineal	0.94
11	78	$Y = -0.088x + 2.524$	Lineal	0.82
12	45	$Y = -0.089x + 2.921$	Lineal	0.78
13	24	$Y = -0.139x + 3.258$	Lineal	0.88

Donde: Y= materia orgánica (%); x= profundidad del suelo (cm).

Las graficas de caja del contenido de materia orgánica se ilustran en la Figura 5.31. Estas tres graficas representan los 13 conglomerados por cada profundidad explorada; en la Figura 5.31a, los conglomerados 5, 7 y 9 carecen de valor extremo superior y no son normalizados, por ejemplo los conglomerados 6, 8 y 10 de acuerdo a su forma estos son normalizados con coeficientes de asimetría menores de 0.5 (Webster y Oliver, 2001). En la Figura 5.31b los conglomerados 1, 2, 4, 6, 8 y 10 de acuerdo a su grafica de caja no poseen valor extremo inferior, pero el 1, 2, 6 y 10 sus coeficientes de asimetría son menores a 0.5; los conglomerados 5 y 9 sus cuartiles de 25 y 75% son iguales, pero con coeficientes de asimetría muy cercanos o iguales a cero. Con respecto al Figura 5.31c, resalta el conglomerado 8 formado por 40 datos con el mismo valor, por lo cual su grafica de caja está representada únicamente por su media y mediana.

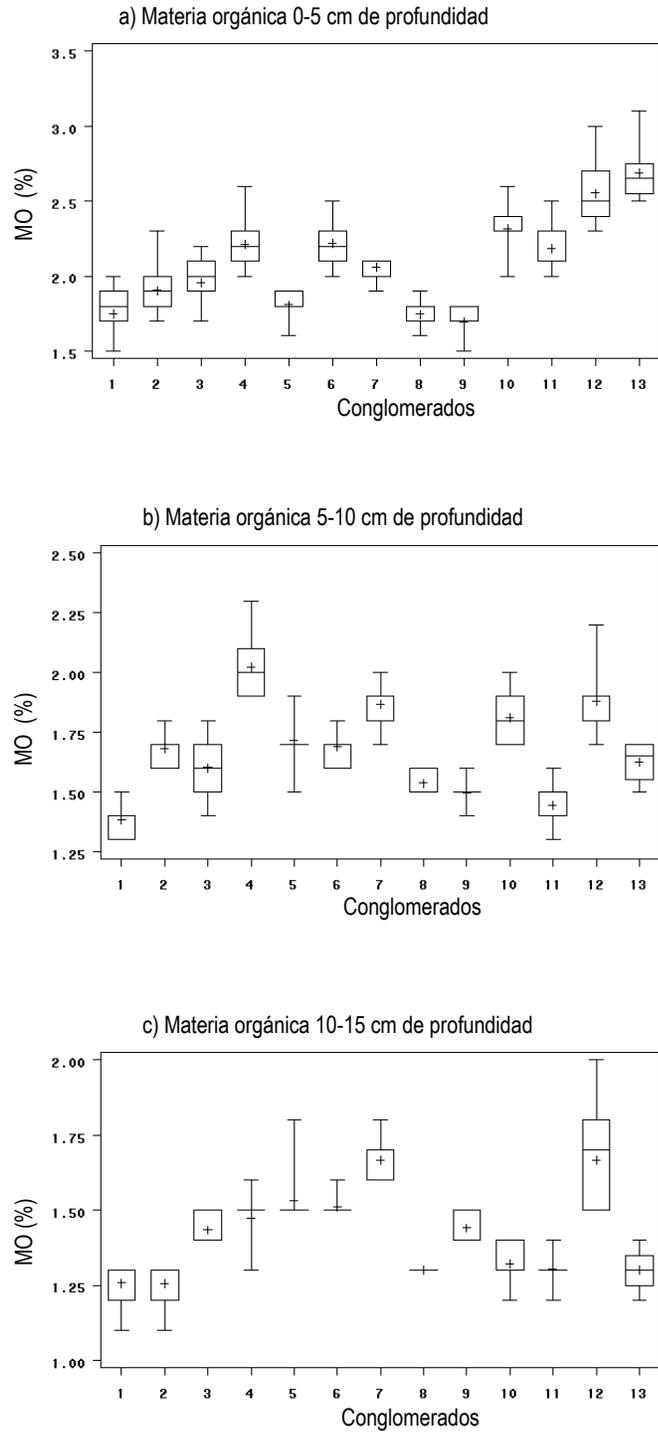


Figura 5.31. Gráficas de cuartiles de conglomerados de la materia orgánica (MO) del suelo.

En el Cuadro 5.20 se muestran los coeficientes de correlación entre las profundidades exploradas del contenido de materia orgánica y se observa que existe una correlación baja y disminuye cada vez más a mayor profundidad o conforme se aleje más la última de la primera.

Cuadro 5.20. Matriz de correlaciones de Pearson de la materia orgánica (MO) del suelo.

	MO 0-5 cm	MO 5-10 cm	MO 10-15 cm
MO 0-5 cm	1		
MO 5-10 cm	0.441	1	
MO 10-15 cm	0.251	0.444	1

Donde: MO= materia orgánica del suelo a diferentes profundidades.

Finalmente en la Figura 5.32, se muestra el mapa de la variabilidad espacial de los conglomerados formados a partir del contenido de materia orgánica del suelo, en donde se observa que los últimos conglomerados formados poseen los valores más altos de materia orgánica, por ejemplo, el conglomerado 13 tiene un valor de 3.1% de MO en la profundidad de 0-5 cm y los separa de los demás y agrupa los que son similares.

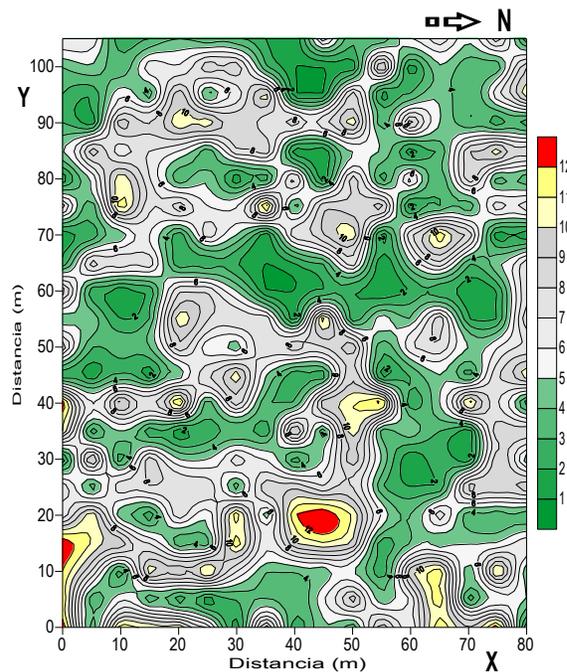


Figura 5.32. Distribución de conglomerados de la materia orgánica (MO) en la parcela experimental.

5.4 Propiedades del suelo explicativas del rendimiento de los cultivos, en la parcela experimental

Las propiedades físicas y químicas del suelo analizadas en este estudio que definieron el rendimiento de los cultivos se muestran en el Cuadro 5.21. El total de las propiedades del suelo estudiadas, estas explicaron 79.3%, 92.9% y 74.7% del rendimiento del cultivo del haba, maíz y frijol respectivamente.

Las variables del suelo de mayor a menor importancia tales como: θ_g 25-30 cm, MO 0-5 cm, ρ_a 0-5 cm, CE 0-5 cm y el contenido de arcilla (Ac), aportaron una explicación individual de 15 a 11.9% para el rendimiento del haba, por el contrario la RM 5, 10, 15, 20 y 30 cm de profundidad, así también la MO de 5-10 y 10-15 cm de profundidad explicaron individualmente menos de 1% dicho rendimiento Cuadro 5.21.

En la Figura 5.33a se muestra gráficamente la línea acumulativa del porcentaje de explicación del rendimiento del haba y en los cambios de pendiente en la gráfica que se observan en los tramos de RM 2 cm a RM 40 cm, RM 5 cm a MO 5-10 cm y RM 30 cm a RM 15 cm, significa que algunas variables de manera acumulativa explican mejor el rendimiento que individualmente.

El rendimiento del maíz estuvo influenciado principalmente por cinco variables que son: en orden de mayor a menor la RM 2 cm, RM 5 cm, MO 10-15 cm, MO 0-5 cm y RM 15 cm de profundidad, estas explican individualmente de 34.7 a 12% (Cuadro 5.21). Gráficamente estos valores se muestran en la Figura 5.33b, en la cual se observa que la línea acumulativa presenta una mayor pendiente al pasar de RM 15 cm a MO 10-15 cm, también sucede lo mismo de Ac 0-5 cm a θ_g 0-5 cm y con RM 20 cm a CE 10-15 cm, esto indica que en forma acumulativa algunas variables aportan mayor porcentaje que individualmente no explicarían.

El porcentaje que aportan las variables del suelo sobre el rendimiento del frijol se muestra en el Cuadro 5.21, estas variables de mayor a menor importancia son: RM 15 cm, RM 10 cm, ρ_a 25-30 cm, MO 10-15 cm y RM 20 cm, en un rango 19.4% a 11.9%, las variables restantes explican individualmente menos del 10%, incluso la θ_g 25-30 cm no aporta al rendimiento de éste cultivo.

En la Figura 5.33c se ilustra gráficamente las barras y la línea del porcentaje individual y acumulativo respectivamente de las variables, en la línea acumulativa existen pendientes marcadas; por ejemplo, de RM 10 cm pasando a través de ρ_a 25-30 cm, MO 10-15 cm hasta RM 20 cm; RM 40 cm a MO 0-5 cm; θ_g 0-5 cm a Li 0-5 cm, estas son las variables que explican un porcentaje mayor el rendimiento del frijol, pero de RM 30 cm a CE 0-5 cm, presentan una pendiente mayor de aporte sobre el rendimiento del frijol, pero individualmente aportan menos de 3.2%.

Cuadro 5.21. Propiedades del suelo explicativo (%) sobre el rendimiento de los cultivos, en la parcela experimental.

Propiedad del suelo (cm)	Haba		Propiedad del suelo (cm)	Maíz		Propiedad del suelo (cm)	Frijol	
	Individual	Acumulativo		Individual	Acumulativo		Individual	Acumulativo
θ_g 25-30	15.0	15	RM 2	34.7	34.7	RM 15	19.4	19.4
MO 0-5	13.6	19.8	RM 5	19.9	37.9	RM 10	17.2	20.3
ρ_a 0-5	13.0	22.4	MO 10-15	13.5	57.7	ρ_a 25-30	16.4	29.6
CE 0-5	12.9	34.9	MO 0-5	13.1	59.7	MO 10-15	13.3	36.6
Ac 0-5	11.9	35.0	RM 15	12.0	60.0	RM 20	11.9	44.7
Ar 0-5	9.9	35.3	Ac 0-5	6.3	61.3	RM 40	9.2	45.1
CE 5-10	9.8	41.9	RM 30	4.5	67.9	MO 0-5	7.3	50.6
θ_g 0-5	7.2	44.9	θ_g 0-5	4.3	70.9	θ_g 0-5	7.2	51.5
Li 0-5	5.7	49.6	RM 10	3.7	70.9	Li 0-5	7.1	61.9
CE 10-15	5.6	50.2	Li 0-5	3.4	72.2	MO 5-10	6.9	63.6
RM 2	5.0	50.9	ρ_a 25-30	3.1	72.3	CE 10-15	6.4	64.5
RM 40	4.6	58.5	Ar 0-5	2.8	76.8	Ar 0-5	6.3	64.8
θ_v 15	1.8	58.6	θ_g 25-30	2.6	77.0	ρ_a 0-5	3.8	67.0
θ_a 25-30	1.8	59.1	RM 40	2.2	77.0	RM 5	3.3	68.1
RM 5	1.1	59.1	RM 20	1.6	77.4	RM 30	3.2	68.1
MO 5-10	0.9	66.7	CE 0-5	1.5	84.4	CE 0-5	2.1	72.8
MO 10-15	0.9	67.6	CE 10-15	1.0	89.4	CE 5-10	1.6	73.7
RM 10	0.2	67.6	θ_v 15	0.9	89.5	Ac 0-5	1.2	74.2
RM 20	0.1	68.6	MO 5-10	0.5	92.3	RM 2	0.6	74.2
RM 30	0.0	70.3	CE 5-10	0.0	92.3	θ_v 15	0.4	74.6
RM 15	0.0	79.3	ρ_a 0-5	0.0	92.9	θ_g 25-30	0.0	74.7

Donde: θ_g = humedad gravimétrica (%); MO= materia orgánica (%); ρ_a = densidad aparente ($g\ cm^{-3}$); CE= conductividad eléctrica ($dS\ m^{-1}$); Ac= arcilla (%); Ar= arena (%); Li= limo (%); RM= resistencia mecánica (kPa) y θ_v = humedad volumétrica (%), muestreadas a diferentes profundidades del suelo (cm).

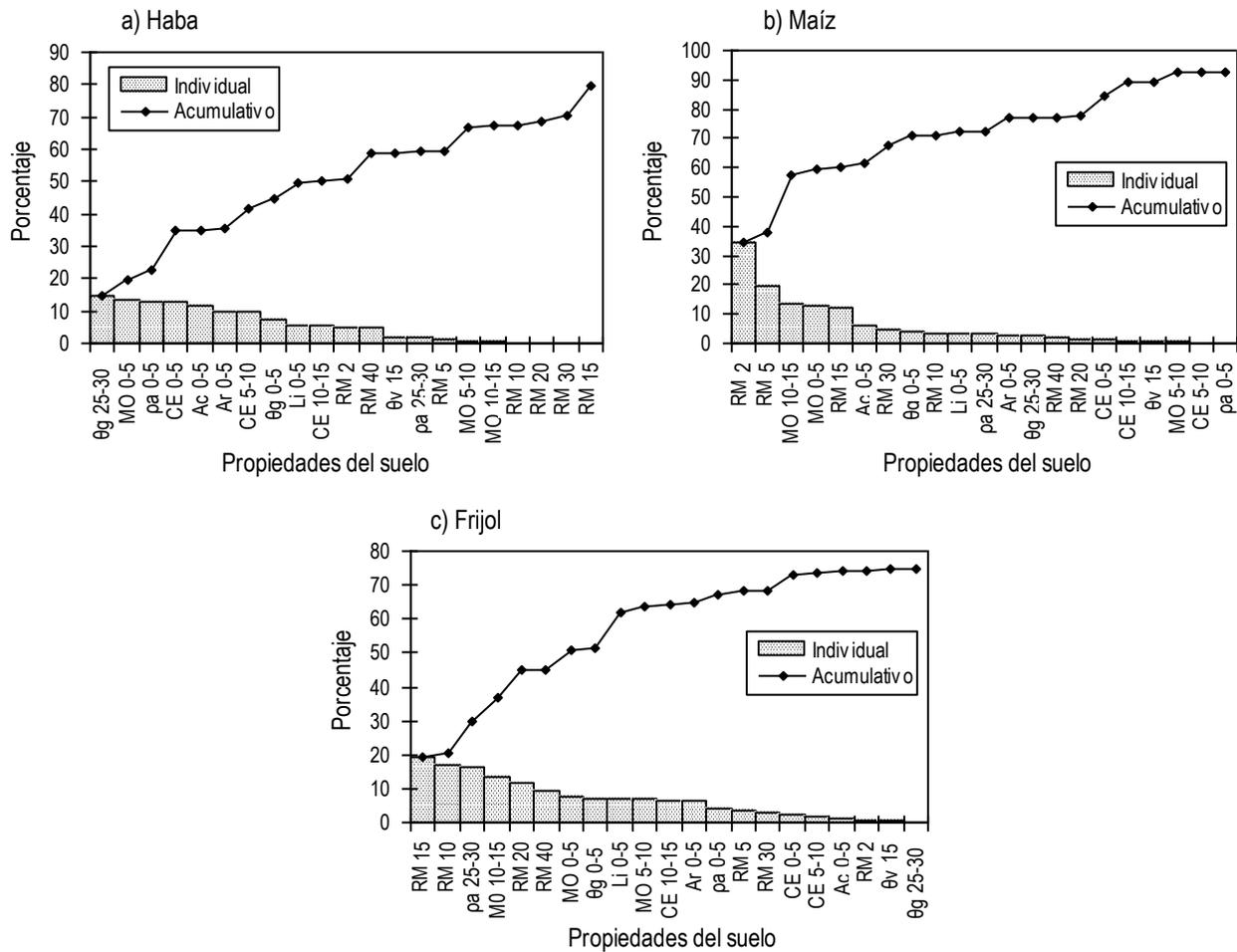


Figura 5.33. Porcentaje explicativo individual y acumulativo de las propiedades del suelo sobre el rendimiento de los cultivos, en la parcela experimental.

5.5 Estadística descriptiva de las propiedades físicas y químicas del suelo, en las parcelas de escurrimiento

Con base al contenido de materia orgánica del suelo de 0-5 cm de profundidad de la parcela experimental, se establecieron diez lotes de escurrimiento con lluvia simulada; siete metros de largo por dos metros de ancho, para realizar monitoreo constantes de las propiedades del suelo. En el Cuadro 5.22, se muestra que algunas propiedades del suelo presentaron coeficientes de variación (CV) altos mayores de 25% tales como: la RM, infiltración acumulada (I_a), CE y conductividad hidráulica saturada (K_s). Otras variables físicas como la humedad aprovechable (θ_a), humedad saturada (θ_s), humedad residual (θ_r),

sorbilidad (S_o) y el contenido de arena (Ar), limo (Li) y arcilla (Ac), sus valores de coeficiente de variación fueron menores del 20%; pero la densidad aparente (ρ_a) y la porosidad total (f) estos fueron cercanos a cero; para el rendimiento de grano del haba (\hat{Y}_h), maíz (\hat{Y}_m) y frijol (\hat{Y}_f) fueron bajos a moderados, con un rango de 4.38 a 24.96%. Otras estadísticas básicas de las propiedades del suelo y el rendimiento de los cultivos tales como: el mínimo, máximo, media, mediana y la desviación estándar se muestran en el Cuadro 5.22.

Cuadro 5.22. Estadísticas descriptivas de las propiedades del suelo medidas en las parcelas de escurrimiento.

Propiedades	N	Mínimo	Máximo	Media	Mediana	D. Estándar	CV (%)
RM (kPa)	10	680	3567	2105.18	2365.15	1024.53	48.67
ρ_a (g cm ⁻³)	10	1.16	1.18	1.17	1.17	0.006	0.51
MO (%)	10	1.70	2.20	1.94	1.95	0.135	6.96
CE (dS m ⁻¹)	10	0.44	1.33	0.778	0.714	0.279	35.89
f (%)	10	0.546	0.553	0.550	0.551	0.002	0.36
Ar (%)	10	13	17	14.9	15	1.287	8.64
Li (%)	10	50	55	52.1	52	1.969	3.78
Ar (%)	10	30	37	33	32	2.211	6.70
θ_a (cm ³ cm ⁻³)	10	0.164	0.382	0.303	0.305	0.058	19.19
θ_s (cm ³ cm ⁻³)	10	0.379	0.598	0.519	0.521	0.058	11.20
θ_r (cm ³ cm ⁻³)	10	0.034	0.049	0.044	0.046	0.005	10.82
K_s (cm h ⁻¹)	10	0.157	0.527	0.394	0.432	0.113	28.59
I_a (cm)	10	7.9	59.3	38.8	40.05	15.442	39.80
S_o (cm s ^{-1/2})	10	0.703	0.992	0.829	0.829	0.079	9.58
\hat{Y}_h (t ha ⁻¹)	10	1.83	2.76	2.17	2.09	0.307	14.13
\hat{Y}_m (t ha ⁻¹)	10	5.38	6.19	5.75	5.73	0.251	4.38
\hat{Y}_f (t ha ⁻¹)	10	1.25	2.62	1.95	2.03	0.487	24.96

Donde: RM= resistencia mecánica; ρ_a = densidad aparente; MO= materia orgánica; CE= conductividad eléctrica; f = porosidad total; Ar= arena; Li= limo; Ac= arcilla; θ_a = humedad aprovechable; θ_s = humedad saturada; θ_r = humedad residual; K_s = conductividad hidráulica saturada; I_a = infiltración acumulada; S_o = sorbilidad y \hat{Y}_h , \hat{Y}_m y \hat{Y}_f = rendimiento de haba, maíz y frijol respectivamente.

5.5.1 Interdependencia entre propiedades del suelo en las parcelas de escurrimiento

El análisis de correlación de los 17 atributos de suelo que representan propiedades físicas y químicas para la capa arable mostró que una correlación significativa ($p < 0.005$) existió en 21 de los 136 pares de atributos del suelo (Cuadro 5.23). La RM se correlaciono negativamente con CE ($R^2 = -0.85$), pero con las demás variables disminuyó; muy similar ocurre con la CE que tuvo además un $R^2 = 0.75$ con el contenido de arena y disminuyó drásticamente con las otras variables. Por el contrario la MO se correlacionó

significativamente con ρ_a , f , K_s , S_o , \hat{Y}_h y \hat{Y}_m ($R^2 > 0.70$) y con el rendimiento del frijol existió una $R^2 = 0.59$ relativamente baja. Una alta correlación positiva fue obtenida entre I_a con K_s y \hat{Y}_f ($R^2 > 0.77$), pero negativamente con la densidad aparente ($R^2 = -0.55$). La K_s tiene una alta correlación positiva con \hat{Y}_h , \hat{Y}_m , \hat{Y}_f , I_a y MO ($R^2 > 0.72$) y negativamente con el contenido de arcilla (Ac) ($R^2 = -0.70$). La S_o se correlacionó positivo con MO y f ($R^2 > 0.72$), y negativa con la densidad aparente ($R^2 = -0.72$).

La f fue correlacionada positivamente S_o y MO ($R^2 = 0.72$), pero con la densidad aparente (ρ_a) muestra una $R^2 = -1$, debido que ésta se estimó a partir de los valores de ρ_a ; de la misma manera existió una alta correlación positiva entre θ_a y θ_s ($R^2 = 1$), pero estas dos variables presentaron una correlación baja ($R^2 < 0.52$) con las otras variables estudiadas. La θ_r se correlacionó positivamente con el contenido de limo (Li) ($R^2 = 0.75$) y negativamente con el contenido de arcilla ($R^2 = -0.99$). En este análisis de correlación las variables θ_a y θ_s fueron las únicas que no se correlacionaron significativamente con el total de variables estudiadas, por lo cual, se redujo el número de variables de 17 a 15 (Cuadro 5.23).

Cuadro 5.23. Coeficientes de correlación Pearson entre propiedades físicas y químicas del suelo y el rendimiento de los cultivos, en las parcelas de escurrimiento.

	RM	ρ_a	MO	CE	f	Ar	Li	Ac	θ_a	θ_s	θ_r	K_s	I_a	S_o	\hat{Y}_h	\hat{Y}_m	\hat{Y}_f	
RM	1																	
ρ_a	0.58	1																
MO	-0.45	-0.72	1															
CE	-0.85	-0.48	0.29	1														
f	-0.58	-1.00	0.72	0.48	1													
Ar	-0.67	-0.07	-0.04	0.73	0.07	1												
Li	-0.25	0.05	0.32	0.25	-0.05	-0.13	1											
Ac	0.62	0.00	-0.26	-0.65	0.00	-0.47	-0.82	1										
θ_a	-0.11	0.08	-0.07	0.24	-0.08	0.24	0.31	-0.41	1									
θ_s	-0.11	0.08	-0.07	0.24	-0.08	0.24	0.31	-0.41	1.00	1								
θ_r	-0.63	0.03	0.21	0.69	-0.03	0.55	0.75	-0.99	0.42	0.42	1							
K_s	-0.63	-0.52	0.74	0.50	0.52	0.17	0.68	-0.70	0.11	0.11	0.66	1						
I_a	-0.15	-0.55	0.69	0.13	0.55	-0.15	0.35	-0.22	0.12	0.12	0.19	0.77	1					
S_o	-0.33	-0.72	0.87	0.32	0.72	0.08	-0.02	-0.02	-0.05	-0.05	0.02	0.53	0.66	1				
\hat{Y}_h	-0.49	-0.33	0.77	0.43	0.33	0.28	0.51	-0.61	0.20	0.20	0.57	0.72	0.52	0.65	1			
\hat{Y}_m	-0.44	-0.50	0.70	0.38	0.50	0.30	0.31	-0.45	0.03	0.03	0.43	0.72	0.69	0.53	0.69	1		
\hat{Y}_f	-0.18	-0.29	0.60	0.15	0.29	-0.17	0.69	-0.52	0.52	0.52	0.46	0.77	0.81	0.45	0.62	0.48	1	

Donde: RM= resistencia mecánica (kPa); ρ_a = densidad aparente ($g\ cm^{-3}$); MO= materia orgánica (%); CE= conductividad eléctrica ($dS\ m^{-1}$); f = porosidad total (%); Ar= arena (%); Li= limo (%); Ac= arcilla (%); θ_a = humedad aprovechable ($cm^3\ cm^{-3}$); θ_s = humedad saturada ($cm^3\ cm^{-3}$); θ_r = humedad residual ($cm^3\ cm^{-3}$); K_s = conductividad hidráulica saturada ($cm\ h^{-1}$); I_a = infiltración acumulada (cm); S_o = sorbilidad ($cm\ s^{-1/2}$) y \hat{Y}_h , \hat{Y}_m , \hat{Y}_f = rendimiento de haba, maíz y frijol ($t\ ha^{-1}$) respectivamente.

Al efectuarse relaciones lineales simples del rendimiento de grano de haba, maíz y frijol con las propiedades del suelo analizadas, se obtuvo que la MO, K_s , I_a y S_o fueron las que tuvieron una mejor correlación lineal con el rendimiento de los cultivos estudiados.

En la Figura 5.34 se ilustran las correlaciones simples más altas. Por ejemplo la MO y K_s se correlacionó con el rendimiento de haba, maíz y frijol con un $R^2 < 0.60$ (Figura 5.34a-f); S_o se correlacionó con el rendimiento de haba con un $R^2 = 0.42$ (Figura 5.34g) y la infiltración acumulada (I_a) se correlacionó con el rendimiento de maíz y frijol con un $R^2 < 0.66$ (Figura 5.34h e i).

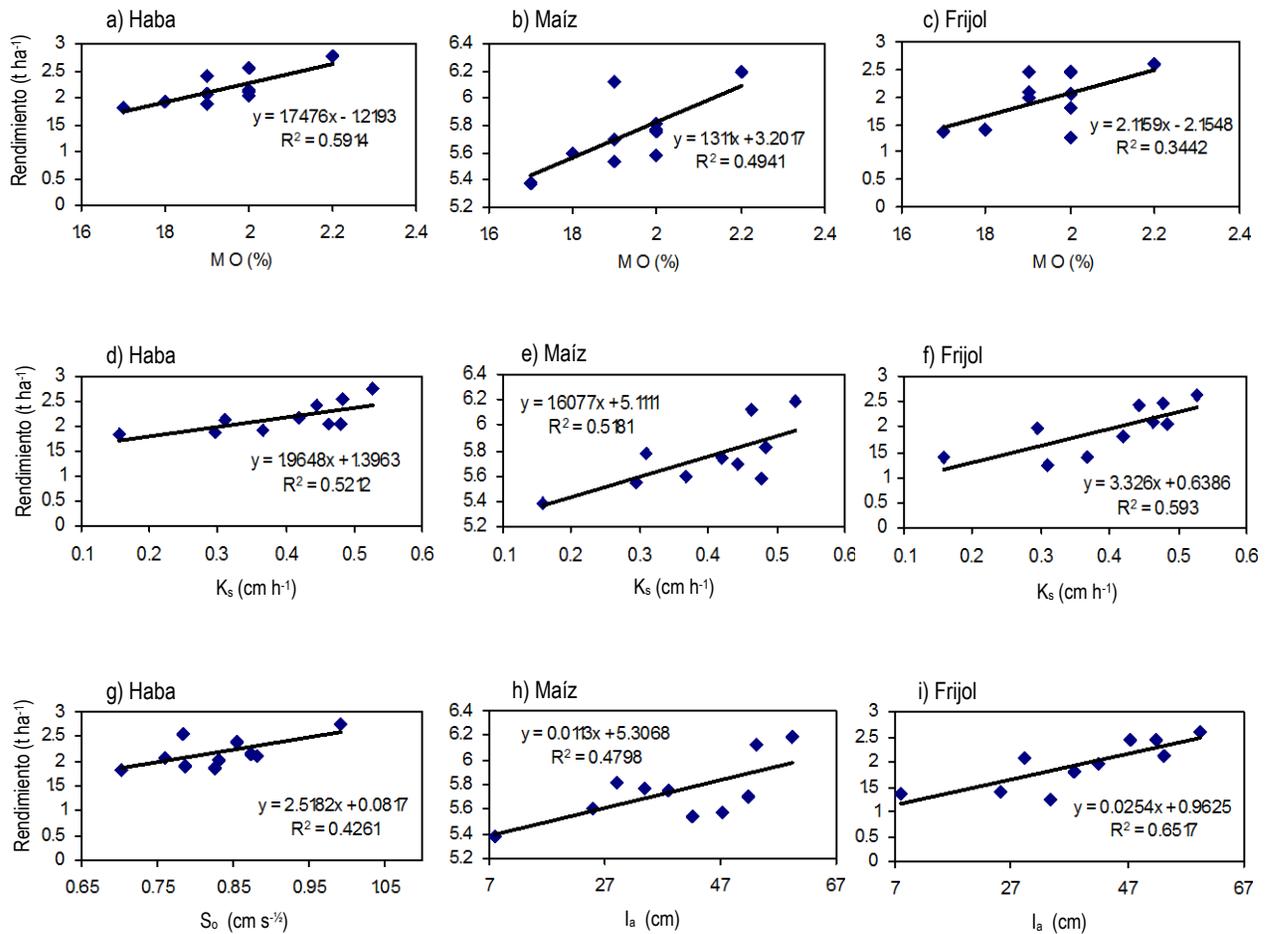


Figura 5.34. Relación lineal entre el rendimiento de grano de haba, maíz y frijol con MO, K_s , I_a y S_o , en las parcelas de escurrimiento.

5.5.2 Propiedades del suelo explicativas sobre el rendimiento de los cultivos, en las parcelas de escurrimiento

Las propiedades físicas y químicas del suelo analizadas en las parcelas de escurrimiento que más explicaron o definieron el rendimiento de los cultivos se muestran en el Cuadro 5.24. De las 14 propiedades del suelo, con solo nueve se definió el 100% el rendimiento de haba y diez variables explicaron el 100% el rendimiento de maíz y frijol.

Las propiedades del suelo que explicaron el rendimiento del haba de mayor a menor importancia son: MO, K_s , S_o , contenido de arcilla (Ac), θ_r , I_a , contenido de limo (Li), RM y CE, estas variables del suelo aportaron una explicación individual de 59.1 a 18.2% para el rendimiento del haba, en cambio, otras como la ρ_a , f , contenido de arena (Ar), θ_a y θ_s explicaron individualmente menos de 12% dicho rendimiento, estos resultados también se muestran en el Cuadro 5.24.

En la Figura 5.35a se muestra gráficamente la línea acumulativa del porcentaje de explicación del rendimiento del haba en las parcelas de escurrimiento, se observa que la línea comienza con 59.1% de MO, con un ligero aumento a K_s , del mismo modo en los tramos de S_o a θ_r y de I_a a CE existieron aumentos que llegaron al 100% en forma acumulativa, pero de K_s a S_o , θ_r a I_a no existe aumento en forma acumulativa.

El rendimiento del maíz en las parcelas de escurrimiento estuvo influenciado por 10 variables que juntas explicaron 100% y son: en orden de mayor a menor tenemos a: K_s , MO, I_a , S_o , ρ_a , f , contenido de arcilla (Ac), RM, θ_r y CE, estas explicaron individualmente de 51.8 a 14.2% (Cuadro 5.24). Gráficamente estos valores se muestran en la Figura 5.35b, en ésta se observa que la línea acumulativa inicia con K_s a S_o , con un ligero aumento en porcentaje de acumulación, pero de f a RM y de θ_r a CE existe un mayor aumento que finaliza con un 100% de explicación, por el contrario, en el tramo de S_o a f y de RM a θ_r la pendiente es cero; es decir, esto indica que en forma acumulativa estas variables no explican un aumento razonable como lo hacen individualmente.

El rendimiento del frijol en las parcelas de escurrimiento estuvo influenciado por las siguientes propiedades del suelo: I_a , K_s , contenido de limo (Li), MO, contenido de arcilla (Ac), θ_a , θ_s , θ_r , S_o y ρ_a , con un rango de mayor a menor importancia de 65.2 a 8.5% y juntas explican 100% el rendimiento de éste cultivo y las variables restantes explican individualmente menos de 8% (Cuadro 5.24).

En la Figura 5.35c se ilustra gráficamente la línea del porcentaje acumulativo de las variables del suelo que explicaron 100% el rendimiento del cultivo del frijol en las parcelas de escurrimiento, en este caso existen pendientes marcadas, por ejemplo, de I_a a contenido de limo se encuentra el mayor porcentaje de explicación (85.5%), también se observan tramos de MO a θ_a , y θ_r , a ρ_a , con menor porcentaje de explicación, pero hay tramos de Li a MO y θ_a a θ_r , donde la pendiente es cero; es decir, en forma acumulativa estas variables no aportan un porcentaje de aumento pero en forma individual poseen un porcentaje de explicación considerable.

Cuadro 5.24. Propiedades del suelo explicativo (%) sobre el rendimiento de los cultivos, en las parcelas de escurrimiento.

Propiedad del suelo	Haba		Propiedad del suelo	Maíz		Propiedad del suelo	Frijol	
	Individual	Acumulativo		Individual	Acumulativo		Individual	Acumulativo
MO	59.1	59.1	K_s	51.8	51.8	I_a	65.2	65.2
K_s	52.1	64.3	MO	49.4	58.2	K_s	59.3	70.7
S_o	42.6	64.6	I_a	47.9	60.5	Li	48.2	85.5
Ac	37.3	82.6	S_o	28.3	62.3	MO	34.4	85.7
θ_r	31.1	88.8	ρ_a	24.6	62.4	Ac	26.9	86.4
I_a	26.7	88.4	f	24.6	62.4	θ_a	26.9	97.5
Li	25.6	92.1	Ac	19.9	68.9	θ_s	26.9	97.5
RM	23.9	99.4	RM	19.6	84.2	θ_r	21.5	97.5
CE	18.2	100	θ_r	18.4	84.8	S_o	20.3	98.1
ρ_a	11.1	100	CE	14.2	100	ρ_a	8.5	100
f	11.1	100	Li	9.4	100	f	8.5	100
Ar	7.6	100	Ar	9	100	RM	3.3	100
θ_a	3.9	100	θ_a	0.1	100	Ar	2.9	100
θ_s	3.9	100	θ_s	0.1	100	CE	2.2	100

Donde: MO= materia orgánica (%); K_s = conductividad hidráulica saturada (cm h^{-1}); S_o = sorbilidad (cm s^{-2}); Ac= arcilla (%); θ_r = humedad residual ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$); I_a = infiltración acumulada (cm); Li= limo (%); RM= resistencia mecánica (kPa); CE= conductividad eléctrica (dS m^{-1}); ρ_a = densidad aparente (g cm^{-3}); f = porosidad total (%); Ar= arena (%); θ_a = humedad aprovechable ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$) y θ_s = humedad saturada ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$).

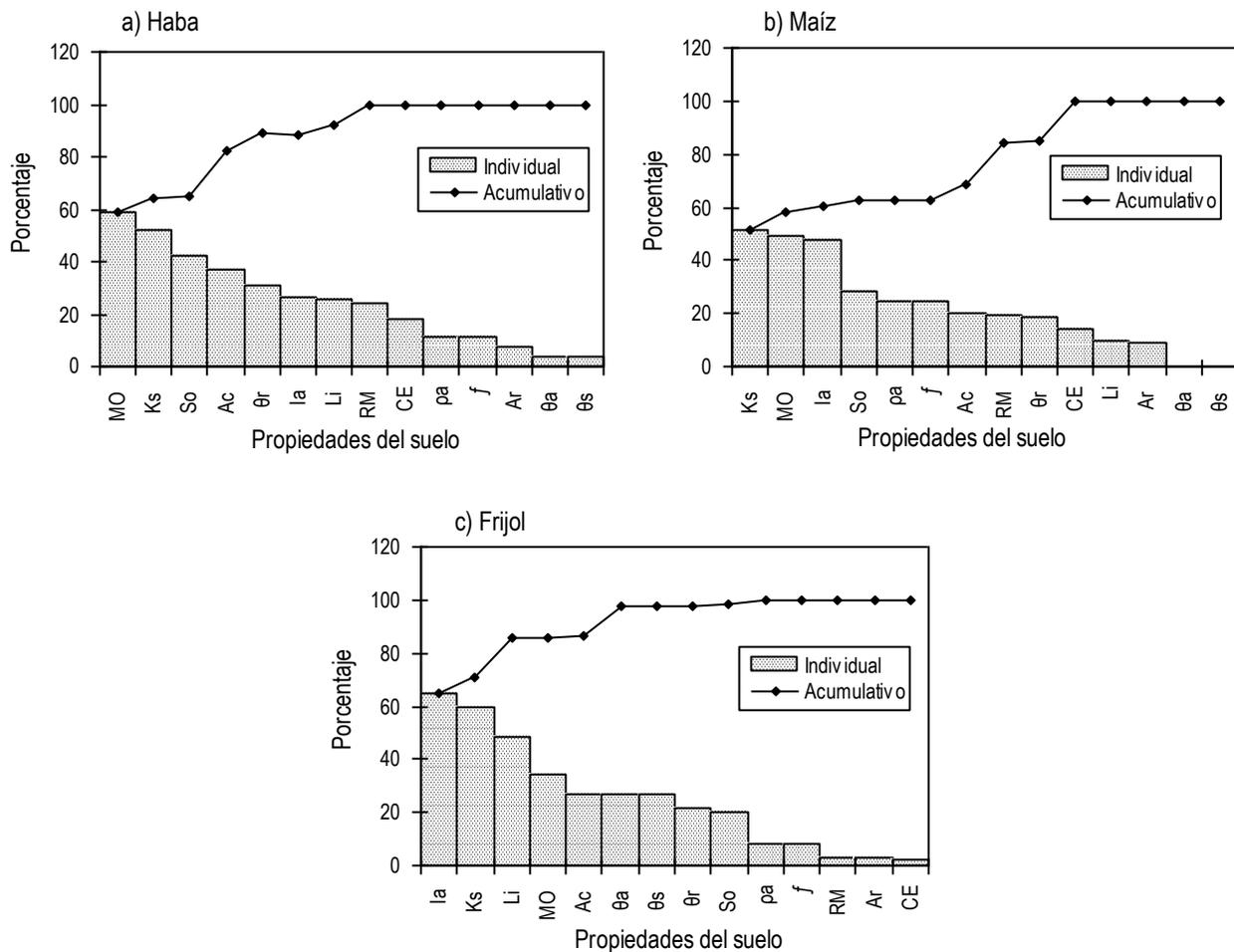


Figura 5.35. Porcentaje explicativo individual y acumulativo de las propiedades del suelo, sobre el rendimiento de los cultivos en las parcelas de escurrimiento.

Con la inclusión de dos o más propiedades de suelo como variables independientes y el rendimiento de grano del haba, maíz y frijol como variable dependiente en las regresiones lineales mejoró la R^2 en un rango desde 0.64 hasta 0.97. Las propiedades del suelo que explicaron 80% el rendimiento de haba en una primera combinación de variables fueron la MO, RM y ρ_a , pero también se logró con la MO, K_s y Ac, en ésta segunda combinación de variables al incluir la RM y Ar se explicó un 85% y finalmente al incrustar la θ_r se alcanzó un 96% de rendimiento de grano de haba (Cuadro 5.25).

El rendimiento de grano del cultivo de maíz estuvo influenciado por las propiedades del suelo, tales como: K_s , MO y Ar, juntas explicaron 64% dicho rendimiento, pero al incluir a la I_a , ésta aumento a 73% y posteriormente al adherir a S_o , se alcanzó 94% de explicación del rendimiento de grano del maíz. De la misma manera, las propiedades del suelo que influenciaron sobre el rendimiento de grano de frijol fueron:

I_a , K_s y MO juntas estas tres variables del suelo explicaron 71% el rendimiento, pero al incluir θ_a a la ecuación esta aumento a 88% y finalmente al adherir Ar se alcanzó 97% dicho rendimiento (Cuadro 5.25).

En nueve de 10 ecuaciones de regresión lineal que se muestran en el Cuadro 5.25, el coeficiente de la MO fue positivo lo cual indica que el rendimiento de grano de los cultivos estudiados aumenta conforme el contenido de MO es mayor en el suelo. Cada una de las variables del suelo tuvieron una influencia diferente para explicar el rendimiento de los cultivos, pero en general la K_s , MO y Ar fueron tres de 14 variables del suelo que estuvieron presente en la relaciones lineales con el rendimiento de grano de los tres cultivos (haba, maíz y frijol). Otras variables que influenciaron en menor importancia en las ecuaciones de regresión lineal fueron: Ac, RM, y θ_r para explicar el rendimiento del haba, así también I_a y S_o influenció en el rendimiento del maíz, del mismo modo I_a y θ_a en el rendimiento de frijol (Cuadro 5.25).

Cuadro 5.25. Regresión lineal para el rendimiento (t ha⁻¹) de haba, maíz y frijol como variable dependiente y las propiedades del suelo como variables independientes.

Númer	Ecuación	R ²
1	$\hat{Y}_h = 2.46MO - 0.0002RM + 37.56\rho_a - 46.28$	0.80
2	$\hat{Y}_h = 2.03MO - 1.09K_s - 0.09Ac + 1.67$	0.80
3	$\hat{Y}_h = 2.17MO - 0.57K_s - 0.08Ac + 0.0001RM + 0.08Ar - 0.52$	0.85
4	$\hat{Y}_h = 1.88MO - 0.04K_s - 0.63Ac + 0.0002RM + 0.23Ar - 274.13\theta_r + 2.68$	0.96
5	$\hat{Y}_m = 0.73K_s + 0.88MO + 0.05Ar + 2.98$	0.64
6	$\hat{Y}_m = 0.01K_s + 0.71MO + 0.08Ar + 0.008I_a + 2.94$	0.73
7	$\hat{Y}_m = -2.17K_s + 3.45MO + 0.16Ar + 0.02I_a - 4.56S_o + 0.49$	0.94
8	$\hat{Y}_f = 0.02I_a + 1.85K_s - 0.44MO - 1.38$	0.71
9	$\hat{Y}_f = 0.02I_a + 1.37K_s + 0.19MO + 3.61\theta_a - 0.64$	0.88
10	$\hat{Y}_f = 0.008I_a + 2.45K_s + 0.08MO + 4.28\theta_a - 0.13Ar + 1.22$	0.97

Donde: \hat{Y}_h , \hat{Y}_m , \hat{Y}_f = rendimiento de haba, maíz y frijol respectivamente; MO= materia orgánica; RM= resistencia mecánica; ρ_a = densidad aparente; K_s = conductividad hidráulica saturada; Ac= arcilla; Ar= arena; θ_r = humedad residual; I_a = infiltración acumulada; S_o = sorbilidad; θ_a = humedad aprovechable.

6. Conclusiones y recomendaciones

Los histogramas de frecuencia y las curvas de la función de densidad de probabilidades normal en la parcela experimental del contenido de humedad volumétrica (θ_v), resistencia mecánica (RM), conductividad eléctrica (CE), materia orgánica (MO), distribución del tamaño de partículas (DTP), humedad gravimétrica (θ_g), densidad aparente (ρ_a) y el rendimiento del haba, maíz y frijol se normalizaron adecuadamente por el método propuesto por Webster y Oliver (2001).

Los semivariogramas construidos a partir de valores normalizados en la parcela experimental de la θ_v , RM en todas las profundidades exploradas y la MO hasta 10 cm, se ajustaron a un modelo lineal con alta dependencia espacial de 89 m de distancia, con $R^2 > 80\%$; de igual forma ocurrió DTP pero con $R^2 > 70\%$; la CE hasta 10 cm de profundidad se ajusto a un modelo esférico con baja dependencia espacial de 36 m de distancia, con $R^2 > 85\%$; la CE y MO de 10-15 cm de profundidad su mejor ajuste fue con el modelo exponencial con baja dependencia espacial de 21 y 12 m de distancia, con R^2 de 65 y 40% respectivamente.

Lo semivariogramas de la humedad gravimétrica (θ_g) y la densidad aparente (ρ_a) muestreados en la parte central de la parcela experimental, se ajustaron al modelo lineal con alta dependencia espacial de 43 m de distancia y $R^2 > 90\%$. Los semivariogramas del rendimiento del haba y el estandarizado de haba-maíz-frijol, se ajustaron al modelo lineal, con alta dependencia espacial de 73 y 94 m de distancia, con R^2 de 99 y 82% respectivamente; en cambio, el rendimiento de maíz y frijol se ajusto al modelo esférico con dependencia espacial de 44 y 64 m de distancia y con R^2 de 93 y 91% respectivamente.

Los mapas de variabilidad espacial del rendimiento de los cultivos de haba, maíz y frijol se reflejo con menores rendimientos en las áreas de la parcela experimental, en donde, la humedad del suelo llego a punto de marchitamiento permanente, las otras propiedades físicas y químicas no influyeron en dicho rendimiento.

En el análisis de conglomerados de la parcela experimental, se obtuvieron 36 conglomerados de resistencia mecánica del suelo, con un coeficiente de aglomeración de 0.8, el 66% se ajustó a una ecuación polinómica el 19% lineal y el 15% cuadrática y logarítmica, expresando que la resistencia mecánica no se define en función de la profundidad del suelo. También resultaron siete conglomerados de la conductividad eléctrica, de los cuales seis se ajustaron a una ecuación polinómica, de estos un conglomerado formado por 39 datos tuvo un $R^2= 81\%$, el resto presentó $R^2 < 50\%$ y un conglomerado con tres datos se ajustó a la ecuación lineal con un $R^2= 71\%$. Del mismo modo, se formaron 13 conglomerados del contenido de materia orgánica, todos ellos se ajustaron a una ecuación lineal, 11 conglomerados presentaron un rango de R^2 de 77 a 94%, y dos conglomerados tuvieron un ajuste menor de 66%; por lo cual se afirma que la materia orgánica en un suelo sometido a labranza de conservación, ésta disminuye gradualmente a mayor profundidad.

Las propiedades del suelo de la parcela experimental que más influyeron en el rendimiento del cultivo de haba, maíz y frijol de mayor a menor importancia, tenemos que θ_g 25-30 cm, MO 0-5 cm, ρ_a 0-5 cm, CE 0-5 cm de profundidad y el contenido de arcilla, aportaron un porcentaje de 15 a 11.9% como variable individual para el rendimiento del cultivo del haba. De forma similar el rendimiento del maíz estuvo influenciado por las propiedades del suelo en orden de mayor a menor por la RM 2 cm, RM 5 cm, MO 0-5 cm, MO 10-15 cm y RM 15 cm de profundidad, estos aportaron un porcentaje de 34.7 a 12% como variables individuales. En cambio, las propiedades del suelo que explicaron el rendimiento del frijol en orden de mayor a menor fueron la RM 15 cm, RM 10 cm, ρ_a 25-30 cm, MO 10-15 cm y RM 20 cm, de profundidad, en un rango de 19.4 a 11.9%, como variables individuales.

El análisis de correlación de Pearson de las variables físicas y químicas, analizadas en las parcelas de escurrimiento con lluvia simulada y que tuvieron una alta correlación simple con el rendimiento de los cultivos fue la MO y K_s con un $R^2 > 70\%$; con excepción del rendimiento del frijol que tuvo una correlación de 59% con la MO del suelo, pero con I_a alcanzó un $R^2= 81\%$. Dicho rendimiento con las otras variables del suelo su coeficiente de correlación fue con $R^2 < 0.65$.

Las regresiones múltiples realizadas del rendimiento de los cultivos con las propiedades del suelo en las parcelas de escurrimiento; el rendimiento del haba al correlacionarse con MO, RM y ρ_a , se obtuvo un $R^2= 80\%$, pero también se logró con la MO, K_s y Ac, en ésta segunda combinación de variables al incluir la RM

y Ar se explicó 85% y finalmente al incluir θ_r se alcanzó 96% de rendimiento de grano de haba. El rendimiento de grano del maíz estuvo influenciado por las propiedades del suelo, tales como: K_s , MO y Ar, juntas explicaron 64%, pero al incluir a I_a , ésta aumento a 73% y posteriormente al adherir a S_o , se alcanzó 94% de explicación del rendimiento de grano del maíz. De la misma manera, el rendimiento de grano del frijol al correlacionarse con I_a , K_s y MO juntas estas tres variables del suelo explicaron 71% el rendimiento, pero al incluir θ_a a la ecuación esta aumento a 88% y finalmente al adherir Ar se alcanzó 97% dicho rendimiento.

La conductividad hidráulica saturada (K_s), fue una de las propiedades del suelo predominante en explicar la variabilidad del rendimiento de grano de los cultivos de haba, maíz y frijol, esta puede variar durante la estación de crecimiento del cultivo, especialmente cuando un suelo es sometido a prácticas de laboreo y ciclos de humedecimiento y secado (Six *et al.*, 2000). De acuerdo con los resultados obtenidos en este estudio sobre el comportamiento general de K_s , podemos concluir que la labranza de conservación presenta un sistema de poros efectivo para conducir los flujos de agua en condiciones de saturación. Por lo tanto, esta propiedad puede ser referida como un indicador físico del suelo en la producción de cultivos.

La baja perturbación del suelo en un sistema de labranza de conservación y el uso de mantillo incrementa el contenido de materia orgánica (MO) en la superficie del suelo, esta tuvo una influencia significativa sobre el rendimiento de grano de haba, maíz y frijol, porque mejora la estabilidad estructural del mismo y las propiedades de transmisión de agua, con lo que mejora la calidad física de los suelos agrícolas.

Por lo tanto la materia orgánica (MO), en este estudio es otro indicador del suelo, que sin duda juega un papel fundamental en el desarrollo de plantas de todo tipo, debido a esto la diversidad biológica en los suelos adquiere suma importancia, por ello, un suelo con alto contenido de materia orgánica y en el que se han practicado buenas rotaciones tenderá a tener una comunidad más diversa de organismos y brindará un medioambiente biológico más adecuado para el crecimiento de las plantas que un suelo con menor cantidad de materia orgánica.

7. Literatura citada

- Acton, D. F. and Gregorich, L. J. 1995. The health of our soils. Toward sustainable agriculture in Canada. Centre for Land and Biological Resources Research, agriculture and agri-food. Ottawa, Canada. 5-10 pp.
- Altieri, M. A. 1994. Bases agroecológicas para una producción agrícola sustentable. *Agricultura Técnica* 54. No. 4:371-386.
- American Society of Agronomy (ASA). 1999. Decisions reached of sustainable agriculture. *Agronomy News*. January issue. 14 p.
- Arellano, V. J. L.; Tut, C. C.; María, M. R.; Salinas, M. Y. y Taboada, G. O. R. 2003. Maíz azul de los Valles Altos de México. I. Rendimiento de grano y caracteres agronómicos. *Rev. Fitotec. Mex.* 26:101-107.
- Armstrong, M. and Carignan, J. 1997. Géostatistique linéaire, application au domaine minier. École de Mines de Paris. 112 p.
- Bahena, D. G.; Rojas, E. B.; Sánchez, J. V.; Soto, M. M. y Escobar, I. D. 2009. Sustentabilidad del agua en la producción de maíces criollos en Xalostoc, Morelos, México. *Agricultura Sociedad y Desarrollo*. 6(2):197-205.
- Bandick, A. K. and Dick, R. P. 1999. Field management effect on soil enzyme activities. *Soil Biology and Biochemistry*. 31(11):1471-1479.
- Barbier, B. 1998. Induced innovation and land degradation: results from a bioeconomic model of a village in west Africa. *Agricultural economics*. 19:15-25.
- Bautista, C. A.; Barra, J. E.; Castillo, R. F. y Gutiérrez, C. 2004. La calidad del suelo y sus indicadores. *Ecosistemas*. 13(2):90-97.
- Baver, L. D.; Gardner, W. H. y Gardner, W. R. 1980. Física de suelos. Traducción al español de Rodríguez, J. M. Editorial UTHEA. México. 514 p.
- Blake, G. R. and Hartge, K. H. 1986. Bulk density. In: Klute, A. (Ed). *Methods of soil analysis*. Part 1. Physical and mineralogical methods. *Agronomy No. 9*. Second edition. American Society of Agronomy. Madison, Wisconsin, USA. 363-382 pp.

- Blakkes, J. A.; Van den Born, G. J.; Helder, J. C.; Swart, R. J.; Hope, C. W. and Parker, J. D. E. 1994. An overview of environmental indicators. State of the art and perspectives, PNUMA/RIVM, Naibori. 242 p.
- Blevins, R. L.; Smith, M. S.; Thomas, G. W. and Frye, W. W. 1983. Influence of conservation tillage on soil properties. *Journal Soil and Water Conservation*. 38(3):301-304.
- Brand, J. and Pfund, J. L. 1998. Site and watershed-level assessment of nutrient dynamics under shifting cultivation in eastern Madagascar. *Agriculture, Ecosystems & Environment*. 71(1-3):169-183.
- Brady, N. C. and Weil, R. R. 1999. The nature and properties of soils. Ed. Prentice Hall. Twelfth edition. 880 p.
- Budd, W. W. 1992. What capacity the land?. *Journal Soil Water Conservation*. 47:28-31.
- Buol, S. W. 1995. Sustainability of soil use. *Annu. Rev. Ecol. Syst.* 26:25-44.
- Cabrera, M. L. 1993. Modeling the flush of nitrogen mineralization caused by drying and rewetting soils. *Soil Science Society American Journal*. 57(1):63-66.
- Campbell, C. A.; Jame, Y. W.; Akinremi, O. O. and Cabrera, M. L. 1996. Adapting the potentially mineralizable N concept for the prediction of fertilizer N requirement. *In: Ahmad, N., editor. Nitrogen economy in tropical soils. Kluwer academic publishers. The Netherlands.* 61-76 pp.
- Carter, M. R. 1988. Penetration resistance to characterize the depth and persistence of soil loosening in tillage studies. *Can. J. Soil Sci.* 68:657-668.
- Casas, C. R.; Saldaña, T. M.; González C. V. F.; Moya, G. E. G.; Olvera, B. V. P.; Arriaga, F. J. T. y Pérez, T. C. 2001. Sustentabilidad: Avances, limitaciones y perspectivas de su evaluación. *In: Indicadores de sustentabilidad. Editores: Sánchez, P. S.; García, M. V.; Alcocer, E. L. y Hernández, S. C. Centro Universitario de Ciencias Biológicas y Agropecuarias de la Universidad de Guadalajara, Jalisco, México.* 27-51 pp.
- Chauvet, P. 1994. Aide-mémoire de géostatistique minier. École des Mines de Paris. 210 p.
- Chertkov, O. G. and Komarov, A. S. 1997. SOMM: A model of soil organic matter dynamics. *Ecological Modeling*. 94(2-3):177-190.
- Chong, S. K. 1983. Calculation of sorptivity from constant-rate rainfall infiltration measurement. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 47:627-630.
- Comia, R. A., Stenberg, M., Nelson, P., Rydberg, T., and Hakansson, I. 1994. Soil and crop response to different tillage system. *Soil & Tillage Research*. 29(4):335-355.

- Cook, G. D.; So, H. B. and Dalal, R. C. 1992. Structural degradation of two vertisols under continuous cultivation. *Soil & Tillage Research*. 24:47-64.
- Dalton, F. N. 1992. Development of time domain reflectometry for measuring soil water content and bulk soil electrical conductivity. *In: Topp, G-C., Reynolds, W. D. and Green, R. E. (Eds.). Advances in measurement of soil physical properties: bringing theory into practice*. SSSA. Madison, Wisconsin, USA. Especial publication No. 30. 143-167 pp.
- De camino, V. R. y Muller, S. 1993. Sostenibilidad de la agricultura y los recursos naturales. Bases para establecer indicadores. Serie documentos de programa. No. 38. San José, Costa Rica: Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura - GTZ. 134 p.
- Defoer, T.; Groote, H.; Hilhorst, T.; Kante, S. and Budelman, A. 1998. Participatory action research and quantitative analysis for nutrient management in southern Mali: a fruitful marriage? *Agriculture, Ecosystems & Environment* 71(1-3):215-228.
- De Jager, A.; Nandwa, S. M. and Okoth, P. F. 1998. Monitoring nutrient flows and economic performance in African farming systems (NUTMON). Concepts and methodologies. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 71(1-3):37-48.
- Dexter, A. R. and Young, I. M. 1992. Soil water towards 2000. *Soil & Tillage Research*. 24:101-106.
- Dexter, A. R. 2004. Soil physical quality part I. Theory effect of soil texture, density, and organic matter, and effect on root growth. Article in press, *Geoderma*. 120:201-214.
- Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI). 2007. VIII Censo agrícola, ganadero y ejidal. México. 336 p.
- Domínguez, J.; Aira, M. y Gómez-Brandón, M. 2009. El papel de las lombrices de tierra en la descomposición de la materia orgánica y el ciclo de nutrientes. *Ecosistemas* 18(2):20-31.
- Doran, J. W.; Coleman, D. C.; Bezdicek, D. F. and Stewart, B. A. 1994. Defining soil quality for a sustainable environment. SSSA. Special publication 35. SSSA/ASA. Madison, Wisconsin, USA. 244 p.
- Doran, J. W. A. and Parkin, T. B. 1994. Defining and assessing soil quality. *In: Doran, J. W.; Coleman, D. C.; Bezdicek, D. F. and Stewart, B. A. (eds). Defining soil quality for a sustainable environment*. Special publication 35. SSSA. Madison, Wisconsin, USA. 3-21 pp.
- Dreschel, P. and Gyiele, L. A. 1999. The economic assessment of soil nutrient depletion. Analytical issues for framework development. International board for soil research and management. Issues in sustainable land management number 7. Bangkok: IBSRAM. 254 p.

- Dumanski, J. 1994. Sustainable land management for the 21st century. International workshop on sustainable land management for the 21st century. University of Lethbridge, Canada. Agricultural Institute of Canada. 342 p.
- Duvick, D. N. and Cassman, K. G. 1999. Post-green revolution trends in yield potential of temperate maize in the North-Central United States. *Crop Sci.* 39:1622-1630.
- Duxbury, J. M. and Nkambule, S. V. 1994. Assessment and significance of biologically active soil organic matter. *In: Doran, J. W.; Coleman, D. C.; Bezdicek, D. F. Stewart, and B. A. Defining soil quality for a sustainable environment.* SSSA. Special publication 35. Madison, WI, USA. 125-146 pp.
- Edmeades, G. O.; Bolaños, J.; Chapma, S. C.; Lafitte, H. R. and Bänzinger, M. 1999. Selection improves drought tolerance in tropical maize populations: gains in biomass, grain yield, and harvest index. *Crop Sci.* 39:1306-1315.
- Emerson, W. W. and Greenland, D. J. 1990. Soil aggregates-formation and stability. *In: Soil colloids and their association in aggregates.* De-Boodt, M. F. *et al.* (eds). Plenum Press. New York, USA. 324-364 pp.
- Figuroa, S. B. y Morales, F. J. F. 1992. Manual de producción de cultivos con labranza de conservación. Colegio de Postgraduados, Montecillo, Texcoco, México. 273 p.
- Galvis, S. A. 1998. Diagnóstico y simulación del suministro de nitrógeno edáfico para cultivos anuales. Tesis de Doctor en Ciencias. Colegio de Postgraduados, Montecillo, Texcoco, México. 327 p.
- García, E. 2004. Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen. 5^a edición. Instituto de Geografía-Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), D. F. 90 p.
- Gavande, S. A. 1987. Física de suelos, principios y aplicaciones. Sexta reimpresión. Limusa, México, D. F. 351 p.
- Grant, R. F.; Jackson, S.; Kiniry, J. R. and Arkin, G. F. 1989. Water deficit timing effects of yield components in maize. *Agronomy Journal.* 81:61-65.
- Greenland, D. J. 1994. Long-term cropping experiments in developing countries: the need, the history and the future *In: Long-term. Experiments in agricultural and ecological sciences.* Ed. Leigh, R. A. and Johnston, A. E. Wallingford CAB International. 187-209 pp.
- Gregorich, E. G.; Carter, M. R.; Angers, D. A.; Monreal, C. M. and Ellert, B. H. 1994. Toward a minimum data set to assess soil organic matter quality in agricultural soils. *Can. J. Soil Sci.* 74:367-386.
- Griffith, D. R.; Mannering, V. J. and Moldenhauer, C. W. 1977. Conservation tillage in the eastern corn belt. *Journal Soil and Water Conservation.* 32(1):21-28.

- Gutiérrez, C. Ma. C. y Ortiz, S. C. A. 1999. Origen y evolución de los suelos del ex-lago de Texcoco, México. *Agrociencia*. 33:199-208.
- Harwood, R. R. 1990. A history of sustainable agriculture. *In: Sustainable agricultural systems*. Edwards et al. Eds. Soil and Water Conservation Society. Ankeny, Iowa. USA. 3-19 pp.
- Hassink, J.; Matus, F. J.; Chenu, C. and Dalenberg, J. W. 1997. Interactions between soil biota, soil organic matter, and soil structure. *In: Brussaard, L. and Ferrera, R. C. Soil Ecology in Sustainable Agricultural Systems*. 15-36 pp.
- Hillel, D. 1980. *Fundamentals of soil physics*. Ed. Academic Press. New York, USA. 413 p.
- Hillel, D. 1998. *Environmental soil physics*. Ed. Academic Press. New York, USA. 687 p.
- Horn, R.; Taubner, H.; Wuttke, M. and Baumgartl, T. 1994. Soil physics properties related to soil structure. *Soil & Tillage Research*. 30: 187-216.
- Hunnmeyer, A. J.; De Camino, R. V. y Muller, S. (1997). *Análisis de desarrollo sostenible en Centroamérica. Indicadores para la agricultura y los recursos naturales*. IICA/GTZ. San José, Costa Rica. 155 p.
- Jackson, W. 1985. *New roots for agriculture*. Friends of the earth. University of Nebraska Press. San Francisco California. USA. 172 p.
- Janssen, B. H. 1993. Integrated nutrient management: the use of organic and mineral fertilizers. *In: The role of plant nutrients for sustainable food crop production in Sub-Saharan Africa*. Ed. Van Reuler H. and Prins, W. H. Leidschendam. 89-105 pp.
- Jenkinson, D. S. and Rayner, J. H. 1977. The turnover of soil organic matter in some of the Rothamsted classical experiment. *Soil Science*. 123:298-305.
- Karamanos, A. J. and Papatheohari, A. Y. 1999. Assessment of drought resistance of crop genotypes by means of the water potential Index. *Crop Sci*. 39:1792-1797.
- Karlen, D. L.; Mausbach, M. J.; Doran, J. W.; Cline, R. G.; Harris, R. F. and Schumann, J. E. 1997. Soil quality. A concept, definition and framework for evaluation. *Soil Science Society American Journal*. 61:4-10.
- Kaufman, L., and Rousseeuw, P. J. 1990. *Finding groups in data. An introduction to cluster analysis*. Wiley. 283 p.
- Kaúrichev, S. I. 1984. *Prácticas de edafología*. Editorial Mir Moscú, Rusia. 279 p.
- Keith, A. S. and Mullins, C. E. 2001. *Soil and environmental analysis*. Second edition. New York, USA. 637 p.

- Kennedy, A. C., and Papendick, R. I. 1995. Microbial characteristic of soil quality. *In: SQI, 1996. Indicators for soil quality evaluation.* USDA, Natural Resources Conservation Service. Soil Quality Institute. Agricultural Research Service. USDA. 243-248 pp.
- Koppi, A. J. and Douglas, J. T. 1991. A rapid, inexpensive and quantitative procedure for assessing soil structure with respect to cropping. *Soil Use and Management.* 7(1):52-55.
- Lado, M.; Paz, A. and Ben-Hur, M. 2004. Organic matter and aggregate size interactions in infiltration, seal formation and soil loss. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 68:935-942.
- Lal, R. D.; Eckert, J.; Fausey, N. R. and Edwards, W. M. 1990. Conservation tillage in sustainable agriculture *In: Sustainable agricultural systems.* Edwards *et al.*, editores. Soil and Water Conservation Society. Ankeny, Iowa. USA. 203-225 pp.
- Lamorey, G. and Jacobsom, E. 1995. Estimation of semivariogram parameters and evaluation of the effects of data sparsity. *Mathematical Geology.* 27(3):327-358.
- Larson, W. E. and Pierce, F. J. 1991. Conservation and enhancement of soil quality, in evaluation for sustainable land management in the developing world, Vol. 2. IBSRAM Proc. 12(2). Int. Board for Soil Res. and Management, Bangkok, Thailand. 37-51 pp.
- Letey, J. 1991. The study of soil structure: science or art. *Australian Journal of Soil Research.* 29(6):699-707.
- Libert, M. and Horn, R. 1991. A method to predict the mechanical strength of agricultural soils. *Soil & Tillage Research.* 19:275-286.
- Lomelí, V. G. 1996. Cambios antropogénicos de los vertisoles de la cuenca del arroyo UCUM, Quintana Roo. Tesis de maestría. Colegio de Postgraduados, Montecillo, México. 228 p.
- Mancera, R. A. 2005. Resistencia de la semilla del híbrido de maíz (*Zea mays* L.) HS-2 a impacto y compresión axial. Tesis de maestría. Colegio de Posgraduados, Montecillo, Texcoco, Estado de México. 107 p.
- Masera O.; Astier, M. y López-Ridaura, S. 2000. Sustentabilidad y manejo de recursos naturales. El marco de evaluación MESMIS. Mundi-Prensa. México, D. F. 109 p.
- McBratney, A. B. and Webster, R. 1986. Optimal interpolation and isarithmic mapping of soil properties. V. Coregionalisation and multiple sampling strategies. *Journal of Soil Science.* 34:137-162.
- McKeague, J. A.; Fox, C. A.; Stone, J. A. and Protz, R. 1987. Effects of cropping system of structure on Brookston clay loam soil in long-term experimental plots at Woodslee, Ontario. *Can. J. Soil Sci.* 67(3):571-574.

- Norton, L. D.; Figueroa, S. B. and Oropeza, M. J. L. 1995. Comparison of runoff and erosion from natural and reclaimed tepetate from the semiarid area East of Mexico city. Paper submitted for the special edition of the Journal Soil and Water Conservation based on the symposium: "Water Research and Management in Semiarid Environments". Tucson, Arizona, USA. 15 p.
- Oades, J. M. 1993. The role of biology in the formation, stabilization and degradation of soil structure. *Geoderma*. 56:377-340.
- Ohu, J. O.; Rhagavan, G. S. and Mekyes, E. 1985. Peat-moist effect on the physical and hydraulic characteristics of compacted soils. *ASAE*. 28:420-424.
- Oleschko, K.; Etchevers, B. J. D. and Osorio, J. L. 1993. Pedological features as indicators of the tillage effectiveness in vertisols. *Soil and Tillage Research* 26:11-31.
- Ortega, R. C. y Ochoa, B. R. 2003. El frijol mexicano y el nuevo siglo. *Claridades agropecuarias*. 124:6-15.
- Ortiz, V. B. y Ortiz, S. C. A. 2001. *Edafología*. Universidad Autónoma Chapingo, Chapingo, Texcoco, México. 394 p.
- Pagliai, M. 2003. Soil surface sealing and crusting-soil compaction. *In: College on Soil Physics. International Centre for Theoretical Physics. Trieste, Italy*. 24 p.
- Parr, J. F.; Papendick, R. I.; Hornic, S. B. and Meyer, R. E. 1992. Soil quality attributes and relationships to alternative and sustainable agriculture. *Amer. J. Altern. Agric.* 7:5-11.
- Passioura, J. B. 1991. Soil structure and plant growth. *Aust. J. of Soil Res.* 29(6):717-728.
- Paustian, K.; Levine, E.; Post, W. M. and Ryzhova, I. M. 1997. The use of models to integrate information and understanding of soil C at the regional scale. *Geoderma* 79:227-260.
- Pierce, J. F.; Fortin, M. C. and Sfaton, M. J. 1994. Periodic plowing effects on soil properties in no till farming systems. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 58:1782-1787.
- Pramila, R. and A. K. Son, 1991. Soil degradation studies under different land use system in and arid environment. *Annals of Arid Zone* 30(1):11-15.
- Prasad, R. and J. F. Power. 1991. Crop residue management. *Advances in Soil Science*. 15:205-251.
- Ramirez, V. P. 1992. Identification and estimation of heritability of drought related resistance traits in dry bean. Vol. 1. Dissertation for the degree of Ph. D. Michigan State University. 135 p.
- Rawls, W. J.; Gish, T. J. and Brakensiek, D. L. 1991. Estimating soil water retention from soil physical properties and characteristics. *Adv. Soil Sci.* 16: 213-234.
- Ray, L. C. and Boyd, G. E. 1987. *Soil management: a world view of conservation and production*. John Wiley & Sons. 17-23 pp.

- Reidntjes, C.; Haverkort, B. and Bayer, A. W. 1995. Low-external-input and sustainable agriculture: and emerging option. *In: Farming for the future*. Macmillan. LEIA. Netherlands. 1-20 pp.
- Rhoton, F. E.; Bruce, R. R.; Buehring, N. W.; Elkins, G. B.; Landale, C. W. and Tyler, D. D. 1993. Chemical and physical characteristics of four soil types under conservational and no tillage systems. *Soil & Tillage Research*. 28:51-61.
- Rodale, L. 1984. Breaking new ground. The search for sustainable agriculture. *The futurist* 1(1):15-20.
- Rosales, S. R. 2004. Variedades mejoradas de frijol. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. SAGARPA, INIFAP y CIRCE. Campo Experimental Valle de México, Chapingo, México. Libro técnico núm. 6. 149 p.
- Sánchez, P. A.; Shepherd, K. D.; Soule, M. J.; Place, F. M.; Buresh, R. J.; Izac, A. M. N.; Mokwunye, A.U.; Kwesiga, F. R.; Ndiritu, C. G. and Woome, P. L. 1997. Soil fertility replenishment in Africa: An investment in natural resource capital. *In: Replenishing Soil Fertility in Africa*. Eds. Buresh, R. J.; Sánchez, P. A. and Calhoun, F. Special publication núm. 51. Wisconsin, USA. 1-46 pp.
- Statistical Analysis Systems Institute (SAS Institute). 1999. The SAS system for window. SAS Institute Inc. Cary, NC27513, USA.
- Singer, M. J. and Ewing, S. 2000. Soil quality. *In: Summer, M. E. editor. Handbook of soil Science*. CRC Press, Boca Raton, Florida, USA. 271-298 pp.
- Singh, S. P.; Terán, S. H.; Muñoz, C. G.; Osorno, G. J. and Thung, M. D. 2003. Low soil fertility tolerance in landraces and improved common beans genotypes. *Crop Sci*. 43(1):110-119.
- Six, J.; Paustian, K.; Elliott, E. T. and Combrink, C. 2000. Soil structure and organic matter. Distribution of aggregate-size classes and aggregate-associated carbon. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 64: 681-689.
- Soil Taxonomy 2006. A basic system of soil classification for making and interpreting soil surveys. USDA-NRCS. By Soil Survey Staff, USA. 332 p.
- Solorzano, V. E. 1993. Colección y documentación del cultivo de haba (*Vicia faba L.*). En los valles altos de México. Universidad Autónoma Chapingo, Chapingo, Texcoco, México. 162 p.
- Soil Quality Institute (SQI). 1996. Indicators for soil quality evaluation. USDA, Natural Resources Conservation Service. Soil Quality Information Sheet. USA. 313 p.
- Stockdale, E. A.; Gaunt, J. L. and Vos, J. 1997. Soil-plant nitrogen dynamics. What concepts are required? *European Journal of Agronomy*. 7:145-159.
- Topp, G. C. and Reynolds, W. D. 1980. Electromagnetic determination of soil water content: measurements in coaxial transmission lines. *Water Resource Res.* 16:574-582.

- Torrento, J. R. and Sole-Benet, A. 1992. Soil macroporosity evaluated by a fast image analysis technique in differently managed soils. *Soil Sci. Plant Anal.* 23 (11 y 12):1229-1244.
- Van Genuchten, M. Th. 1980. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 44:892-898.
- Van Genuchten, M. Th.; Leij, F. J. and Yates, S. R. 1991. The RETC for quantifying the hydraulic functions of unsaturated soils. Salinity laboratory, USDA, ARS. Riverside, California, USA. 83 p.
- Vázquez, A. A. 1997. Guía para interpretar el análisis químico del agua y suelo. Departamento de Suelos. Universidad Autónoma Chapingo, Chapingo, Texcoco, México. 31 p.
- Ventura, R. E. Jr. 1992. Efecto de la labranza en la estructura del suelo y su relación con el crecimiento, desarrollo y rendimiento del sorgo en Guanajuato. Tesis de Maestría. Colegio de Postgraduados, Montecillo, Texcoco, México. 202 p.
- Wallace, M. K. and Hawkims, D. M. 1994. Applications of geostatistics in plant nematology. *Journal of Nematology.* 26 (45):626-634.
- Walkley, A. and Black, T. A. 1934. An examination of the method for determining soil organic matter and a proposed modification of the chromic acid titration method. *So. Sci. Soc. Am. J.* 68:1403-1409.
- Ward, J. H. 1963. Hierarchical grouping to optimize an objective function. *Journal of the American Statistical Association.* 58(301):236-244.
- Warrick, A. W. 2003. Soil water dynamics. Oxford University Press. Madison, New York, USA. 391 p.
- Warrick, A. W. and Nielsen, D. R. 1980. Spatial variability of soil physical properties in the field. *In*: Hillel, D. (ed.). Application of soil physics. Academic Press. New York, USA. 319-344 pp.
- Webster, R. 1985. Quantitative spatial analysis of soil in the field. *Soil Sci.* 3:1-69.
- Webster, R. and Oliver, M. A. 2001. Geostatistics for environmental scientists. John Wiley & Sons. PO191UD, England. 271 p.
- Zhang, R.; Myers, D. E. and Warrick, A. W. 1992. Estimation of the spatial distribution of soil chemical using pseudo cross-variograms. *Soil Sci. Soci. of Ame. J.* 56:1444-1452.
- Zazueta, Z. G. 1984. Influencia de los sistemas de labranza y obras de conservación en la productividad del suelo. Tesis de Maestría. Colegio de Postgraduados, Montecillo, Texcoco, México. 195 p.
- Zinselmeier, C.; Westgate, M. E. and Jones, R. J. 1995. Kernel set at low water potential does not vary with source/sink ratio in maize. *Crop Sci.* 35:158-163.