

**VARIABILIDAD ESPACIAL DE LAS PROPIEDADES DEL SUELO EN
RELACIÓN CON SU PRODUCCIÓN, EN PLANTACIONES INDUSTRIALES DE
CEIBA ROJA (*Pachira quinata*)**

DIEGO JOSE RUBIANO RUBIANO



UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA
FACULTAD DE AGRONOMIA
ESCUELA DE POSGRADOS
INSTITUTO GEOGRAFICO AGUSTÍN CODAZZI
MAESTRIA EN GEOMATICA
BOGOTA, D. C.

2010

VARIABILIDAD ESPACIAL DE LAS PROPIEDADES DEL SUELO EN
RELACIÓN CON SU PRODUCCIÓN, EN PLANTACIONES INDUSTRIALES DE
CEIBA ROJA (*Pachira quinata*)

DIEGO JOSE RUBIANO RUBIANO

Código: 07-795014

Trabajo de grado para optar al Título de Maestría en Geomática

DIRECTOR:

LUIS JOEL MARTINEZ M. M. Sc.

CODIRECTOR:

MIGUEL A. RODRÍGUEZ M. M. Sc.

UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA
FACULTAD DE AGRONOMIA
ESCUELA DE POSGRADOS
INSTITUTO GEOGRAFICO AGUSTÍN CODAZZI
MAESTRIA EN GEOMATICA
BOGOTA, 2010

Nota de aceptación

Profesor ERNESTO BASTIDAS MSc
Presidente del Jurado

Profesor RAMON GIRALDO PhD
Jurado

Profesor MIGUEL CADENA PhD
Jurado

Bogotá, D. C. 10 de Febrero de 2010

DEDICATORIA

A Cristina mi esposa,
a María Camila mi hija,
por el tiempo que les quite,
para lograr culminar esta meta.

a mi Madre Gloria
por su permanente apoyo.

AGRADECIMIENTOS

El autor expresa su agradecimiento a:

Dr. Luis Joel Martínez M., Director de la investigación, por sus importantes y acertadas orientaciones y continuas revisiones.

Dr. Miguel Rodríguez M., Director externo o codirector de la investigación, por su apoyo incondicional tanto, técnico, moral y financiero.

Dr. Miguel Cadena, Ingeniero Forestal con doctorado en suelos, profesor de la Universidad Distrital, por sus valiosos aportes, su valor agregado en los análisis de suelos y por su revisión y nuevos aportes a la tesis.

Dr. Ramón Giraldo con doctorado en Geoestadística, profesor de la Universidad Nacional Departamento de Estadística, por sus expertos conceptos en geoestadística, así como la revisión y oportunos comentarios a la tesis.

Ing. Ernesto Bastidas, profesor de la Universidad Nacional de la Facultad de Agronomía, por su revisión y acertados comentarios a la misma.

Ing. Edilberto León, con maestría en suelos por sus aportes en la descripción de los suelos de Monterrey forestal y sus aportes conceptuales.

Ing. Ricardo Benítez, Ingeniero a cargo técnicamente de Monterrey Forestal, por su logística y apoyo en campo con su capataz y seis operarios de campo con mucha experiencia en las plantaciones de Ceiba.

Los Ingenieros forestales Jonny Winston Mora Pamplona (manejo de datos forestales) y William Sánchez (manejo de datos edafológicos) por su apoyo en la preparación, trabajo de campo y manejo de datos.

Ing. José Luis Baquero, por su dedicación y esmero en la obtención de datos de laboratorio de suelos.

Ing. Alejandro Guauque, por sus opiniones y sus valiosos conceptos estadísticos.

Ing. Salomón E. Ramírez, por su colaboración en SIG y geoestadística.

Universidad Nacional de Colombia y al IGAC, por permitirme tener las bases suficientes para el desarrollo de la investigación.

Laboratorio de suelos de la Universidad Distrital, por la iniciativa de tener énfasis en suelos forestales.

Pizano S.A. y Monterrey Forestal por la información suministrada y por el patrocinio en los costos de la investigación.

GLOSARIO

Altura total: distancia vertical entre el nivel del suelo y el extremo más alto del árbol.

Altura dominante: altura media de los árboles dominantes (mayor biomasa) de un rodal determinado.

Calidad de sitio: La calidad de sitio forestal se entiende como la capacidad productiva de dicho lugar y habitualmente se refiere al volumen de madera producido por una masa forestal cuando llega a la edad del turno.

Capacidad de intercambio catiónico: atributo del suelo que es la suma de los cationes adsorbidos en la superficie de minerales del suelo y dentro del enrejado cristalino de algunos minerales y los que hacen parte de ciertos compuestos orgánicos que pueden ser reversiblemente reemplazados por aquellos de soluciones salinas y ácidas.

Dasometría: rama de la dasonomía que estudia la medición de los bosques y de sus productos a través de las dimensiones de los elementos que lo constituyen.

Dasonomía: ciencia forestal que trata de las relaciones de los bosques y el bienestar humano.

Densidad de plantación: cantidad de árboles expresado en volumen, área basal o número de árboles por unidad de área.

Diámetro a la altura del pecho (DAP): es el diámetro del tronco de un árbol a 1.30 metros de altura del suelo.

Edafología: estudia la composición y naturaleza del suelo en su relación con las plantas y el entorno que le rodea. Dentro de la edafología aparecen varias ramas teóricas y aplicadas que se relacionan en especial con la física y la química.

Modelo estadístico: intento matemático / estadístico para explicar una variable respuesta por medio de una o más variables explicativas o factores.

Modelo empírico: abstracción o representación de un sistema real que permite explicar, entender y mejorar dicho sistema. Puede ser matemático, biológico etc.

Rodal: unidad silvícola que tiene uno o más rasgos comunes en composición, edad, espesor, etc.

Silvicultura: manejo científico de los bosques para la continua producción de bienes y servicios.

TABLA DE CONTENIDO

LISTADO DE FIGURAS	ix
LISTADO DE TABLAS	xi
1. INTRODUCCIÓN	1
2. OBJETIVOS	4
GENERAL	4
ESPECÍFICOS	4
3. MARCO TEÓRICO	5
3.1. PLANTACIONES FORESTALES INDUSTRIALES	5
3.2. CARACTERÍSTICAS DE LA CEIBA ROJA <i>Pachira quinata</i>	11
3.3. CARACTERÍSTICAS DE LOS SUELOS	13
3.4. VARIABLES ESPACIALES DE LOS SUELOS Y SU RELACIÓN CON LA PRODUCTIVIDAD DE LAS PLANTACIONES FORESTALES	15
3.5. VARIABLES ESPECTRALES Y SU RELACIÓN CON LA PRODUCTIVIDAD DE LAS PLANTACIONES FORESTALES	16
3.6. GEOMÁTICA	17
3.6.1. Geoestadística	18
3.6.2 Kriging	19
3.6.3 Cokriging	19
4. MATERIALES Y METODOS	21
4.1. ÁREA DE ESTUDIO	21
4.2. SUELOS DEL ÁREA DE ESTUDIO	22
ASOCIACIÓN LA CAÑA (CE)	26
ASOCIACIÓN EL EDEN (ED)	27
ASOCIACIÓN EL BONGAL (BN)	27
4.3. CARACTERÍSTICAS CLIMÁTICAS DEL ÁREA DE ESTUDIO	28
4.4. ZONA DE VIDA DEL ÁREA DE ESTUDIO	31
BOSQUE SECO TROPICAL	31
4.5. CARACTERÍSTICAS DE LAS PLANTACIONES DE CEIBA ROJA	33
4.6. LEVANTAMIENTO Y ANÁLISIS DE DATOS	34
4.6.1. DISEÑO DE LEVANTAMIENTO DE DATOS	34
4.6.2. MUESTREO DE SUELOS	38
4.6.3. PROCEDIMIENTOS Y ANALISIS EN CAMPO DE SUELOS	39
INFILTRACIÓN	43
CONDUCTIVIDAD HIDRÁULICA	44
4.6.4. ANÁLISIS EN LABORATORIO	45
DENSIDAD REAL, APARENTE Y HUMEDAD GRAVIMÉTRICA	46
<i>Determinación de la densidad de las partículas o densidad real por el método del picnómetro</i>	47
<i>Materiales y equipos</i>	47
<i>Procedimiento</i>	47

<i>Cálculos</i> _____	47
4.6.5. ANÁLISIS DE LA IMAGEN LANDSAT _____	48
4.6.6. DATOS DE VEGETACIÓN E INVENTARIO FORESTAL (DASOMETRÍA) _____	51
<i>MARCADO DE LOS INDIVIDUOS</i> _____	51
<i>MEDICIONES FORESTALES</i> _____	52
<i>UBICACIÓN EN PLANOS Y CÁLCULOS</i> _____	54
4.6.7. ANÁLISIS DE DATOS _____	54
5. RESULTADOS _____	57
5.1. ANÁLISIS EXPLORATORIO DE VARIABLES DASOMÉTRICAS, ESPECTRALES Y PRECIPITACIÓN (MUESTRA GRANDE) _____	57
5.2. ANÁLISIS EXPLORATORIO DE VARIABLES DASOMÉTRICAS, EDÁFICAS, ESPECTRALES Y PRECIPITACIÓN (MUESTRA PEQUEÑA) _____	58
5.3. CORRELACIONES ENCONTRADAS ENTRE VARIABLES DASOMÉTRICAS, ESPECTRALES Y PRECIPITACIÓN (MUESTRA GRANDE) _____	61
5.4. CORRELACIONES ENCONTRADAS ENTRE VARIABLES DASOMÉTRICAS, EDÁFICAS, ESPECTRALES Y PRECIPITACIÓN (MUESTRA PEQUEÑA) _____	63
5.5. ANÁLISIS ESTADÍSTICOS MULTIVARIADOS DE VARIABLES DASOMÉTRICAS, ESPECTRALES (MUESTRA GRANDE) _____	67
5.6. ANÁLISIS ESTADÍSTICOS MULTIVARIADOS DE VARIABLES DASOMÉTRICAS, EDÁFICAS, ESPECTRALES Y PRECIPITACIÓN (MUESTRA PEQUEÑA) _____	84
5.7. INTERPRETACIÓN DE DATOS ESTADÍSTICOS MULTIVARIADOS Y TOMA DE DECISIONES _____	101
5.8. VARIABILIDAD ESPACIAL _____	102
5.8.1. VOLUMEN TOTAL _____	104
5.8.2. SODIO DEL SUELO _____	111
5.8.3. CONDUCTIVIDAD HIDRÁULICA _____	116
5.8.4. CAPACIDAD DE INTERCAMBIO CATIONICO EFECTIVA CICE _____	121
5.9. DISCUSIÓN DE RESULTADOS _____	126
6. CONCLUSIONES _____	129
7. RECOMENDACIONES _____	131
8. BIBLIOGRAFÍA _____	132

ANEXOS

LISTADO DE FIGURAS

<i>Figura 1: Distribución de plantaciones forestales por Región. FAO, 2001</i>	5
<i>Figura 2: Superficies de plantaciones forestales en Sudamérica 1980 a 2000. FAO, 2001</i>	6
<i>Figura 3: Ceiba roja Pachira quinata. Ureña 1999 y Pérez 2007</i>	12
<i>Figura 4: Plantación de Ceiba roja Pachira quinata. Fuente Ureña 1999</i>	12
<i>Figura 5: Distribución de Ceiba roja Pachira quinata. Ureña 1999</i>	13
<i>Figura 6: Componentes de la geomática. Martínez, 2004</i>	18
<i>Figura 7: Localización de la zona de estudio Fuente: Pizano S.A. 2007 y Google Earth 2009</i>	21
<i>Figura 8: Mapa de predios Hacienda Monterrey Forestal plantados con Ceiba roja Pachira quinata y Gmelina arborea. Pizano S.A. 2007</i>	22
<i>Figura 9: Mapa de suelos Hacienda Monterrey Forestal. Pizano S.A. 2007</i>	23
<i>Figura 10: Mapa de suelos Hacienda Monterrey Forestal de los predios con Ceiba roja Pachira quinata. Fuente: Pizano S.A. 2007</i>	25
<i>Figura 11: Distribución en 25 años de la precipitación en Monterrey forestal. Pizano S.A. 2007.</i>	29
<i>Figura 12: Distribución de la precipitación media mensual y la evapotranspiración en Monterrey forestal desde 1981 a 2006. Pizano S. A. 2007.</i>	30
<i>Figura 13: Distribución de la precipitación media anual en la Hacienda Monterrey. Fuente: Pizano S.A. 2007</i>	31
<i>Figura 14: Flujograma metodológico para determinar la variabilidad espacial de las propiedades del suelo, la producción y la respuesta espectral de plantaciones industriales de ceiba roja.</i>	34
<i>Figura 15: Mapa de los predios seleccionados con Ceiba roja Pachira quinata, donde se toman los datos forestales y edáficos. Fuente: Pizano S.A. 2007</i>	35
<i>Figura 16: Grupo de predios con Ceiba roja Pachira quinata, Zona Sur.</i>	36
<i>Figura 17: Grupo de predios con Ceiba roja Pachira quinata, Zona Sur en detalle Anadaluz 16 y 17.</i>	36
<i>Figura 18: Grupo de predios con Ceiba roja Pachira quinata, Zona Norte en detalle predio San José 1.</i>	37
<i>Figura 19: Numeración de parcelas para medir variables de silvicultura y de suelos.</i>	38
<i>Figura 20: Barreno holandés, equipo de campo para la extracción de muestras de suelo.</i>	39
<i>Figura 21: Muestras de suelo, extraídas con barreno.</i>	40
<i>Figura 22: Embalaje y Etiquetado de muestras en campo.</i>	40
<i>Figura 23: Calicata y características de muestreo. Baquero y Vargas, 2003</i>	41
<i>Figura 24: Calicata grande con tres muestras de cilindro.</i>	41
<i>Figura 25: Etiquetado de calicata grande.</i>	41
<i>Figura 26: Equipo para manipulación de muestras en calicatas.</i>	42
<i>Figura 27: Extractor de muestras de los cilindros. (Detalle).</i>	42
<i>Figura 28: Equipo para manipulación de muestras en cilindros para Infiltración.</i>	43
<i>Figura 29: Cilindros concéntricos y regla metálica (Detalle).</i>	44
<i>Figura 30: Equipo de Conductividad AntiBisser, elementos principales: listón y bloque de balsa o botella vacía.</i>	45
<i>Figura 31: Equipo de Conductividad AntiBisser, Aplicación en campo.</i>	45
<i>Figura 32: Laboratorio de Suelos. Vista Panorámica 1.</i>	46
<i>Figura 33: Laboratorio de Suelos. Vista Panorámica 2.</i>	46
<i>Figura 34: Laboratorio de Suelos. Vista Panorámica 3.</i>	46
<i>Figura 35: Subescena de imagen Landsat 9-53 del 10 de Enero de 2006 combinación RGB 4-5-3 Hacienda Monterrey Zambrano (Bolívar). Fuente: Landsat y Pizano S.A. 2007</i>	50
<i>Figura 36: Centro de bloque de Muestreo Forestal.</i>	51
<i>Figura 37: Placas de Aluminio en las estacas para la marcación de los Bloques de Muestreo.</i>	52
<i>Figura 38: Placas de Aluminio para la marcación de los árboles más cercanos al centro del Bloque. Fuente: Tesis</i>	52
<i>Figura 39: Forcípula para la medición del Diámetro a la altura de pecho.</i>	53
<i>Figura 40: Vertex para la medición digital de alturas.</i>	53
<i>Figura 41: Prisma para lectura láser del Vertex.</i>	53

Figura 42: Comportamiento en porcentaje de cinco bandas de Landsat de la Ceiba roja con base a 127 puntos muestreados en época seca	62
Figura 43: Firmas espectrales reales de Lansat adaptado Chuvieco 2002.	62
Figura 44: Comparación de componente principal 1 y 2 de las bandas.	68
Figura 45: Comparación de componente principal 1 y 3 de las bandas.	69
Figura 46: Comparación de componente principal 1 y 2 de dasometría y bandas	71
Figura 47: Comparación de componente principal 1 y 3 de dasometría y bandas	72
Figura 48: Plano factorial de variables de clasificación de la matriz de carga factorial.	73
Figura 49: Distribución de la normalidad de los tres grupos	80
Figura 50: Funciones canónicas de variables espectrales y dasométricas	82
Figura 51: Análisis canónico Discriminante	83
Figura 52: Clasificación de Grupos de los Componentes Principales 1 y 2 en suelos dasometría, espectral y precipitación	86
Figura 53: Clasificación de Grupos de los Componentes Principales 1 y 3 en suelos, dasometría, espectral y precipitación	87
Figura 54: Clasificación de Grupos de los Componentes Principales 1 y 4 en suelos, dasometría, espectral y precipitación	87
Figura 55: Clasificación de Grupos de los Componentes Principales 1 y 5 en suelos, dasometría, espectral y precipitación	88
Figura 56: Clasificación de Grupos por Factor Principal 1 y 2 en suelos, dasometría, espectral y precipitación	91
Figura 57: Clasificación de Grupos por Factor Principal 1 y 3 en suelos, dasometría, espectral y precipitación	91
Figura 58: Clasificación de Grupos por Factor Principal 1 y 4 en suelos, dasometría, espectral y precipitación	92
Figura 59: Funciones canónicas 1 y 2 en suelos, dasometría, espectral y precipitación	99
Figura 60: Valores de funciones canónicas 1 y 2 en suelos, dasometría, espectral y precipitación	100
Figura 61: Variogramas de Volumen total, sodio, conductividad hidráulica y CICE en Andaluz 17	103
Figura 62: Variogramas de Volumen total (kriging y cokriging) en Andaluz 17	105
Figura 63: Variogramas de Volumen total con precipitación y cruzado (cokriging) en Andaluz 17	105
Figura 64: Diez variogramas de Volumen total (cokriging) en Andaluz 17	107
Figura 65: Variabilidad espacial (Kriging) de Volumen total en Andaluz 17	108
Figura 66: Variabilidad espacial (Cokriging) de Volumen total en Andaluz 17, con bandas	109
Figura 67: Variabilidad espacial (Cokriging) de Volumen total en Andaluz 17, con precipitación	110
Figura 68: Variabilidad espacial (Cokriging) de Volumen total en Andaluz 17, con bandas y precipitación	111
Figura 69: Variogramas de sodio (kriging y cokriging) en Andaluz 17	112
Figura 70: Variabilidad espacial (Kriging) de sodio en Andaluz 17.	113
Figura 71: Variabilidad espacial (Cokriging) de sodio en Andaluz 17, con bandas	114
Figura 72: Variabilidad espacial (Cokriging) de sodio en Andaluz 17, con precipitación.	115
Figura 73: Variabilidad espacial (Cokriging) de sodio en Andaluz 17, con bandas y precipitación	116
Figura 74: Variogramas de conductividad hidráulica (kriging y cokriging) en Andaluz 17.	117
Figura 75: Variabilidad espacial (Kriging) de la conductividad hidráulica en Andaluz 17.	118
Figura 76: Variabilidad espacial (Cokriging) de la conductividad hidráulica en Andaluz 17, con bandas.	119
Figura 77: Variabilidad espacial (Cokriging) de la conductividad hidráulica en Andaluz 17, con precipitación	120
Figura 78: Variabilidad espacial (Cokriging) de la conductividad hidráulica en Andaluz 17, con bandas y precipitación	121
Figura 79: Variogramas de CICE (kriging y cokriging) en Andaluz 17.	122
Figura 80: Variabilidad espacial (Kriging) del CICE en Andaluz 17.	123
Figura 81: Variabilidad espacial (Cokriging) del CICE en Andaluz 17, con bandas	124
Figura 82: Variabilidad espacial (Cokriging) del CICE en Andaluz 17, con precipitación	125
Figura 83: Variabilidad espacial (Cokriging) del CICE en Andaluz 17, con bandas y precipitación	126

LISTADO DE TABLAS

<i>Tabla 1: Tasas de plantación anual de nuevas plantaciones y superficies de plantación por regiones y grupos de especies, en el año 2000. FAO, 2001.</i>	8
<i>Tabla 2: Superficies regionales de plantación por finalidad y pertenencia, 000 ha, en el año 2000. FAO, 2001.</i>	8
<i>Tabla 3: Principales empresas reforestadoras en Colombia entre 1990 y 2007. Ideam 2009</i>	9
<i>Tabla 4: Principales especies plantadas por empresas reforestadoras en Colombia entre 1990 y 2007. Ideam 2009</i>	10
<i>Tabla 5: Leyenda del mapa de suelos de la hacienda Monterrey</i>	24
<i>Tabla 6: Porcentajes de unidades de suelos donde se encuentra la Ceiba roja en la Hacienda Monterrey</i>	26
<i>Tabla 7: Característica de los lotes seleccionados plantados con Ceiba roja. Pizano 2007</i>	33
<i>Tabla 8: Propiedades de suelos obtenidas. Anexo 4. Laboratorio de suelos de la Universidad Distrital, 2006</i>	55
<i>Tabla 9. Estadísticas descriptivas de las variables estudiadas (muestra grande), Zambrano (Bolívar).</i>	58
<i>Tabla 10. Estadísticas descriptivas de las variables estudiadas (muestra pequeña), Zambrano (Bolívar).</i>	60
<i>Tabla 11. Correlaciones significativas entre las variables dasométricas, precipitación y bandas e índices (muestra grande).</i>	61
<i>Tabla 12. Correlaciones significativas de propiedades del suelo, dasometría, precipitación, bandas e índices. En amarillo significancia al 0,01, naranja 0,05 y el resto al 0,10</i>	66
<i>Tabla 13. Valores propios de la matriz de correlación para las bandas 1, 2, 3, 4 y 5.</i>	67
<i>Tabla 14. Vectores propios y proporción de la variación explicada-ACP para los componentes principales.</i>	67
<i>Tabla 15. Valores propios de la matriz de correlación para las variables dasométricas y espectrales.</i>	70
<i>Tabla 16. Vectores propios y proporción de la variación explicada-ACP para los componentes principales.</i>	70
<i>Tabla 17. Valores propios y proporción explicada por el análisis de factor principal.</i>	72
<i>Tabla 18. Vectores propios de la matriz de correlación del análisis de factor principal.</i>	73
<i>Tabla 19. Muestra de Kaiser's (MSA) y comunalidad final y preliminar.</i>	74
<i>Tabla 20. Definición y redefinición de los grupos por validación cruzada usando la Función Lineal Discriminante y la Distancia Cuadrada Generalizada de Pairwise.</i>	77
<i>Tabla 21. Resumen de Clasificación por Resustitución usando la Función Lineal Discriminante.</i>	78
<i>Tabla 22. Resumen de Clasificación por Validación Cruzada usando la Función Lineal Discriminante.</i>	78
<i>Tabla 23. Distancia Cuadrada Generalizada.</i>	78
<i>Tabla 24. Función Lineal Discriminante.</i>	79
<i>Tabla 25. Función Lineal Discriminante para los grupos A, B y C</i>	79
<i>Tabla 26. Resumen de las características de las variables Dasométricas y Espectrales.</i>	81
<i>Tabla 27. Prueba de hipótesis nula. Probabilidad aproximada.</i>	81
<i>Tabla 28. Valores propios de las funciones canónicas.</i>	82
<i>Tabla 29. Valores propios y proporción de la variación explicada-ACP.</i>	84
<i>Tabla 30. Vectores propios y proporción de la variación explicada-ACP.</i>	85
<i>Tabla 31. Valores propios y proporción de la variación explicada-AFP.</i>	89
<i>Tabla 32. Vectores propios y proporción de la variación explicada-AFP.</i>	90
<i>Tabla 33. Comunalidad Preliminar.</i>	92
<i>Tabla 34. Comunalidad Final.</i>	92
<i>Tabla 35. Matriz de Correlación Residual en la Diagonal para suelos, dasometría, espectral y precipitación</i>	94
<i>Tabla 36. Definición y redefinición de los grupos por validación cruzada usando la Función Lineal Discriminante y la Distancia Cuadrada Generalizada de Pairwise.</i>	95
<i>Tabla 37. Resumen de Clasificación por Resustitución usando la Función Lineal Discriminante.</i>	96
<i>Tabla 38. Resumen de Clasificación por Validación Cruzada usando la Función Lineal Discriminante.</i>	96
<i>Tabla 39. Distancia Cuadrada Generalizada en suelos.</i>	96

Tabla 40. Función Lineal Discriminante con suelos.	97
Tabla 41. Función Lineal Discriminante para los grupos A, B y C con suelos.	98
Tabla 42. Prueba de hipótesis nula. Probabilidad aproximada.	98
Tabla 43. Valores propios de las funciones canónicas.	99
Tabla 44. Distancia cuadrada generalizada.	99
Tabla 45. Coeficientes canónicos en bruto	100
Tabla 46. Parámetros de variogramas de kriging para volumen total, sodio, conductividad hidráulica y CICE	103
Tabla 47. Parámetros de variogramas de kriging y cokriging para el volumen total	104
Tabla 48. Parámetros de variogramas de kriging y cokriging para el sodio Na	111
Tabla 49. Parámetros de variogramas de kriging y cokriging para la conductividad hidráulica	116
Tabla 50. Parámetros de variogramas de kriging y cokriging para la capacidad de intercambio catiónico efectiva CICE	121

1. INTRODUCCIÓN

La alta competitividad que exigen los mercados de maderas y en especial aquellos provenientes de recursos naturales, crea la necesidad de tener modelos tecnológicos cada vez más sofisticados, que permitan garantizar mayor competitividad y sostenibilidad. El desarrollo de las plantaciones industriales en Colombia, han tenido avances importantes, sin embargo el número reducido de empresas y su baja cobertura de producción, no le permiten competir mundialmente. Es por esto, que aportes técnico científicos dirigidos a mejorar la productividad de las plantaciones de especies de alto valor como la Ceiba roja, empiezan a dar respuestas a las grandes necesidades de información y a tener acogida por parte de empresas como Pizano S.A. Una estrategia como es conocer la variabilidad del crecimiento de las plantaciones de Ceiba relacionada con las propiedades de los suelos y de esta manera aplicar técnicas silviculturales, con anterioridad, en la plantación misma y en su mantenimiento, de manera precisa, podrá garantizar una producción más eficiente y mejores predicciones de la misma. Para esto se requiere conocer de manera precisa las propiedades de los suelos, su variabilidad espacial y las condiciones climáticas, necesitando un número considerable de muestras de suelo tanto de tipo químico como de físico. Algunas de éstas de alta dificultad, experticia y costo. Por lo anterior, técnicas como la respuesta espectral de algunos sensores remotos de bajo costo permitieron obtener información con precisión espacial suficiente para el tamaño de las plantaciones de Ceiba roja de la compañía (4.567 hectáreas). De otra parte con ayuda de técnicas estadísticas y geoestadísticas, se empezó a identificar las relaciones entre la variabilidad de la producción de Ceiba roja y de algunas propiedades del suelo, apoyados en la respuesta espectral y la precipitación con el fin de hacer más viable la obtención de información estratégica, con orientación hacia una silvicultura de precisión.

La empresa privada colombiana de plantaciones forestales es reciente, y aún se encuentra en la fase de generación de modelos que le permitan efectuar predicciones precisas acerca de la productividad, el rendimiento y el crecimiento de las especies especialmente del Bosque Seco Tropical, con el fin de superar el nivel de incertidumbre acerca de la disponibilidad futura de la materia prima a partir de plantaciones forestales. Por otro lado, en la medida que se realicen y se desarrollen investigaciones en esta línea, el sector forestal nacional se fortalecerá, puesto que ante las cada vez más limitadas posibilidades de obtener materias primas en los bosques naturales, resulta estratégico fortalecer el desarrollo de nuevas y mejores plantaciones forestales, a partir de ayudas tecnológicas desarrolladas en investigaciones como la presente. Este desarrollo comprende el afianzamiento y el afinamiento de modelos tecnológicos, que requieren valores confiables de producción, que consideren las variabilidades espaciales que resultan de las condiciones biofísicas y las prácticas silviculturales.

La geomática integra componentes como los sistemas globales de posicionamiento -GPS, la estadística espacial, el análisis y modelamiento espacial, la cartografía digital y simulación (*Anexo 1*), que pueden ser utilizados para el manejo de información espacial, referente a estas plantaciones, pudiendo entonces mejorar la predicción de la producción de las plantaciones forestales.

De acuerdo a Yebra y Chuvieco (2008), el uso de modelos de simulación de la reflectividad (MSR) para la estimación de parámetros biofísicos mediante imágenes de satélite se ha desarrollado notablemente en los últimos años, gracias a su poder de generalización. No obstante, resultan complejos de parametrizar, lo que dificulta su uso operativo. En su trabajo se presentan los principales problemas que plantea el uso de los MSR en teledetección, resaltando la importancia de considerar relaciones ecofisiológicas entre las variables de entrada de estos modelos. Lo que indica que la predicción confiable de los volúmenes de producción forestal proyectada, hasta ahora se ha asociado principalmente a las propiedades del suelo las cuales presentan una alta variabilidad espacial, típica del trópico, de acuerdo a lo manejado en las plantaciones de Pizano S.A. y Monterrey Forestal. Estas plantaciones forestales en mención se manejan casi exclusivamente con fertilización, y de manera general por lote. Lo anterior conduce a que siguen existiendo diferencias no explicadas entre los volúmenes proyectados y aprovechados, en consecuencia las predicciones están basados en índices de sitio determinados para parcelas, rodales o predios, donde no se tiene en cuenta la distribución espacial de las variables edáficas dentro de estas divisiones. Adicionalmente las propiedades físicas de los suelos, son las que normalmente por su costo y dificultad de medirse en campo, poco se utilizan, para los estudios de variabilidad espacial de producción forestal.

Por tanto, las propiedades físicas y químicas del suelo, en su conjunto podrían mejorar la predicción de la producción de Ceiba roja y en general de las plantaciones forestales específicamente del bosque seco tropical, que a la base del problema de obtener información de variabilidad espacial de la producción forestal de manera costo efectiva, a partir de propiedades físicas de los suelos, tales como textura (arcillas y limos), infiltración, conductividad hidráulica, densidad aparente húmeda y porosidad (densidad aparente seca y real), entre otras, que regulan el suministro de agua y nutrientes a los árboles, factor limitante de la productividad en zonas secas, como es el caso de estudio, influyen notablemente en la producción, así como las propiedades químicas del suelo, más estudiadas en éstas plantaciones hasta ahora. Por tanto, incluir estas variables en los modelos de predicción, permitirá tener prácticas mucho más precisas de manejo, asociadas al suelo, para que se incluyan al modelo tecnológico de producción de la Ceiba roja en bosque seco tropical.

Esta investigación, parte de los resultados de hallazgos de ejercicios previos, como: 1) De acuerdo a Chirici et al (2008), la estimación de los bosques utilizando variables espectrales y otros datos auxiliares en general parece ser más fácil en las zonas con un simple patrón del paisaje forestal: un número limitado de especies de árboles y de bosques mixtos organizados espacialmente en grandes parches homogéneos.; 2) un proceso híbrido generalizado en un modelo empírico para predecir el crecimiento de las plantaciones forestales en Australia, con datos de inventario forestal, índice de sitio e imágenes Landsat (Waterworth et al, 2007); 3) de acuerdo con Paruelo (2008), los sensores remotos han sido valiosos auxiliares de los ecólogos en las últimas décadas. El uso más frecuente de estas herramientas ha sido la caracterización estructural del paisaje. En general, se ha recurrido a la interpretación visual de imágenes y la clasificación digital. En estos casos, un atributo de la superficie terrestre (por ej. un tipo dado de cobertura) se relaciona con un comportamiento espectral determinado (valores de reflectancia o emisión de la superficie terrestre en distintas longitudes de onda) sin conocer los mecanismos del vínculo. Si bien este uso de la teledetección ha permitido

avances importantes en Ecología, parece estar por debajo de su potencial. Entre las diferentes alternativas que permitirían hacer un uso más eficiente de la información generada por sensores a bordo de satélites, donde en su escrito se pone énfasis en la descripción de procesos biofísicos a nivel de ecosistema a partir de la información registrada por los sensores. Para ello, se discute el vínculo entre los datos registrados por los sensores a bordo de satélites de observación terrestre y dos procesos funcionales del ecosistema: la productividad primaria y la evapotranspiración.

Por lo anterior, la creación de un modelo de predicción de la producción forestal con turnos de 20 a 25 años, es una necesidad o prioridad alta, en empresas industriales forestales colombianas, como es el caso de Pizano S.A. con su filial Monterrey Forestal Ltda., la cual tiene más de 16.000 hectáreas de plantaciones forestales propias más otras 6.000 en asocio con comunidades o empresas (cifra en crecimiento actualmente), todas éstas ubicadas en la formación Bosque Seco Tropical, ecosistema dominante en la llanura del Caribe Colombiano. Una de las especie allí plantada es la Ceiba roja *Pachira quinata*, con 4.566 hectáreas, objeto de esta investigación. Lo que ha llevado a una necesidad de obtener un modelo apoyado en sensores remotos y clima que se orienta hacia la variabilidad espacial de datos dasométricos y edáficos con un especial énfasis en propiedades físicas de suelos. Los cálculos y modelos dasométricos Pizano S.A. con su filial Monterrey Forestal Ltda, hasta ahora los tiene bien desarrollados a nivel de lote, sin tener en cuenta la variabilidad espacial que se presenta en cada uno, ni su relación con el suelo.

En consecuencia, una investigación dirigida a los aspectos relacionados con distribución o variabilidad espacial, donde incluya aspectos de propiedades físicas y químicas de los suelos, con la estrategia de mejorar la muestra (mayor número de puntos) a partir de las respuesta espectral de las bandas electromagnéticas (imagen Landsat), la precipitación y su correspondencia con mediciones dasométricas que reflejen la producción obtenida de una especie de gran valor como la Ceiba roja, en el bosque seco tropical, resulta una propuesta interesante para el sector forestal industrial del país.

Por tanto, como los modelos de predicción de la producción forestal en búsqueda de su mejoramiento Pizano S.A. con su filial Monterrey Forestal Ltda, orientan su investigación hacia una variabilidad espacial cada vez más detalladas de variables forestales, edáficas y climáticas, investigaciones que hasta en la actualidad no se han realizado en ninguna otra plantación del sector forestal industrial del país.

Finalmente ha sido tal la necesidad de Pizano S.A. con su filial Monterrey Forestal Ltda que los resultados parciales de esta metodología sin alcanzar la totalidad de la investigación, a la fecha ya se están aplicando análisis de distribución espacial en plantaciones de *Gmelina arborea* de turno menor (6 a 8 años) en varias plantaciones propias y otras en asocio con particulares de la comunidad, permitiendo tener mejor criterio en la práctica de manejo, permitiéndole realizar una sectorización espacial más detallada, y por tanto, definir una localización más precisa de cada actividad silvicultural. También ha permitido una aplicación de modelos dasométricos por sectores de tal manera que se han obtenido datos de predicción más confiables de la producción futura.

2. OBJETIVOS

GENERAL

Desarrollar un modelo predictivo de la producción y las variables asociadas de las plantaciones de Ceiba roja en la Hacienda Monterrey en Zambrano (Bolívar), con el fin de mejorar su manejo y producción.

ESPECÍFICOS

Identificar las variables que mayor influencia tienen para predecir la producción y las variables asociadas de las plantaciones de Ceiba roja en la Hacienda Monterrey en Zambrano (Bolívar).

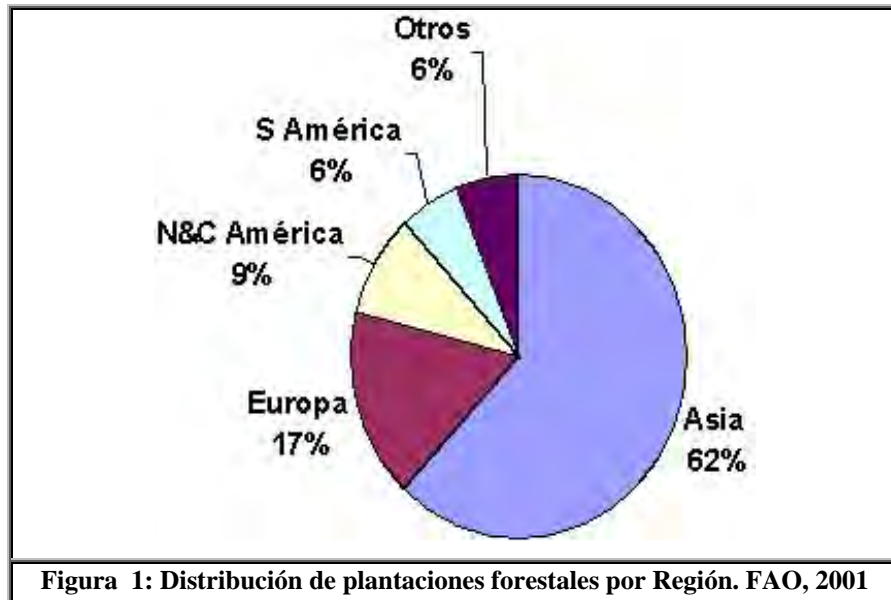
Integración y análisis de las variables más significativas en un modelo empírico para predecir la producción de la ceiba roja, con el fin de precisar el manejo silvicultural en la hacienda Monterrey en Zambrano (Bolívar).

Establecer la variabilidad espacial de propiedades dasométricas y edáficas con apoyo de variables complementarias de las plantaciones de Ceiba roja en la Hacienda Monterrey en Zambrano (Bolívar).

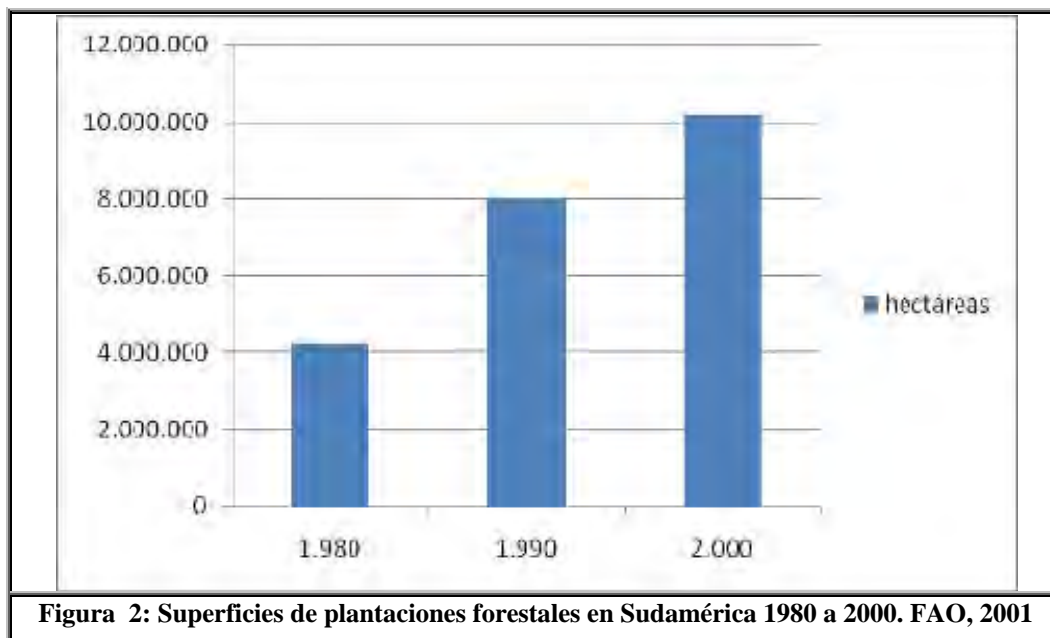
3. MARCO TEÓRICO

3.1. PLANTACIONES FORESTALES INDUSTRIALES

El desarrollo del Programa de Evaluación de los Recursos Forestales Mundiales ERF 2000, contiene información actualizada, referida al año 2000 sobre los recursos forestales de cada región del mundo, incluyendo la descripción de la geografía, el escenario ecológico, el estado del bosque en cuanto a cobertura, volumen y biomasa, ordenación forestal, estado de protección en cuanto a áreas legalmente protegidas, y evaluación de las tendencias en el cambio de la cobertura forestal (FAO, 2001). En la *Figura 1*, se observa la distribución de plantaciones forestales por región o continente donde sobresale Asia con 62% y donde Suramérica representa el 6%.



En la *Figura 2*, se presenta el aumento de las plantaciones en Sudamérica de 1980 a 2000, mostrando un aumento constante aunque no proporcional para todos los países.



Los diez países más importantes de acuerdo con la superficie total de plantaciones son: China, 24%; India, 17%; Rusia, 9%; EUA, 9%; Japón, 6%; Indonesia, 5%; Brasil, 3%; Tailandia, 3%; Ucrania, 2% e Irán, 1% (FAO, 2001). La tasa mundial de nuevas plantaciones se estima en 5 millones de ha/año, con Asia (79%) y Sudamérica (11%) que suman en conjunto el 90% (FAO, 2001).

Históricamente, la plantación de árboles se centró en aquellas especies cuyos frutos contienen valor nutritivo (olivos, higueras, palma datilífera, frutales tropicales, manzanos, etc.). Otros árboles han sido cultivados por el valor de sus hojas y frutos como forraje para los animales domésticos, por las propiedades medicinales de algunos de sus órganos o por su valor estético o religioso. Aunque la teca y los eucaliptos (de origen australiano) comenzaron a ser plantados en Asia, África y América Latina en el siglo XIX, las plantaciones centradas en la producción de madera industrial constituyen un fenómeno del siglo XX, en general resultado de la previa sobreexplotación y agotamiento de madera de los bosques nativos. Tales plantaciones se están expandiendo más rápidamente en el Sur. Entre 1965 y 1980 el área ocupada por plantaciones se triplicó en los países tropicales (Evans 1997) y entre 1980 y 1990 se incrementó nuevamente entre dos y tres veces (Pandey y Wheeler, 2001, Evans 1997).

Si bien las plantaciones son promovidas por una amplia variedad de razones (para detener la desertificación, para abastecer a la industria del aserrío, para proporcionar leña, para diversificar la producción agrícola), los árboles más frecuentemente plantados son las especies de rápido crecimiento, aptas para la industria de la pulpa y el papel y para productos de madera de baja calidad. En 1980, se estimaba que las plantaciones tropicales estaban compuestas en más de un 70% por eucaliptos y pinos (Evans 1997) y ese porcentaje es casi seguramente hoy mayor aún.

La *Tabla 1*, muestra la tasa de establecimiento anual de plantaciones nuevas y superficies de por continentes (regiones) y grupos de especies, donde se resaltan que 599.000 de especies frondosas se encuentran en Sudamérica, las cuales incluyen las plantaciones de Ceiba roja, materia del presente estudio. La *Tabla 2*, presenta las superficies regionales (continentales) de plantaciones por finalidad y pertenencia, indica que 3.557.000 hectáreas se han plantado con la finalidad industrial en Sudamérica.

De acuerdo con Rodríguez (1998), el sector forestal en Colombia normalmente ha representado únicamente entre el 0.4% y el 0.5% del PIB, a través de la participación de dos sectores, el silvícola y el manufacturero. El primero incluye la producción derivada del aprovechamiento de bosques (naturales y plantados), la reforestación y los productos como látex, gomas, resinas, cortezas, madera en bruto y leña. El sector manufacturero abarca la transformación de maderas, los muebles de madera, y el conjunto industrial de la pulpa, el papel y el cartón. Las empresas industriales más representativas del sector forestal participan con el 0.15% del PIB, representando entonces el 33.3% del aporte total del sector forestal a la economía nacional.

En Colombia los procesos de reforestación se iniciaron, a muy baja escala, en la década del 40; la actividad tuvo su mayor auge en los años 70 y 80 para luego decaer al no responder a las expectativas de los productores. En Colombia se han reforestado cerca de 270.000 hectáreas, (Rodríguez, 1998).

Región	Superficie total (000 ha)	Tasa anual de plantaciones 000 ha/año	Superficies total de plantación (000 ha.) por grupos de especies							
			Aca-cia	Eucalyptus	Hevea	Tecto-na	Otras frondosas	Pinus	Otras coníferas	Sin determinar
África	8.036	194	345	1.799	573	207	902	1.648	578	1.985
Asia	115.847	3.500	7.964	10.994	9.058	5.409	31.556	15.532	19.968	15.365
Europa	32.015	5	-	-	-	-	15	-	-	32.000
N&C América	17.533	234	-	198	52	76	383	15.440	88	1.297
Oceanía	3.201	50	8	33	20	7	101	73	10	2.948
Sudamérica	10.455	509	-	4.836	183	18	599	4.699	98	23
Total mundial	187.086	4.493	8.317	17.860	9.885	5.716	33.556	37.391	20.743	53.618

Tabla 1: Tasas de plantación anual de nuevas plantaciones y superficies de plantación por regiones y grupos de especies, en el año 2000. FAO, 2001.

Región	Superficie total	Finalidad industrial (000) ha.					Finalidad no industrial (000) ha.					Finalidad no específica
		Pública	Privada	Otras	No específica	Sub-Total	Pública	Privada	Otras	No específica	Sub-Total	
África	8.036	1.770	1.161	51	410	3.392	2.035	297	611	330	3.273	1.371
Asia	115.847	25.798	5.973	27.032	-	58.803	17.177	17.268	9.145	72	43.662	13.381
Europa	32.015	-	-	-	569	569	9	6	-	-	15	31.431
N&C América	17.533	1.446	15.172	118	39	16.775	362	58	16	35	471	287
Oceanía	3.201	151	14	-	24	189	2	3	-	19	24	2,987
Sudamérica	10.455	1.061	3.557	-	4.827	9.445	251	528	-	225	1.004	6
Total mundial	187.086	30.226	25.876	27.202	5.871	89.175	19.836	18.161	9.772	680	48.449	49.463

Tabla 2: Superficies regionales de plantación por finalidad y pertenencia, 000 ha, en el año 2000. FAO, 2001.

Entre 1975 y 2007, en Colombia el área total plantada registrada fue de 303.476 ha, los años con mayor reforestación fueron el 2004, el 2007 y el 1999 con 25.141 ha, 20.560 ha y 20.131 ha respectivamente. Antioquia representa 80.057 ha, seguido de Córdoba con 27.987 ha (Ruiz y León, 2009).

Entre 1995 y 2007, en el país se han plantado 184.637 ha, donde Antioquia tiene 49.026 ha, de las cuales 126.565 has, se han plantado por medio del Certificado de Incentivo Forestal-CIF, donde Antioquia, Córdoba y Bolívar, son los que tienen mayor participación con 35.317 ha, 24.834 ha y 9.341 ha, respectivamente. Las especies más plantadas han sido Pino patula, Robles, Pino caribeño, Teca, Flormorado, Eucalyptos, *Acacia Mangium*, *Gmelina arborea* y Cedros, con 10.774 ha, 9.535 ha, 8.229 ha, 7.528 ha, 7.339 ha, 7.221 ha, 6.926 ha, 5.471 ha y 4.812 ha, respectivamente. Además con el programa KFW, entre 1998 y 2008, se sembraron 25.623 ha, donde los departamentos de Santander y Caldas tienen cerca del 60%, plantaciones con dos especies que representan casi el 60% y son el Nogal cafetero y el Pino patula (Ruiz y León, 2009).

De acuerdo con la *Tabla 3*, Las empresas que presentan una mayor superficie plantada son Reforestadora Andina y PIZANO S.A con más de 13.000 Has, sin embargo considerando que se trata de un periodo de 17 años, aparentemente la cifra reportada no cumple las expectativas o cifras estimadas, por tanto es necesario aclarar que la empresa Smurfit Cartón de Colombia es dueña de la empresa Reforestadora Andina, lo que sumaría en conjunto más de 25.000 ha y la empresa Pizano S.A, es propietaria de la empresa Monterrey Forestal LTDA, sumando más de 21.000 ha, con lo que se aclara un poco la cifras, obteniendo un consolidado superior a las 20.000 has reportadas para estas dos empresas líderes en el país (Ruiz y León, 2009).

EMPRESA	SUPERFICIE (Has)
REFORESTADORA ANDINA	23.511
PIZANO S.A.	13.668
MONTERREY FORESTAL LTDA.	7.635
INDUSTRIAS FORESTALES DOÑA MARÍA S.A.	4.486
KANGUROID LTDA	2.700
REFORESTADORA SAN SEBASTIÁN S.A.	2.675
CIPRESES DE COLOMBIA S.A.	2.353
PULPAPEL	1.936
SMURFIT CARTON DE COLOMBIA	1.546
REFOCOSTA S.A.	1.536

Tabla 3: Principales empresas reforestadoras en Colombia entre 1990 y 2007. Ideam 2009

En la *Tabla 4*, se muestran las especies más plantadas por las empresas reforestadoras del país, en donde se resalta la especie *Pachira quinata* (Ceiba roja) con 8.628 ha, objeto del presente estudio.

ESPECIES	SUPERFICIE (Has)
<i>Acacia mangium</i>	3.008
<i>Cupressus lusitánica</i>	2.710
<i>Eucalyptus grandis</i>	6.920
<i>Eucalyptus sp.</i>	8.903
<i>Eucalyptus tereticornis</i>	2.008
<i>Gmelina arbórea</i>	13.498
<i>Pachira quinata</i>	8.628
<i>Pinus kesya</i>	2.132
<i>Pinus patula</i>	11.481
<i>Pinus tecunumani</i>	4.609

Tabla 4: Principales especies plantadas por empresas reforestadoras en Colombia entre 1990 y 2007. Ideam 2009

Pizano S.A. es la empresa Colombiana líder en la transformación, fabricación y comercialización de productos forestales desde 1935. Como la mayoría de las empresas del sector, Pizano S.A. dio inicio a su participación en el campo de la reforestación a nivel experimental en 1973, intentando durante varios años establecer plantaciones en la Costa Atlántica con *Spondias mombin*, una especie nativa, muy atractiva para la industria forestal pero de la cual no se tenía ninguna experiencia técnica sobre su producción en plantaciones. No obstante la ausencia de resultados positivos, la experiencia adquirida permitió que en 1977 la compañía comenzara el desarrollo de su segundo proyecto de reforestación, con el cual plantó en el término de 10 años 700 hectáreas de bosques con *Pinus caribea*, conífera tropical extensamente cultivada y de la cual existían suficientes conocimientos para abordar su producción (Pizano, 2009).

Con base en la cultura forestal adquirida en dichos proyectos de reforestación, en 1980 se dio inicio a un nuevo proyecto para el manejo de bosques comerciales, nuevamente en la Costa Atlántica. Se creó entonces Monterrey Forestal, en el municipio de Zambrano (Bolívar) sobre un globo de terreno de cerca de 16.000 hectáreas de extensión. Dados los conocimientos acumulados se trabajó inicialmente con *Pinus caribea*, aunque esta especie no logró ser adaptada a las condiciones locales (Pizano, 2009; Rodríguez, 1998).

Hasta ahora se han establecido 10.000 hectáreas de plantaciones en los municipios de Zambrano y Córdoba (Bolívar), así como 4.000 hectáreas más en el municipio de El Dificil de Ariguani en el departamento del Magdalena. Las plantaciones establecidas en la formación Bosque Seco Tropical, que se caracteriza por poseer condiciones ecológicas que en sí mismas limitan el desarrollo de plantaciones forestales comerciales, principalmente como déficit de agua en casi todo el año. Pizano las ha superado a través del mejoramiento genético y de la implementación de métodos de producción, siembra y cultivo que permiten una mejor adaptación y por lo tanto una mejor respuesta de los árboles a las condiciones del clima y suelo locales (Rodríguez, 1998).

La proyección de la producción de madera de Ceiba Roja (*Pachira quinata*) para el periodo 2006 a 2017, se estima en 71.651 m³ de madera durante los raleos o cosechas intermedias y 306.850 m³ de madera de corta final con una tasa anual de cosecha, a partir del año 2013 de 61.361 m³/año. Por otra parte, durante el periodo 2006 a 2017 se producirán en total 639.539 m³ de madera de *Gmelina arborea* de los cuales 307.364 m³ se cosecharán por entresacas y 332.275 m³ en tala final. La tasa media anual de cosecha

de madera durante los raleos intermedios se estima en 25.600 m³, mientras que la corta final en las plantaciones a turno genera en término medio 36.919 m³/año (Pizano, 2009).

A partir del análisis del crecimiento, el rendimiento y la productividad de las plantaciones de Ceiba roja se ha establecido que, bajo las condiciones locales, el turno medio toma 25 años. La proyección de producción por hectárea, indica que al turno final se cosechan, en promedio, 120 metros cúbicos y que durante los raleos se extraen, también en promedio, 50 metros cúbicos de madera. Los criterios del modelo de producción son: Índice de Densidad del Rodal (IDR): 460, Turno: 25 años, Índice de Sitio: 13,58m, Volumen de raleo: 10 a 15 m³ / ha, Numero inicial de árboles, N: 1111 árboles / ha (Pizano, 2009).

En 12 años se ha establecido el turno de producción de Melina, durante los cuales se producen entre 150 y 220 metros cúbicos de madera por hectárea, sin contar la corteza. Este volumen representa una productividad media anual de 15 metros cúbicos por hectárea. El modelo de manejo silvicultural de la Melina permite que cerca del 30% del volumen producido en cada rodal se extraiga durante las entresacas, mientras que el restante 70% corresponde a la cosecha final (Pizano, 2009).

3.2. CARACTERÍSTICAS DE LA CEIBA ROJA *Pachira quinata*

Es un árbol de 20 a 40 m de altura y de 50 a 200 cm de diámetro. Copa redondeada y con follaje disperso. El tronco es fuertemente armado con espinas cónicas y con raíces tablares bien desarrolladas en la base. Las espinas tienen la punta aguda y arqueada. En plantas juveniles el tronco se bifurca en tres ramas principales y ascendentes. Corteza exterior grisácea o marrón. Hojas digitadas y alternas, con 5 a 7 folíolos. Folíolos de 8 a 14 cm de largo y de 3 a 8 cm de ancho, oblanceolados a obovados, con ápice acuminado, bordes enteros o dentados y base aguda. Estípulas deciduas. Pecíolos de 5 a 15 cm de largo y ligeramente acanalados en la parte superior. Flores blancas y con muchos estambres. Frutos en cápsulas oblongas de 5 a 8 cm de largo, verdes, tornándose amarillentos y dehiscentes en cinco valvas al madurar. Semillas envueltas en una capa de pelos algodonosos (Pérez, 2007).

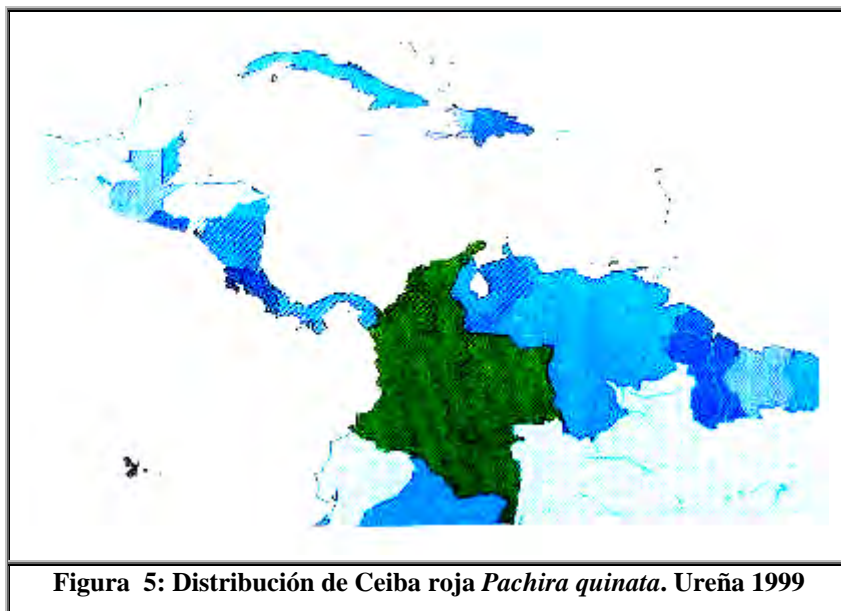
La Ceiba Roja *Pachira quinata* (Figura 3), es una especie caducifolia durante el periodo de verano, comprendidos entre los meses de Diciembre y Abril en el norte de Colombia. En su área de distribución en el país alcanza hasta 32 m en altura y 2,4 m de diámetro a la altura del pecho (d.a.p.) con fuste recto, corteza espinosa y presencia de bambas o aletones (Ureña, H. 1999).



El rendimiento de *Pachira quinata* al final del turno es de 127 metros cúbicos de madera por hectárea para la producción de Triplex. Igualmente cada hectárea de bosque plantado con esta especie produce durante los raleos es de 130 metros cúbicos de madera útil en la fabricación de tableros de partículas aglomeradas (*Figura 4*).



La distribución de la especie se observa en el *Figura 5*, muestra en achurado donde se localiza en Centro América en Nicaragua, Costa Rica y Panamá y en Sudamérica al norte de Colombia y oriente de Venezuela.



De acuerdo a Trujillo (2003), las condiciones de la plantación de Ceiba roja son:

- Altitud sugerida: 0 a 900 msnm.
- Clima: temperatura media de 25°C, lluvia anual entre 800 a 3000 mm. Aunque resiste períodos secos detiene su crecimiento, muy activo en la época de lluvias, es exigente en luz pero tolera sombra en su etapa juvenil.
- Suelos: prefiere suelos profundos, bien drenados, tolera sitios húmedos y temporalmente inundados, requiere de suelos arcillosos a franco arcillosos y soporta suelos ligeramente ácidos con tendencia a la neutralidad.

Como limitantes presenta que las semillas son atacadas por insectos barrenadores y el follaje por defoliadores, también unos hemípteros producen serios daños. Se presentan daños por descortezado de ardillas (Trujillo, 2003).

3.3. CARACTERÍSTICAS DE LOS SUELOS

El suelo es un cuerpo natural compuesto de sólidos (minerales y materia orgánica), líquidos y gases que ocurre en la superficie de la tierra, ocupa un espacio y se caracteriza por que tiene horizontes y capas que se distinguen del material inicial como resultado de las adiciones, pérdida, translocaciones y transformaciones de energía y materia ó por la habilidad de soportar plantas arraigadas en un ambiente natural (Soil Survey Staff, 2003).

El recurso suelo es, en sí mismo, un ejemplo de diversidad en el universo físico- biológico. Los suelos están relacionados al planeta Tierra como la cáscara está relacionada a la naranja; pero la corteza de la tierra es mucho menos uniforme que la piel de la fruta mencionada. De hecho los suelos aparecen en la dimensión espacial como un mosaico de formas y características. Son superficiales en las áreas abruptas de la montaña y profundos en los valles aluviales de los principales ríos del país; son arenosos en las zonas marginales del escudo de Guyana y en los sitios con influencia eólica de la Orinoquía o de la llanura Caribe y arcillosos en gran parte de las tierras situadas al este de la cordillera andina, en la zona costera y en tantos otros sitios de Colombia; aparecen

en paisajes desérticos como los de la Guajira o en franjas superhúmedas como las del Pacífico, el Magdalena medio o la selva amazónica (Cortés, 2004).

Con relación al uso del suelo generalmente, los suelos forestales son aquellos que presentan limitaciones para fines agrícolas, los requerimientos nutricionales son menores para los suelos forestales que para los suelos agrícolas, en los suelos forestales se desarrollan más fácilmente los horizontes superficiales y el humus debido al aporte de hojas, ramas, ramillas, frutos, entre otros, los suelos forestales no son alterados con la misma intensidad que los agrícolas y además permanecen mucho más tiempo bajo sombra, y la traslocación de nutrientes, gases y minerales es más efectiva en suelos forestales que en suelos agrícolas (Donoso 1997).

El suelo es un factor vital para la vida de un bosque (natural o plantado) porque es el medio natural donde crecen las plantas, a las cuales sirve de soporte y de almacén de agua y de nutrientes (Lutz y Chandler, 1959). Dentro de un mismo tipo de clima en un área dada, es el suelo el factor que controla la calidad del sitio (relaciona con la calidad de la madera, la resistencia a las enfermedades y al viento, el vigor reproductivo, entre otras), debido a que los suelos controlan el agua disponible para las plantas (Toro 1975).

Desde el punto de vista físico el suelo es una mezcla de material mineral, sustancias orgánicas, agua y aire. Estos componentes varían considerablemente en diferentes sitios lo cual determina las características físicas y químicas de los suelos. Durante mucho tiempo los especialistas en suelos dieron mucha importancia a las características químicas, sin embargo hoy se reconoce que un suelo con excelentes características físicas puede atenuar ciertas deficiencias en propiedades químicas; pero que los dos tipos de propiedades son igualmente importantes para obtener una buena productividad del suelo (Donoso 1997).

Entre los factores físicos del suelo más importantes, desde el punto de vista forestal, se encuentran: profundidad, textura, permeabilidad, grado de compactación, y capacidad de almacenar agua aprovechable para los árboles (Lutz y Chandler, 1959); sin embargo, es necesario notar que la información que suministre un estudio de suelos en relación con el manejo forestal de un área dada, sólo es válida dentro de los límites donde prevalecen ciertas condiciones de uniformidad climática (precipitación, temperatura, horas luz) (Toro 1975).

Para el silvicultor es necesario conocer tanto las propiedades químicas como las físicas del suelo con el objeto de ser capaz mantener y/o desarrollar una alta productividad del suelo sobre el cual crecen los bosques que él maneja. Algunas de estas propiedades se pueden mejorar o corregir, como la porosidad y la estructura del suelo; el manejo de otras es difícil o demasiado costosas, como la textura o la profundidad del suelo (Jackson y Raw, citados por Donoso 1997).

Tan importante resulta conocer las propiedades físicas del suelo, como su variabilidad espacial, lo cual se logra de a través del uso de herramientas geoestadísticas. La variabilidad espacial de los suelos generalmente se analiza con base en muestreos de grandes superficies y a escalas de paisaje (p ej los mapas de suelos generalmente se encuentran a escala 1:100.000 lo cual no aporta la información necesaria que requieren los planificadores de fincas o predios). Se ha demostrado que en muestreos pequeños (0.7 ha) se pueden contener hasta tres órdenes de suelo diferentes (Johnston, 1992; Walker et al, 1996), lo cual demuestra la gran heterogeneidad espacial del suelo.

Sánchez y Reyes (1998), encontraron que la densidad aparente es un buen indicador de la porosidad, grado de aireación y capacidad de infiltración del suelo; sin embargo la misma es afectada por el tipo de cobertura vegetal que soporta dicho suelo, con lo cual resulta importante determinar la variabilidad espacial tanto de la cobertura vegetal como de las propiedades físicas del suelo. Por su parte Andrade (1999) encontró que los suelos más porosos son más susceptibles a la erosión y a la pérdida de la capa orgánica por efecto de escurrimiento y lixiviación. Dado que la pérdida de suelo es un fenómeno dinámico que varía con ciertas condiciones del paisaje y de la estructura interna de los suelos es importante conocer dicha variabilidad espacial, o bien, la variabilidad de los factores que potencian dicho fenómeno.

Para el establecimiento de *Pachira quinata*, se han seleccionado los suelos franco-arcillosos y arcillosos de arcillas expansivas, bien drenados localizados sobre las terrazas aluviales, con pH entre 6 y 8, en pendientes entre 0 y 2% y alturas hasta 75 m.s.n.m. estas áreas son en su totalidad mecanizables (Ureña, 1999).

3.4. VARIABLES ESPACIALES DE LOS SUELOS Y SU RELACIÓN CON LA PRODUCTIVIDAD DE LAS PLANTACIONES FORESTALES

De acuerdo a Sales et al (2007), la muestra utilizada para generar un mapa de la biomasa, a lo largo con una medida de confiabilidad para cada estimación de la biomasa en cada lugar, utilizando kriging con la derivación o aporte externo a partir de la altitud, tipo de vegetación y la textura del suelo considerado como predictor de las variables de biomasa. La validación cruzada se realizó con las parcelas de muestreo para comparar el rendimiento de kriging contra una estimación de la biomasa simple utilizando la media muestral.

La producción de los cultivos fluctúa dentro de los lotes, como consecuencia de la variación que presentan diversos factores, entre ellos las propiedades del suelo (citado por Valbuena et al, 2008; Godwin & Miller, 2003; Taylor et al., 2003).

Resulta claro que para el caso de seleccionar áreas con el fin de establecer plantaciones forestales es importante determinar algunas propiedades físicas, como primera medida de selección y sobre estos sitios predeterminados, realizar los correspondientes estudios químicos. Lo anterior en consideración a que los segundos suelen ser más costosos que los primeros. Con relación a los factores físicos toman importancia, desde el punto de vista forestal, el grado de compactación del suelo, la capacidad de saturación de agua del mismo y la movilidad del agua dentro de dicho suelo, estas en conjunto es lo que se podría determinar cómo calidad física del suelo. (Baquero y Vargas, 2003; Cadena et al, 2002).

Sin embargo conocer estos factores implica conocer algunas propiedades físicas del suelo como: la humedad gravimétrica, la humedad volumétrica, la densidad aparente, densidad real, la humedad de saturación y la porosidad total. Del análisis conjunto de éstas se puede inferir la calidad física del suelo (Baquero y Vargas, 2003; Cadena et al, 2002).

Según Prasolova (2000), con el fin de evaluar el potencial de producción de plantas de una zona determinada, es claramente importante considerar la variabilidad espacial de

las propiedades del suelo en esa zona. Las propiedades físicas y químicas del suelo pueden variar espacialmente, debido a los cambios en el suelo del material parental y la situación del suelo en el paisaje. La evaluación de la variación espacial de las propiedades del suelo es un requisito previo para una mejor comprensión de la variación de crecimiento de los árboles individuales, especialmente a principios de la fase de plantación y para la predicción del crecimiento de los árboles en habida cuenta de las estrategias de la gestión futura de los bosques.

Para el caso colombiano, Baquero y Vargas (2003) y Cadena et al (2002) encontraron una alta variabilidad espacial de variables físicas y químicas del suelo correlacionadas con la cobertura vegetal.

3.5. VARIABLES ESPECTRALES Y SU RELACIÓN CON LA PRODUCTIVIDAD DE LAS PLANTACIONES FORESTALES

Según McRoberts (2008), la característica del análisis multivariado de la técnica k-NN (vecino más cercano) es crucial para la gestión de inventario forestales de aplicaciones en pie porque las decisiones de gestión frecuentemente requieren información sobre múltiples atributos igualmente en pie, y estimaciones de estos atributos deben ser compatibles. La característica de que sea no paramétrico es fundamental porque los datos de los inventarios forestales generalmente no cumplen los supuestos asociados de distribución paramétrico con las técnicas multivariantes. La combinación estratégica de los datos de los inventarios, las imágenes TM, y el k-NN técnica ha ganado popularidad por los atributos de la cartografía forestal. Para aplicaciones de inventario forestal, los mapas han utilizado para describir la distribución espacial de atributos forestales, al aumentar la precisión de las estimaciones a través de la estratificación de la estimación.

De acuerdo con Lefsky et al (2005), la relación entre lidar (método para medir estructura del bosque) basada en las características del dosel y la biomasa en pie, significa que este enfoque podría ser ampliamente aplicable a estos paisajes a partir de la sustitución de los regímenes de alteración, en particular en las regiones donde los inventarios forestales no son rutinariamente mantenidos.

Según Koukal et al (2007). El kNN (vecino más cercano) -validación cruzada como método es una alternativa prometedora al convencional método de regresión. Además de las aplicaciones en la silvicultura, tal vez también se aplica de manera general a las clasificaciones cobertura vegetal. En particular, la clasificación más exacta de las clases de cobertura de la tierra con una baja frecuencia, puede beneficiarse del uso simultáneo de datos formados con más de una imagen.

De acuerdo con Nanos y Montero (2002), la ventaja de proponer el método más tradicional del sistema de predicción es que es posible estimar la distribución de diámetro a la altura del pecho de los árboles en lugares que no se midieron éstas variables secundarias en los pinos.

Según Hagner y Reese (2007), Una modificación a la máxima verosimilitud algoritmo fue desarrollado para la clasificación de los tipos de bosques en Suecia es parte del proyecto Corine Land cartografía de la cobertura, con el nuevo método, llamado "clasificación calibrada máxima verosimilitud" implica un sistema automatizado e iterativo de ajuste, antes de ponderar pesos hasta la clase de frecuencia en la salida que corresponde más

estrechamente a la clase, como la frecuencia calculada a partir de objetivo estimado (bosque inventariado).

Meng et al (2007), menciona que en su trabajo que exploró el modelo de crecimiento alométrico de la integración de datos de imágenes Landsat y en tierra los datos de los inventarios forestales para la evaluación de la biomasa y el volumen de árboles en el estado de Georgia, EE.UU. Los modelos lineales mixtos con efectos sobre la base del modelo de crecimiento alométrico puede indicar más de cerca las características espaciales de la biomasa y el volumen de árboles, que en general no se presentan como efectos lineales con modelos fijos.

Chirici et al (2008) indica que en general, los resultados encontrados arrojan una prometedora luz sobre el uso de las técnicas no-paramétricas para la estimación de atributos de los bosques y la obtención de cartografía con precisión lo suficientemente alta como para apoyar las actividades de planificación de los bosques en paisajes tan complejos. Uno de los métodos más exitosos para la estimación de atributos y cartografía forestal por medio de la teleobservación y otros datos auxiliares es el método k-vecinos más cercanos k-NN. Utilizando datos de muestreo en el campo, el método produce estimaciones a nivel local calibrado para cada grupo de píxeles de la imagen de satélite y así poder continuar desarrollando los mapas de algunos atributos de los bosques.

Según Sader y Legaard (2008), los objetivos se centraron en la evaluación de la cosecha de bosques y para apoyar la regeneración en curso de los esfuerzos de investigación forestal. Mediante la actualización de más edad y la cobertura vegetal como producto, establecido mediante la detección de los cambios de datos y sistemas de información geográfica técnicas de integración, demostrar un punto de vista práctico y preciso, mediante la proporción contemporáneamente, espacialmente explícita de la cobertura forestal de datos necesarios para cuantificar el cambio del paisaje forestal.

De acuerdo Feldpausch et al (2006), Los métodos desarrollados en su estudio podría ser útiles para facilitar el inventario de prácticas comerciales, la comprensión de la relación de la distribución de las especies de árboles a las características del paisaje, y mejorar el uso novedoso de los inventarios de madera comercial para estimar la biomasa aérea.

Según Hall et al (2006), presenta un método que se basa en parcelas de campo georreferenciados para generar relaciones empíricas entre las estimaciones continuas de la estructura del bosque las características y los datos de imágenes de detección remota que se representan como variables de respuesta espectral. También presenta el modelo de altura del bosque a partir de la imagen donde tuvo un R^2 ajustado de 0,65 de ETM+, con las bandas 3, 4 y 5.

3.6. GEOMÁTICA

Geomática es la ciencia de la información espacial. Es un conjunto de técnicas y tecnologías originadas independientemente y que unidas buscan brindar soluciones espaciales integrales, como apoyo de investigación para otras ciencias y para sí mismas.

En el *Figura 6*, se muestra este grupo de componentes que unidos se convierten en ciencia o tecnología, según como se agrupen y se enfoquen. Integra disciplinas como Cartografía digital, Sistemas de Información Geográfica, Sistema Global de Posicionamiento (GPS), Sensores Remotos, Fotogrametría y Geoestadística (como parte

de la estadística espacial, la cual considero debe incluirse en la geomática), con otras áreas temáticas. Todas están enfocadas hacia el análisis, modelamiento y representación.

La Geomática se define como “la ciencia que estudia la estructura y las propiedades de la información espacial, los métodos de captura, clasificación, cualificación, definición espacial, representación, uso y la infraestructura para lograr una aplicación óptima” (Groot, 1989).

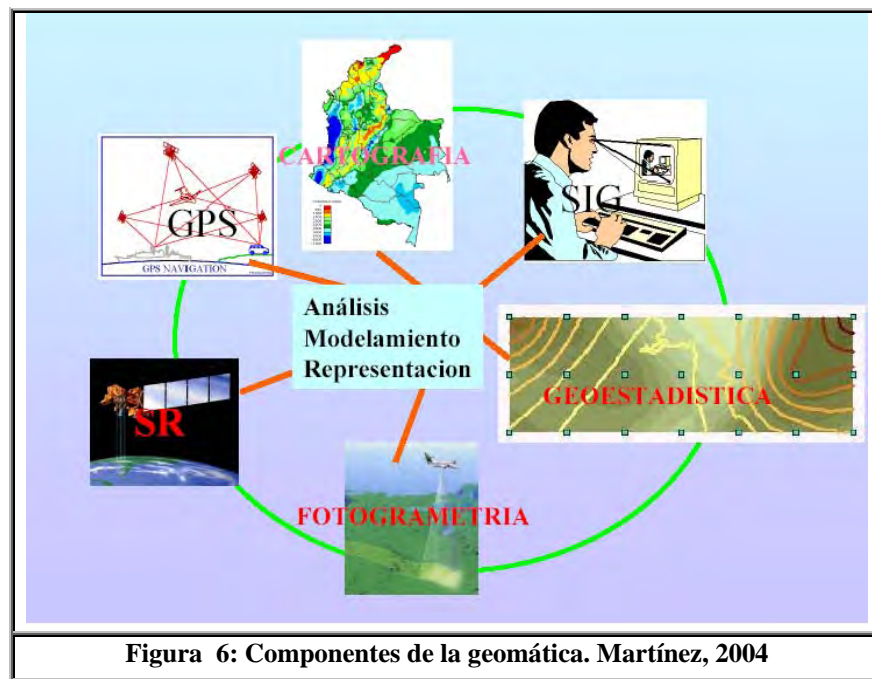


Figura 6: Componentes de la geomática. Martínez, 2004

3.6.1. Geoestadística

La geoestadística trata con variables medidas en una región con continuidad espacial, se fundamenta en el estudio de la autocorrelación espacial, es decir, asume que las observaciones de dos sitios serán más similares en la medida en que estos sean más cercanos (Cressie, 1993).

Las ubicaciones s provienen de un conjunto D continuo y son seleccionadas a juicio del investigador (D fijo). Algunos ejemplos de datos que pueden ser tratados con esta metodología son: Niveles de un contaminante en diferentes sitios de una parcela, contenidos auríferos de una mina, valores de precipitación en Colombia medida en las diferentes estaciones meteorológicas en un mes dado o los niveles piezométricos de un acuífero. En los ejemplos anteriores es claro que hay continuidad espacial, puesto que en cualquier sitio de la parcela, de la mina, de Colombia o del acuífero pueden ser medias las correspondientes variables. Es importante resaltar que en geoestadística el propósito esencial es la interpolación y si no hay continuidad espacial pueden hacerse predicciones carentes de sentido. Por ejemplo si la variable medida es producción de café en las fincas cafeteras del departamento del Quindío, hacer interpolación espacial y realizar un mapa de distribución de la producción cafetera puede ser carente de sentido porque podrían hacerse predicciones sobre áreas urbanas o no cultivadas con café. Además de lo

anterior las mediciones, no obstante sean georreferenciadas, corresponden a una agregación espacial (finca) más que a un punto del espacio. En la parte de arriba, al comienzo de este párrafo, se mencionó que D debía ser fijo. A este respecto cabe aclarar que el investigador puede hacer selección de puntos del espacio a conveniencia o puede seleccionar los sitios bajo algún esquema de muestreo probabilístico (Giraldo, 2002).

3.6.2 Kriging

Dentro de los interpoladores usados existe un grupo llamado Kriging, nombre dado por su creador, el ingeniero en minas sudafricano D.G. Krige. Hasta el día de hoy, todos los interpoladores geoestadísticos están en el grupo de los Kriging (con sus variantes), los cuales ofrecen no solo predicciones y superficies de respuesta requeridas, sino también mapas de probabilidades y cuantiles (Johnston et al. 2001). El método Kriging cuantifica la estructura espacial de los datos -mediante el uso de variogramas llamados algunas veces semivariogramas debido a su similitud en el cálculo- y los predice mediante la interpolación, usando estadística. Se asume que los datos más cercanos a un punto conocido tienen mayor peso o influencia sobre la interpolación, influencia que va disminuyendo conforme se aleja del punto de interés. La medición de la probabilidad, efectuada por los métodos Kriging, hace la diferencia con respecto a los métodos determinísticos para interpolaciones espaciales (Burrough y McDonnell 1998). De acuerdo a Villatoro et al (2008). El método Kriging fue más preciso y eficiente que el IDW (Inverse Distance Weighting) en el proceso de interpolación respecto del pH, el Ca, y el CICE, aunque la diferencia entre ambos métodos no fue muy amplia.

La palabra kriging¹ (expresión anglosajona) procede del nombre del geólogo sudafricano D. G. Krige, cuyos trabajos en la predicción de reservas de oro, realizados en la década del cincuenta, suelen considerarse como pioneros en los métodos de interpolación espacial. Kriging encierra un conjunto de métodos de predicción² espacial que se fundamentan en la minimización del error cuadrático medio de predicción (Giraldo, 2002).

3.6.3 Cokriging

La estimación conjunta de variables aleatorias regionalizadas, más comúnmente conocida como Cokriging (Kriging Conjunto) es el análogo natural del Kriging de una función aleatoria. Mientras que el Kriging utiliza la correlación espacial para determinar los coeficientes en el estimador lineal, el Cokriging utiliza la correlación espacial y la correlación entre funciones aleatorias al mismo tiempo (Díaz, 2002).

Estimación de combinaciones lineales de variables correionalizadas (Díaz, 2002).

Existe un número de aplicaciones donde es deseado estimar una combinación lineal de variables correionalizadas. Por ejemplo si se necesita identificar anomalías entonces una combinación lineal de algunas variables puede ser relevante y de este modo las variables que son indicativas de la presencia de un elemento particular pueden ser usadas. Existen varios enfoques posibles. El más directo es tomar un conjunto de datos

¹ Algunos textos indican que en español la palabra adecuada sería krigeado

² La palabra estimación es utilizada exclusivamente para inferir sobre parámetros fijos pero desconocidos; predicción es reservada para inferencia sobre cantidades aleatorias

multivariados y formar una combinación lineal para obtener un nuevo conjunto de datos para la variable construida, entonces es calculado el variograma muestral, luego modelado y finalmente se le aplica el Kriging.

Otro enfoque consiste en estimar cada variable y luego construir la combinación lineal. Este puede ser llevado a cabo mediante la estimación de cada variable por separado o mediante la estimación conjunta por Cokriging. La diferencia de estos métodos se refleja en las varianzas de la estimación.

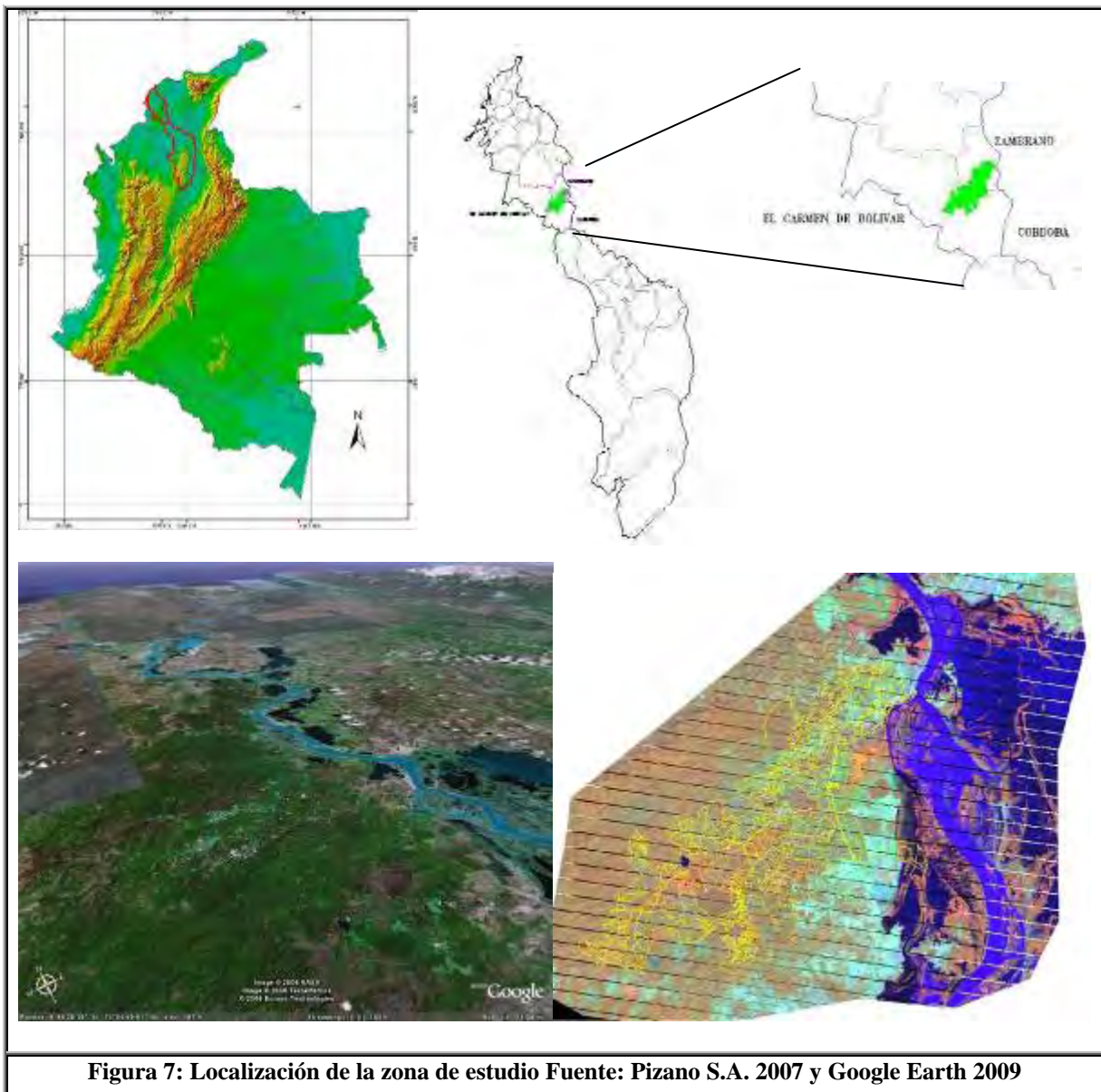
Al primer enfoque lo nombraremos como la estimación directa y al segundo como la estimación conjunta (Díaz, 2002).

4. MATERIALES Y METODOS

4.1. ÁREA DE ESTUDIO

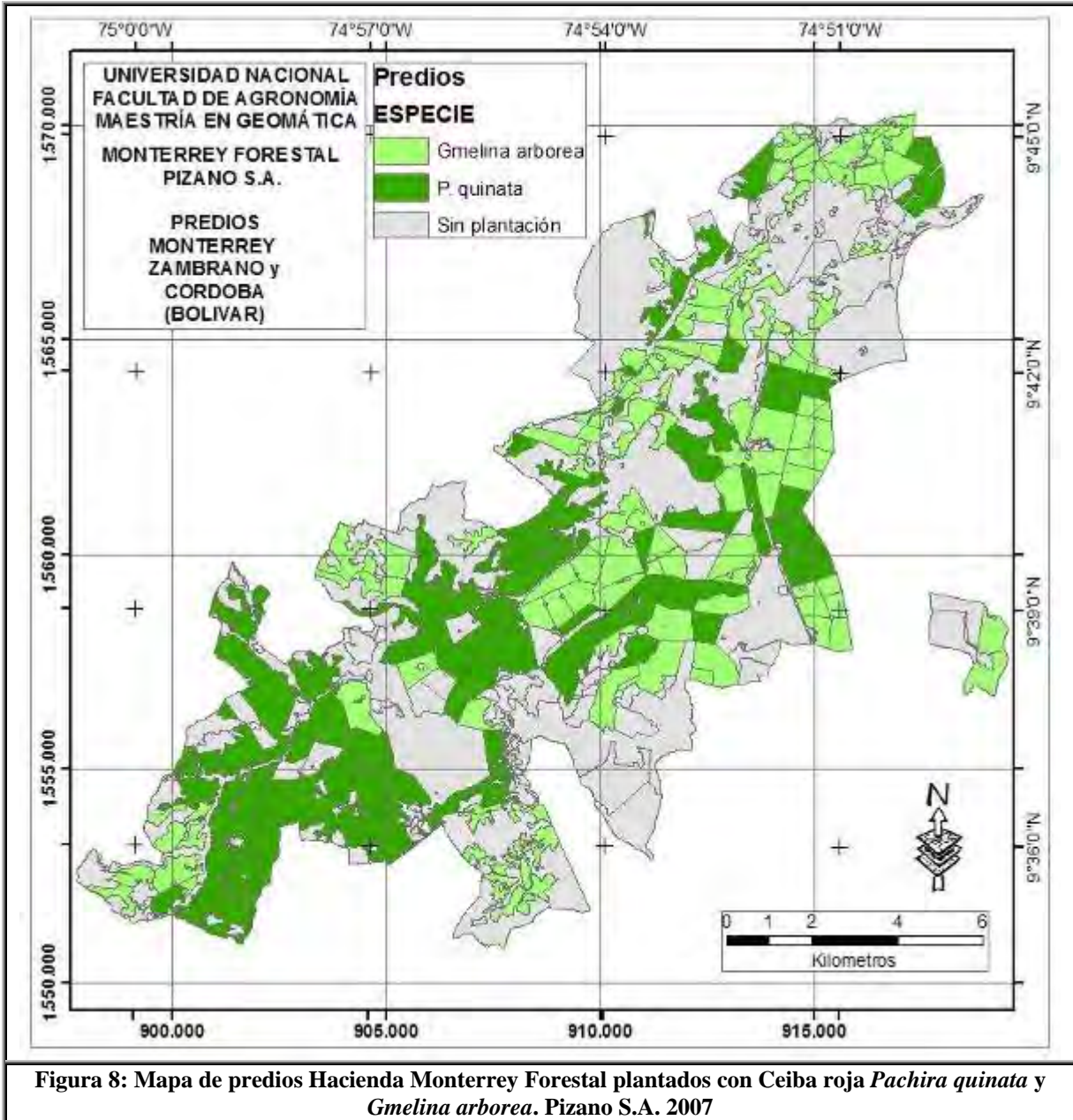
El área de estudio fueron las plantaciones de Ceiba roja (4.567 ha), incluidas en los predios en la Hacienda Monterrey de propiedad de Pizano S.A. y su filial Monterrey Forestal Ltda.

En la *Figura 7*, se observa la localización del área de estudio: correspondiente a los municipios de Zambrano y Córdoba principalmente en el departamento de Bolívar.



La presente investigación se realizó en la Hacienda Monterrey, con 16.000 ha de propiedad de Pizano S.A. y su filial Monterrey Forestal, donde tiene plantadas 4.567 ha de

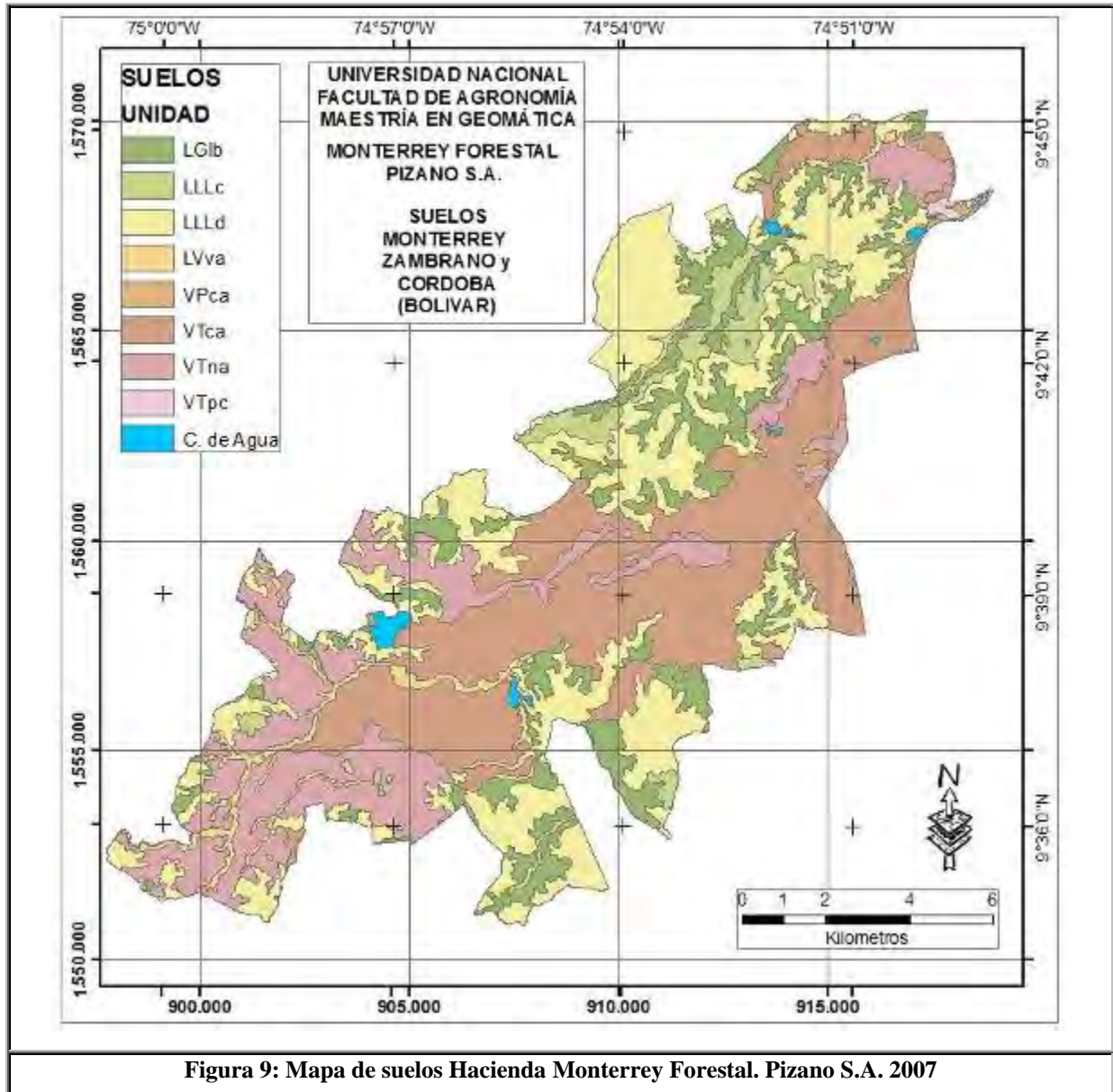
Ceiba roja *Pachira quinata* en 127 predios, objeto de estudio. En esta hacienda hay otra plantación con 3.739 ha con *Gmelina arborea*, en 123 lotes³, y en el resto de la hacienda tiene bosques y pastos principalmente. En la *Figura 8*, se presentan los predios de la hacienda Monterrey donde se efectuaron los estudios de esta investigación (verde oscuro).



4.2. SUELOS DEL ÁREA DE ESTUDIO

³ Actualmente se continua plantando con *Gmelina arborea*

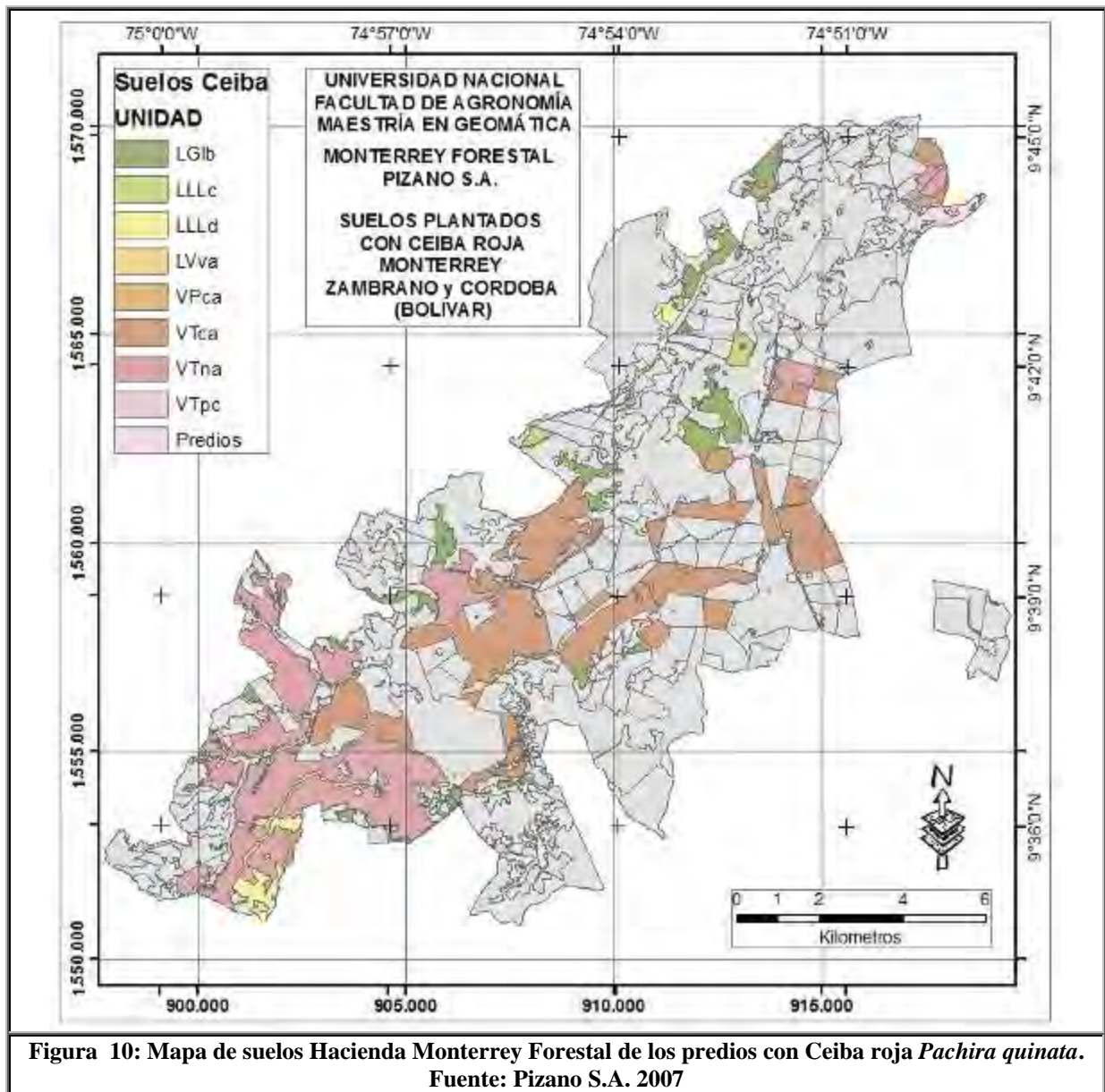
En la *Figura 9*, se observa las diferentes unidades de suelo de la Hacienda Monterrey, en la *Tabla 5*, se observa su leyenda, con 8 unidades de suelos y cuerpos de agua, donde se resaltan las unidades donde se encuentra la mayoría de la Ceiba roja.



Paisaje	Tipo de relieve	Forma del terreno	Pendiente	Símbolo suelos Pizano 2007	Símbolo suelos IGAC 1975
	Plano de inundación	Cubeta de desborde	plana 0-3%	VPCa	LMa
	Terrazas	Napa	plana 0-3%	VTNa	CEa
		Cubeta	plana 0-3%	VTCa	CEa
		Planos superiores	fuertemente inclinado 7-12%	VTPc	MAbc1
Lomerio	Lomas y colinas en arcillolitas	Laderas	moderadamente ondulada 12-25%	LLLd	BNde2
		Laderas	fuertemente inclinada 7-12%	LLlc	MAbc1
		Glacís de acumulación	ligeramente inclinado 3-7%	LGLb	EDb
	Vallecito	Vega	plana 0-3%	LVVa	EDa

Tabla 5: Leyenda del mapa de suelos de la hacienda Monterrey

En el *Figura 10*, se observan las mismas 8 unidades de suelos mostradas para toda la hacienda Monterrey, pero solo las correspondientes a las plantaciones con Ceiba roja *Pachira quinata*. Predios que con esta especie se ubican principalmente en 4 unidades de suelos que ocupan el 95% de las áreas plantadas con Ceiba roja.



En la *Tabla 6*, se observa, las áreas y porcentajes de las unidades de suelos más representativas donde se encuentra la Ceiba roja, como son los suelos correspondientes a cuatro unidades de suelos, dos de la planicie aluvial de terraza con formas de napa y cubeta, con el 79% de éstas plantaciones, y con paisaje de lomas y colinas con dos rangos de pendientes, el 16%, para un total del 95% representados en 4 unidades de suelos según Pizano 2003, que correspondiente a 3 unidades de suelo según IGAC 1975: Asociación La Caña (CEa), Asociación el Bongal (BNde2) y Asociación El Edén (EDb).

SIMBOLO SUELOS PIZANO 2007	POLÍGONOS	ÁREA(HAS)	PORCENTAJE	PORCENTAJE ACUMULADO	SIMBOLO SUELOS IGAC 1975
VTca	32	1945,92	42,61%	42,61%	CEa
VTna	32	1657,73	36,30%	78,91%	CEa
LGIb	43	479,69	10,50%	89,42%	EDb
LLLd	215	266,58	5,84%	95,26%	BNde2
LVva	93	133,30	2,92%		
LLLc	20	74,73	1,64%		
VTpc	2	5,37	0,12%		
VPca	1	3,22	0,07%		
		4566,54	100,00%		

Tabla 6: Porcentajes de unidades de suelos donde se encuentra la Ceiba roja en la Hacienda Monterrey

A continuación se describen únicamente las tres unidades de suelos principales, donde se encuentra la Ceiba roja *Pachira quinata*, en la Hacienda Monterrey. La asociación como unidad cartográfica está compuesta de algunos tipos de suelos que varían en algunas características, pero se encuentran asociadas en una unidad.

Se explica cada asociación siguiendo el orden establecido en la leyenda.

ASOCIACIÓN LA CAÑA (CE)

Son suelos aluviales de terrazas bajas del Río Magdalena. No inundables por el Magdalena, arcillosos de topografía plana a ligeramente inclinada hacia el río, de pendiente 0 – 3%. Tiene algunas quebradas que la atraviesan de Occidente a Oriente; son frecuentemente inundadas por éstas en épocas de lluvia. En general son suelos de colores oscuros; tiene altos porcentajes de arcillas; se observan concreciones de Fe y Mn y yesos en sus horizontes profundos. En ocasiones tiene moteados superficiales, principalmente en las concavidades del paisaje; a veces se observan también moteados en la profundidad, probablemente litocrómicos. No hay nivel freático alto.

Limita abruptamente con orillares y con el Río Magdalena, lo mismo que con las asociaciones La Magdalena y La Merced. Es una amplia zona que se extiende de Sur a Norte, interrumpida ocasionalmente con otras asociaciones que bordean el río. Por la expansión y contracción de las arcillas, las raíces sufren su destrucción; los postes de cercas o de alumbrado eléctrico o los mismos árboles se inclinan por la misma razón.

En el área generalmente se siembra algodón, tabaco, maíz, patilla, melón, pero en general está dedicada a ganadería extensiva; gran parte del parea permanece en rastrojo en donde se entremezcla el ganado. Por la índole de la arcilla, tienen alta capacidad catiónica de cambio; son fértiles, pero la dificultad estriba en el uso de la maquinaria en épocas extremas de sequía o de lluvia. Por ser una zona de régimen ústico, se ha hecho necesario construir pozos de recolección de agua para el ganado e inclusive para el uso humano. Pertenecen a la clase agrológica III con limitaciones por humedad y suelos.

Entre los macroelementos recomendables está el nitrógeno, porque estos suelos aunque de color negro, este no se debe a la materia orgánica, sino a la polimerización de los ácidos húmicos.

La vegetación dominante es el cactus (*Opuntia Wentiana*), Pringamoza (*Gnidosculus urens*), trupillo (*Prosopis juliflora*) y guásimo (*Guazuma ulmifolia*).

La asociación está compuesta por dos conjuntos (ver Anexo 2).

ASOCIACIÓN EL EDEN (ED)

Es un área de diferentes sistemas de drenaje y de relieve con pendientes dominantes 12 – 25%.

El área se extiende de Oriente a Occidente donde se encuentra encajonada entre colinas de paisaje miocénico y Pliocénico, con los cuales limita abruptamente; además tiene límites difusos con la asociación La Caña y Santa Isabel.

Se observa dominancia de vertisoles o de integrados vérticos en la zona encajonada por áreas de paisaje Pliocénico y de molisoles en áreas con influencia del Mioceno.

Es la zona de mayor uso agrícola y ganadero. Existen latifundios con ganadería extensiva y también cultivos comerciales de maíz, algodón, tabaco, sorgo y pastos admirables, pangola, yaraguá, etc. el Incora ha construido para las épocas de sequía un embalse para recolección de agua, pero sin uso ni beneficio, por la falta de alimentación porque en verano las quebradas que la abastecen se secan igualmente.

En bajo porcentaje el área recubierta de vegetación arbustiva espinosa como el trupillo (*Prosopis juliflora*), el cactus (*Opuntia wentiana*), la zarza, etc; en donde el ganado se entremezcla con ellas.

La asociación se conforma por seis conjuntos (ver Anexo 2).

ASOCIACIÓN EL BONGAL (BN)

Suelos bien drenados; topografía ondulada a fuertemente ondulada; la pendiente varía de 3 a 50%; de textura franco arcillosa, arcillosa y franco arcillo arenosa. La erosión se presenta de ligera a severa. Algunos perfiles son salino-sódico y sódicos desde los primeros 30 cm de profundidad.

Es una amplia zona que se extiende de Sur a Norte, bordeada por la asociación La Magdalena, con la cual en ocasiones tiene límites difusos; está rodeada además, con las asociaciones El Coral, El Eden y El Salado, con las cuales limita en forma abrupta.

Son extensas áreas (latifundios) que se encuentran bajo vegetación arbustiva, que protege al suelo de la acción contra la erosión. Sin embargo los aparceros practican cultivos de subsistencia, talado de vegetación existente, acentuando la erosión. La diferencia granulométrica de los horizontes (arcillo, arena, arcilla), ha provocado erosión interna en algunas zonas. Sobre la superficie se observa gravilla (especialmente concha, fragmentos de areniscas). Se encuentran cultivos de yuca, melón, patilla y algunos frutales y ganadería extensiva que se entremezcla en la vegetación.

Por contener epipedones cercanos al mólico, son aireados, buena actividad biológica, alta porosidad ocasionada por lombrices, termites y raíces. No se observa un 01 porque de acuerdo a la teoría, los carbonatos ayudan a la descomposición rápida de la materia orgánica; también tiene dificultades en la nitrificación y mineralización del nitrógeno disponible para las plantas.

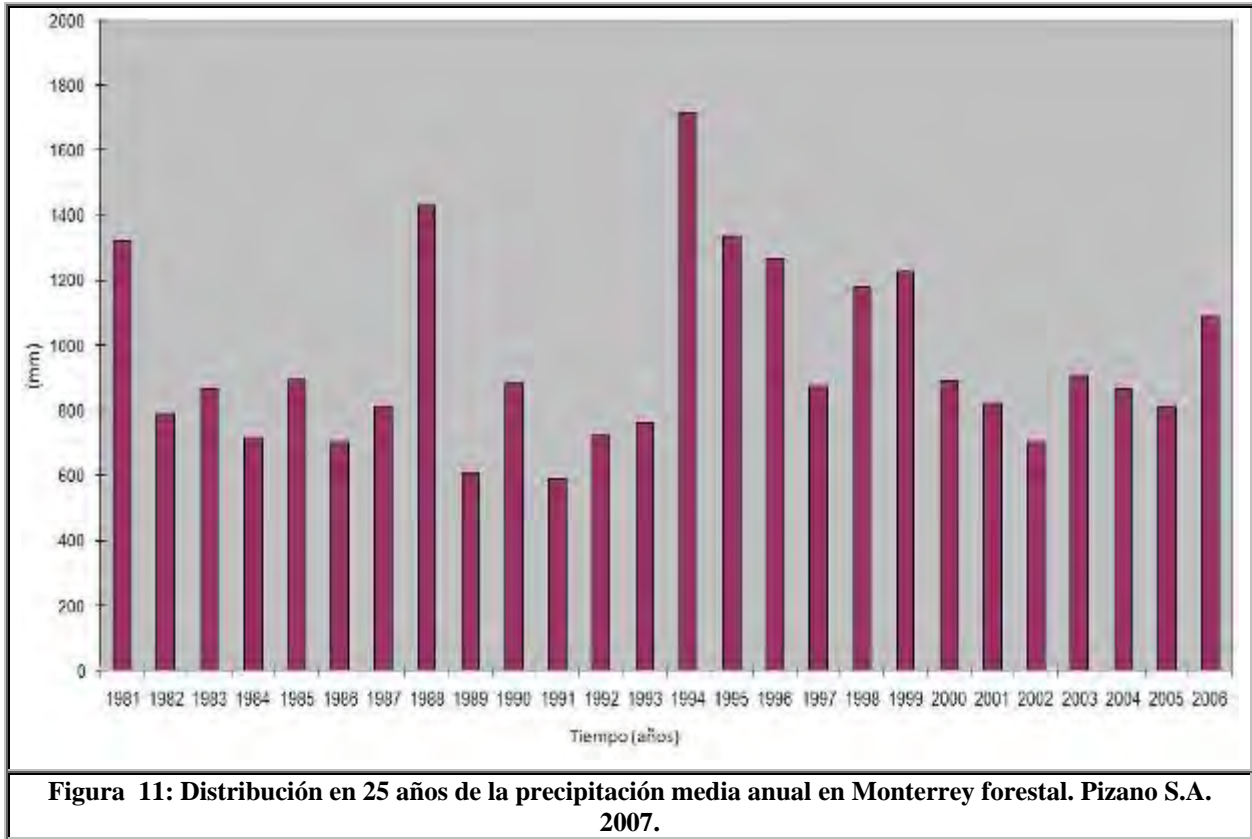
En esta asociación la vegetación dominante es el trupillo (*Prosopis juliflora*), cactus (*Opuntia wentiana*), pringamoza (*Gnidosculus Urens*) y bleo (*Amaranthus sp*).

La asociación consta de cuatro conjuntos (ver Anexo 2).

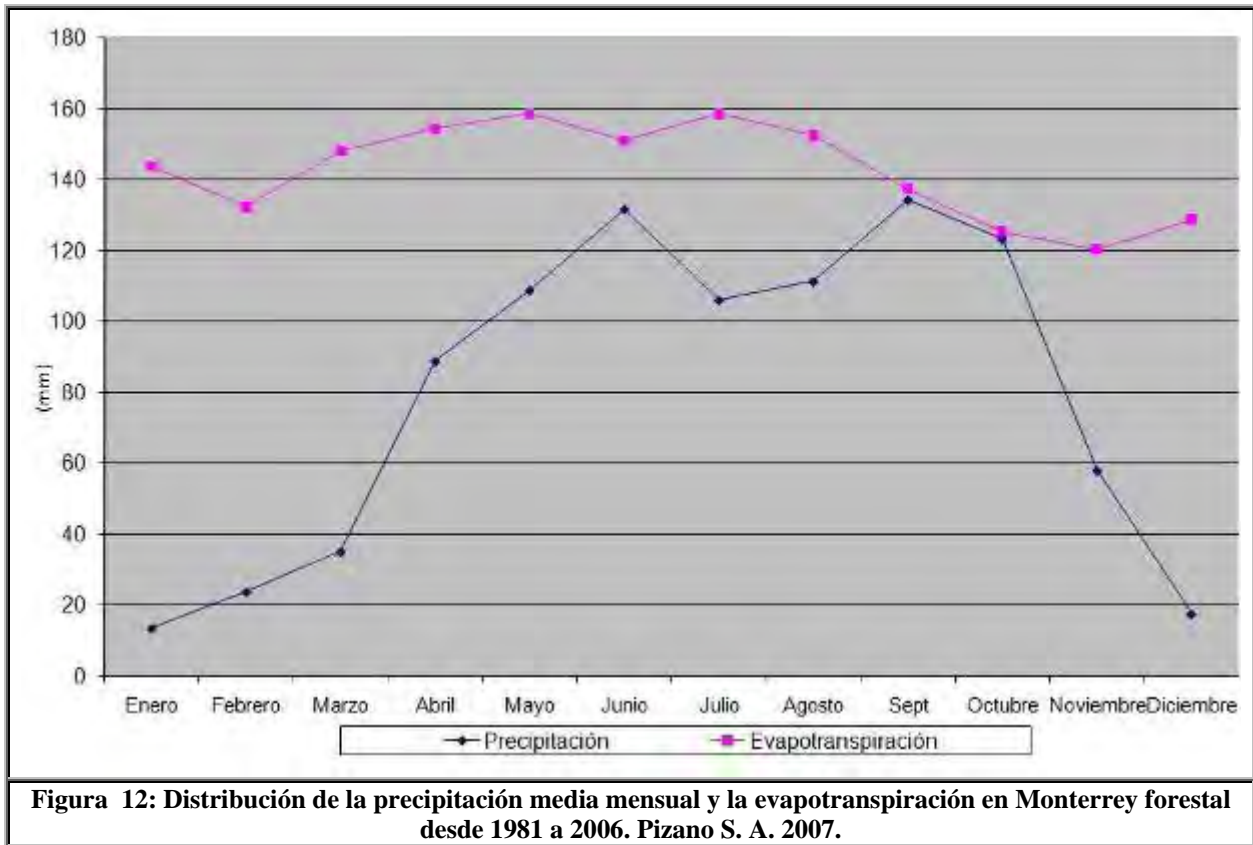
4.3. CARACTERÍSTICAS CLIMÁTICAS DEL ÁREA DE ESTUDIO

De acuerdo a Schroeder et al (2007). El desarrollo de los rebrotes sucesionales del bosque donde se utilizan los datos del espectro de Landsat siempre se convierte en una oportunidad de utilizar para el análisis estadístico, donde se debe investigar más plenamente las condiciones climáticas y topográficas que influyen en los atributos del bosque. Lo que confirma que el clima es un factor determinante en el desarrollo de plantaciones forestales. Las plantaciones forestales del presente estudio están ubicadas con las siguientes características climáticas.

La temperatura es relativamente uniforme durante el año, con un promedio de 27,5° C, mientras los registros de precipitación tomados en los últimos 38 años indican un promedio anual de 970 mm. Con estos datos de precipitación y temperatura la zona se ubica en el Bosque Seco Tropical, según la clasificación de Holdridge (Ureña, H. 1999). Lo cual coincide con el análisis de 25 años entre 1981 y 2006 (Figura 11).

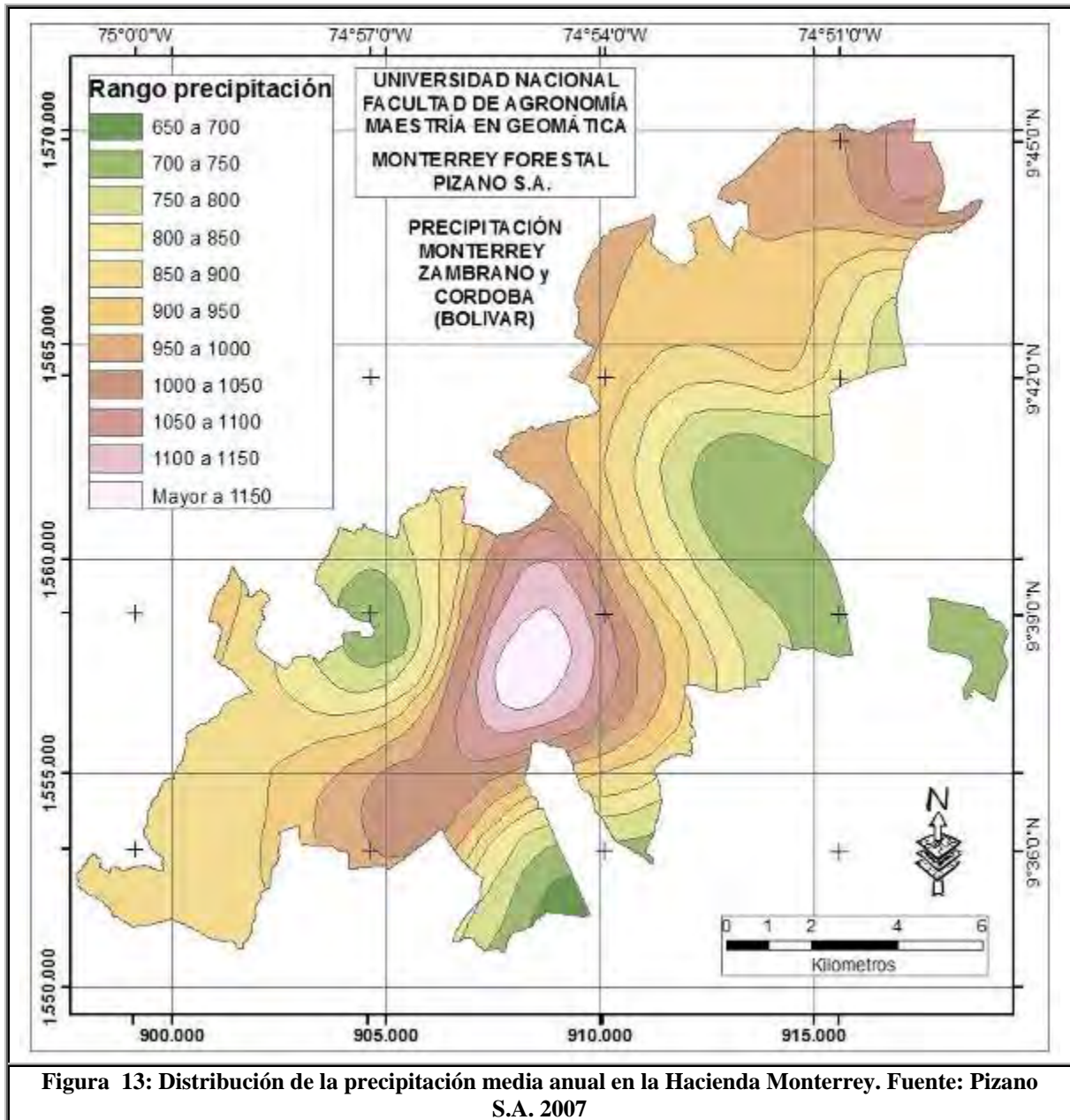


La precipitación media mensual se observa en el *Figura 12*, presentando una estructura climática monomodal. También en ésta se presenta la evapotranspiración, como se observa siempre por encima de la precipitación a excepción de los meses de septiembre y octubre que es igual.



En la *Figura 13*, se presenta la distribución espacial de la lluvia basada en datos de los últimos 44 años a 2006, de las estaciones pluviométricas ubicadas en La Hacienda Monterrey⁴ llamadas: El Cuatro, Bongal, Petate, La Sierra, El Porvenir, Toletemen, Santo Domingo, La Estrella, Carreto, Portobelo, Paraco, Papayo, Andaluz, Zoocriadero y Cocuelo. Se presentan rangos cada 50 mm de precipitación media anual, desde 650 a 700 mm hasta mayor de 1150 mm. Esta precipitación media anual es diferente en los cuatro lotes plantados con Ceiba roja seleccionados, organizados en tres grupos que se presentan más adelante.

⁴ Aunque no todas las estaciones pluviométricas iniciaron a tomar datos al tiempo la mayoría tiene más de 30 años.



4.4. ZONA DE VIDA DEL ÁREA DE ESTUDIO

La zona de estudio correspondiente a la hacienda Monterrey Forestal, se ubica en la formación Bosque Seco Tropical Bs-T, con las siguientes características.

BOSQUE SECO TROPICAL

El Bosque seco Tropical (Bs-T) se define como aquella formación vegetal que presenta una cobertura boscosa continua y que se distribuye entre los 0-1000 m de altitud; presenta temperaturas superiores a los 24°C (piso térmico cálido) y precipitaciones entre los 700 y 2000 mm anuales, con uno o dos periodos marcados de sequía al año (Espinal,

1985; Murphy y Lugo, 1986; IAVH, 1997). De acuerdo con Hernández (1990) esta formación corresponde a los llamados bosques higrotropofíticos, bosque tropical caducifolio de diversos autores, bosque seco Tropical de Holdridge, y al bosque tropical de baja altitud deciduo por sequía de la clasificación propuesta por la UNESCO.

En cuanto a los aspectos climáticos y biológicos no existe consenso en cuanto a los valores de precipitación que caracterizan al Bosque seco Tropical. Murphy y Lugo (1986) señalan una precipitación que fluctúa entre 600 y 1800 mm/año. Holdridge et al. (1971), señalan una precipitación entre 250 y 1800 mm, mientras que Espinal y Montenegro, (1977), establecen como límite una precipitación anual entre 1000 y 2000 mm.

En Colombia esta formación se desarrolla en lugares con precipitación que fluctúa entre 789 mm (Isla de Tierra Bomba, Bolívar) y los 1800 mm (pie de monte de la cordillera central Valle del Cauca). La temperatura media anual es superior a los 25⁰C, alcanzando temperaturas máximas de 38⁰C (IAVH 1995, 1997; CVC, 1994).

En la región del Caribe colombiano los lugares de Bosque seco Tropical presentan los climas, cálido árido, cálido semiárido y cálido seco, los cuales se caracterizan porque la evapotranspiración supera ampliamente a la precipitación durante la mayor parte del año, presentándose déficit de agua. Esto determina uno o dos periodos en donde la vegetación pierde parcialmente su follaje (IAvH, 1998). La pérdida del follaje es una de las principales adaptaciones fisiológicas de las plantas del Bosque seco tropical al déficit de agua. Existen también adaptaciones estructurales generalizadas entre las plantas como son la presencia de hojas compuestas y foliolos pequeños, corteza de los troncos lisa y presencia de agujones o espinas (IAVH 1995).

La altura del dosel oscila entre 15 y 25 metros y se presentan hasta cuatro estratos vegetativos incluyendo el herbáceo. En el interior de este tipo de hábitat son escasas o ausentes las plantas epífitas y el sotobosque es despoblado de hierbas en comparación con hábitats más húmedos (IAVH 1995,1997; Gentry, 1995). Los bosques secos en la zona continental ecuatorial de América, presentan densidades de lianas e individuos de árboles y arbustos por unidad de área similares a las encontradas en bosques húmedos tropicales. Sin embargo la cantidad de madera es inferior a las encontradas en hábitats más húmedos (Gentry 1995).

El sistema de polinización por insectos, principalmente por abejas, es el predominante lo que se relaciona con el predominio de especies con flores campanuladas y zigomorfas de tamaños mediano y grande. La dispersión de frutos y semillas es principalmente por el viento (Gentry 1995). Los animales en el Bosque seco Tropical presentan marcadas respuestas a la estacionalidad. Muchos migran hacia zonas húmedas o bosques riparios, otros poseen adaptaciones fisiológicas para no perder agua, cambian de dietas, o acumulan grasas como fuente de alimento. Para los artrópodos se ha observado que disminuyen su abundancia durante la estación seca (Ceballos 1995).

La distribución geográfica y extensión original del Bosque seco Tropical representa el 50% de las áreas boscosas en Centroamérica y el 22% en Sudamérica (Murphy & Lugo, 1986). En Colombia el Bosque seco Tropical se distribuía originalmente en las regiones de la llanura Caribe y valles interandinos de los ríos Magdalena y Cauca entre los 0 y 1000 m de altitud y en jurisdicción de los departamentos del Valle del Cauca, Tolima, Huila, Cundinamarca, Antioquía, Sucre, Bolívar, Cesar, Magdalena, Atlántico y sur de la Guajira.

De acuerdo con Espinal y Montenegro (1977), también se encontraban enclaves de menor extensión con esta vegetación en las Islas de San Andrés y Providencia, en la región norte de la península de la Guajira, Santa Marta (Magdalena), en Gamarra (Cesar), Cañón de río Chicamocha (Santander), Convención y Ocaña, alrededores de Cúcuta (Norte de Santander), Cañón del Dagua (Valle del Cauca), Villa Vieja (Huila) y Valle del río Patía (Cauca).

Aunque no se dispone de información exacta de la extensión de la cobertura original del Bosque seco Tropical en Colombia, se estima que cubría la mayor parte de las todas las regiones y localidades anteriormente nombradas y las cuales abarcan una extensión de más de 8'146.000 hectáreas (IAvH, 1998).

Esta información fue generada a partir de los mapas de formaciones vegetales de Colombia de Espinal y Montenegro (1977). Según la clasificación propuesta por Hernández (1990), para las condiciones de Colombia, el Bosque seco Tropical corresponde al zonobioma Tropical Alterhídrico que se desarrolla en tierras bajas. Este zonobioma abarca siete provincias biogeográficas de acuerdo a la clasificación dada por Hernández et al (1992).

4.5. CARACTERÍSTICAS DE LAS PLANTACIONES DE CEIBA ROJA

De los 127 lotes de Ceiba roja en la Hacienda Monterrey con 4,567 ha, se seleccionaron 4 lotes (ver ítem siguiente). Los cuales en la *Tabla 7* se presentan las siguientes características:

Nombre Lote	Superficie (Ha)	Fecha de Plantación	Turno ⁵ (Años)	Raleo ⁶	Entresaca ⁷
San José 01	52	1987	25	si	si
Hachados 01	40	1991	25	si	si
Andaluz 16	57	1985	25	si	si
Andaluz 17	34	1985	25	si	si

Tabla 7: Característica de los lotes seleccionados plantados con Ceiba roja. Pizano 2007

Cerca del 30% de los árboles originalmente plantados son los que llegan al turno de 25 años para la Ceiba roja y obtener los rendimientos explicados en el marco teórico.

⁵ Período de tiempo que requiere la plantación para ser aprovechada de manera costo efectivo de acuerdo a la fisiología de la especie y las condiciones biofísicas en donde se encuentre.

⁶ Raleo es el proceso de manejo silvicultural de la plantación mediante el cual se retiran los árboles menos vigorosos o con deformaciones, en intensidad menor al 30% de los árboles plantados originalmente para dar espacio aéreo y terrestre a los más vigorosos, ésta madera es poco comercial y marginalmente utilizada en la industria de Triplex.

⁷ Entresaca se hace para retirar de manera sistemática espacialmente un porcentaje de árboles que no superen el 40% de los árboles originalmente plantados y se realiza dos ocasiones distribuidas en su en su turno; está madera es comercial y utilizada en la industrial del Triplex.

4.6. LEVANTAMIENTO Y ANÁLISIS DE DATOS

En la *Figura 14*, se presenta la metodología del levantamiento y análisis de datos, donde se realizó a partir de: 1) diseño de levantamiento de datos de suelos, 2) levantamientos de datos forestales, 3) el análisis de la imagen Landsat, y 4) el análisis espacial de la precipitación. Para el primer tema se realizó: 1) muestreo de suelos, 2) procedimiento y análisis en campo, 3) análisis en laboratorio y análisis de datos de suelos; para el segundo tema se trabajó con: 1) datos de vegetación e inventario forestal, y 2) análisis de datos forestales; para el tercer tema se trabajó con análisis de datos espectrales; y en el cuarto tema con el análisis de datos de precipitación. Todos estos datos obtenidos estratégicamente para los mismos sitios puntuales, correspondiente a una escala de trabajo 1:25.000, es decir para un estudio detallado y para un determinado tiempo (corto periodo de tiempo). Los datos de campo de suelos y forestales son obtenidos entre septiembre y noviembre de 2005, la imagen es de enero de 2006 y la precipitación tomada hasta finales de 2005.

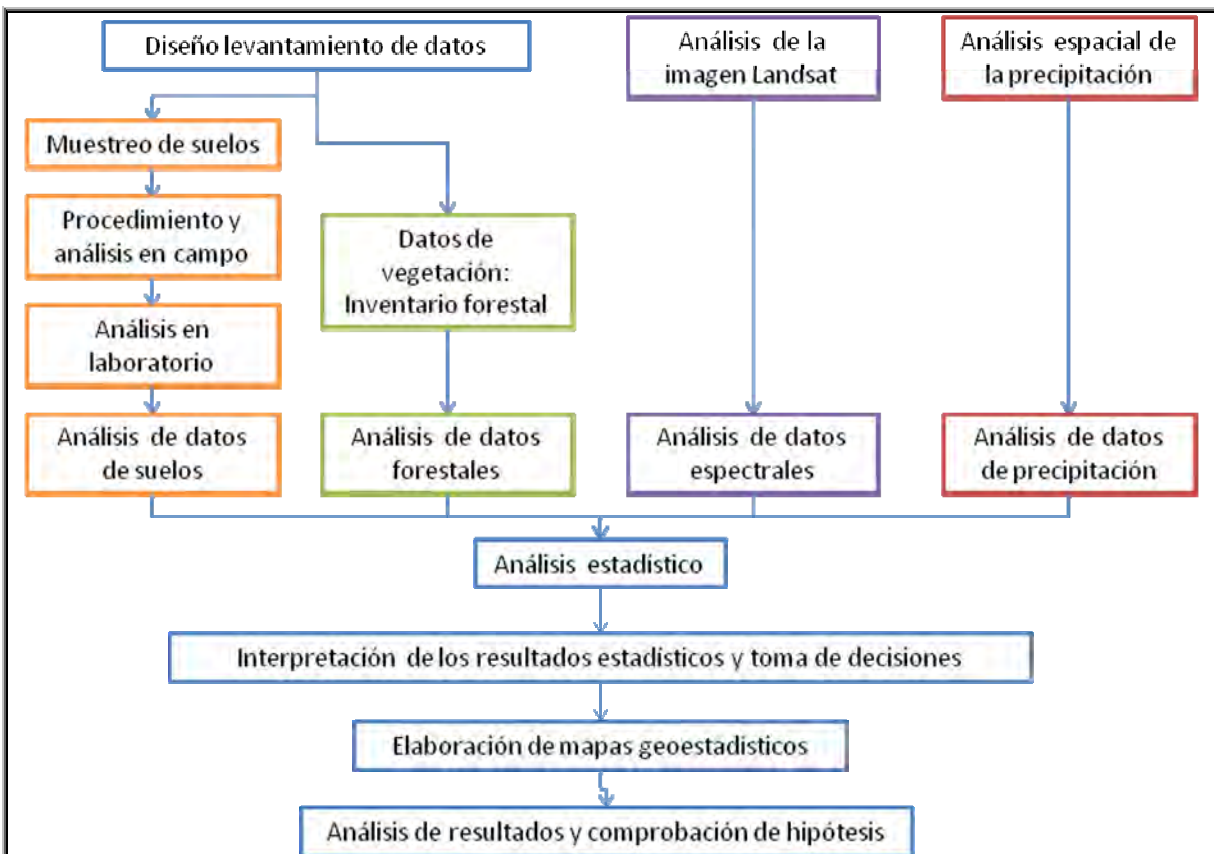
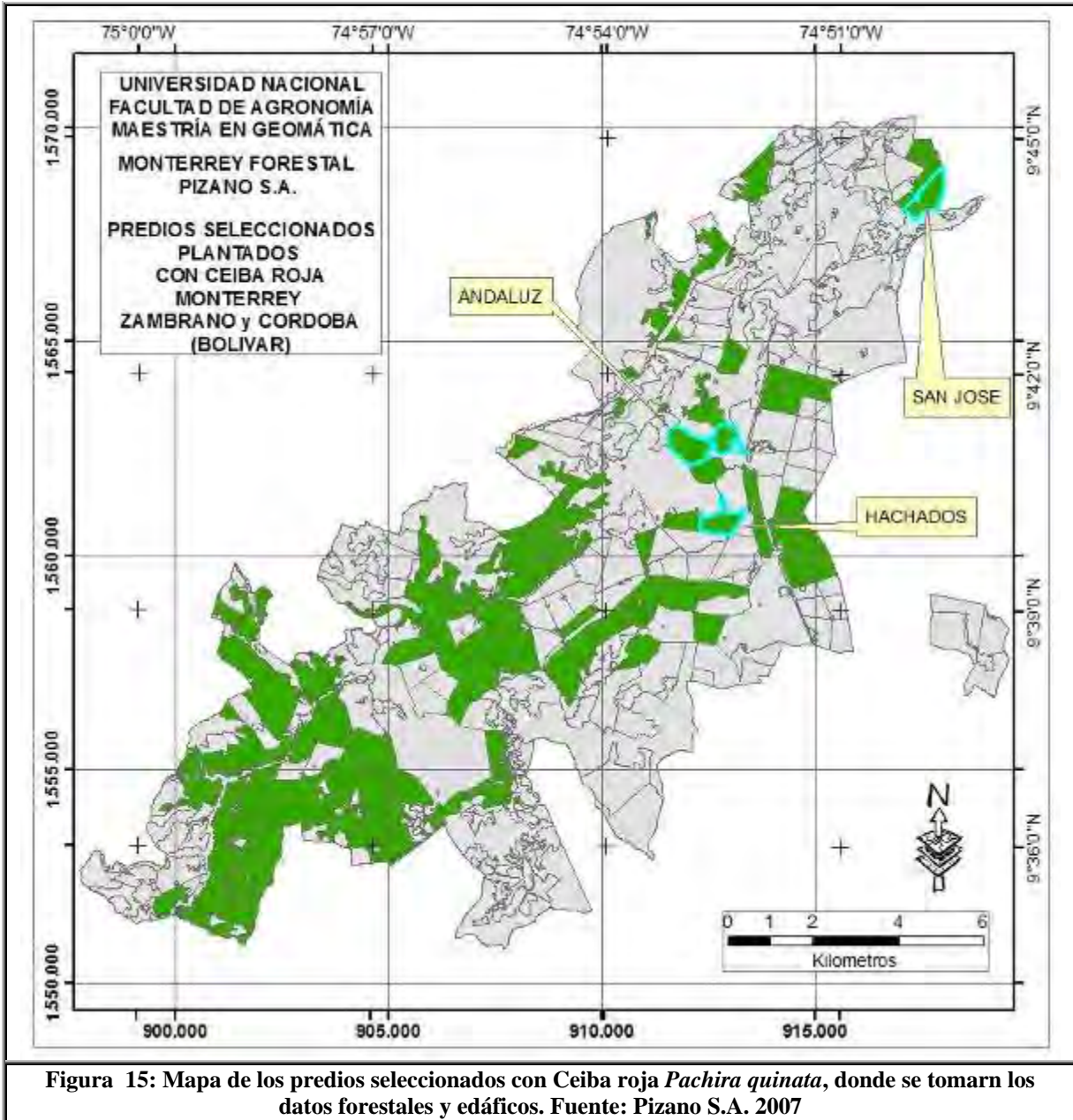


Figura 14: Flujograma metodológico para determinar la variabilidad espacial de las propiedades del suelo, la producción y la respuesta espectral de plantaciones industriales de ceiba roja.

4.6.1. DISEÑO DE LEVANTAMIENTO DE DATOS

De acuerdo con los objetivos de la investigación, fue seleccionada un área de trabajo correspondiente a las plantaciones de Ceiba roja *Pachira quinata* del complejo forestal de Monterrey Forestal, con un área de 4.566,6 has, con 127 lotes, de estos lotes se

escogieron 4 que corresponden a las tres unidades de suelos más representativas en un 94,27% (ver capítulo anterior). Además se tuvo en cuenta la ubicación de manera estratégica para la toma de datos forestales y edáficos, tal como se observan en la *Figura 15*.



En términos prácticos se pueden agrupar los lotes por su cercanía en dos, el primero en la Zona sur, donde se encuentran los lotes Hachados 01, Andaluz 16 y Andaluz 17 (*Figura 16*) y el detalle en la *Figura 17*. En donde se aprecia la numeración de la retícula de 60 m x 60 m, horizontal se enumera con número arábigo y verticalmente se numera alfabéticamente. En el centro de cada cuadro se tiene el sitio de marcación y codificación de cada muestreo.

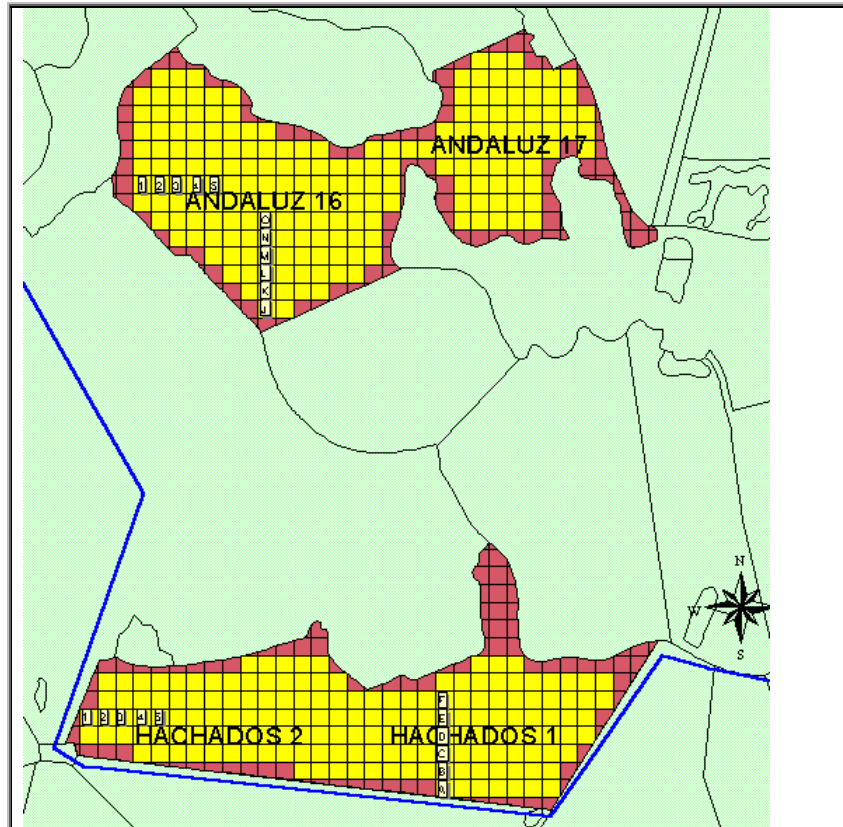


Figura 16: Grupo de predios con Ceiba roja *Pachira quinata*, Zona Sur.

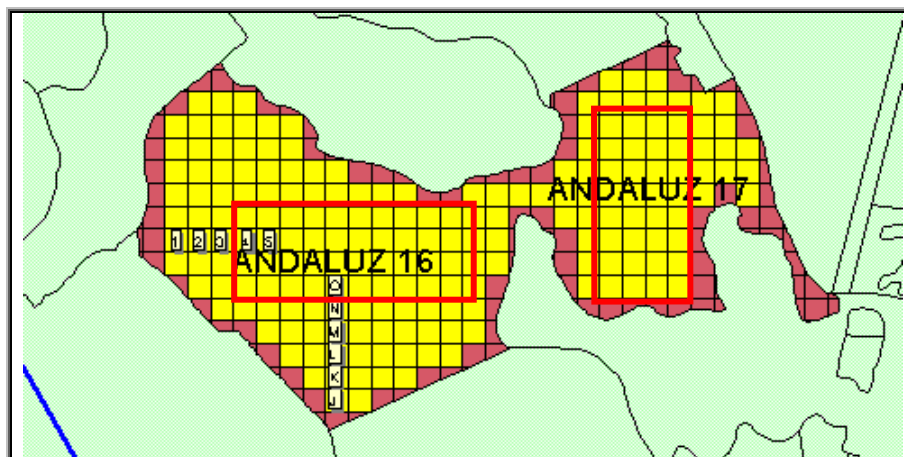
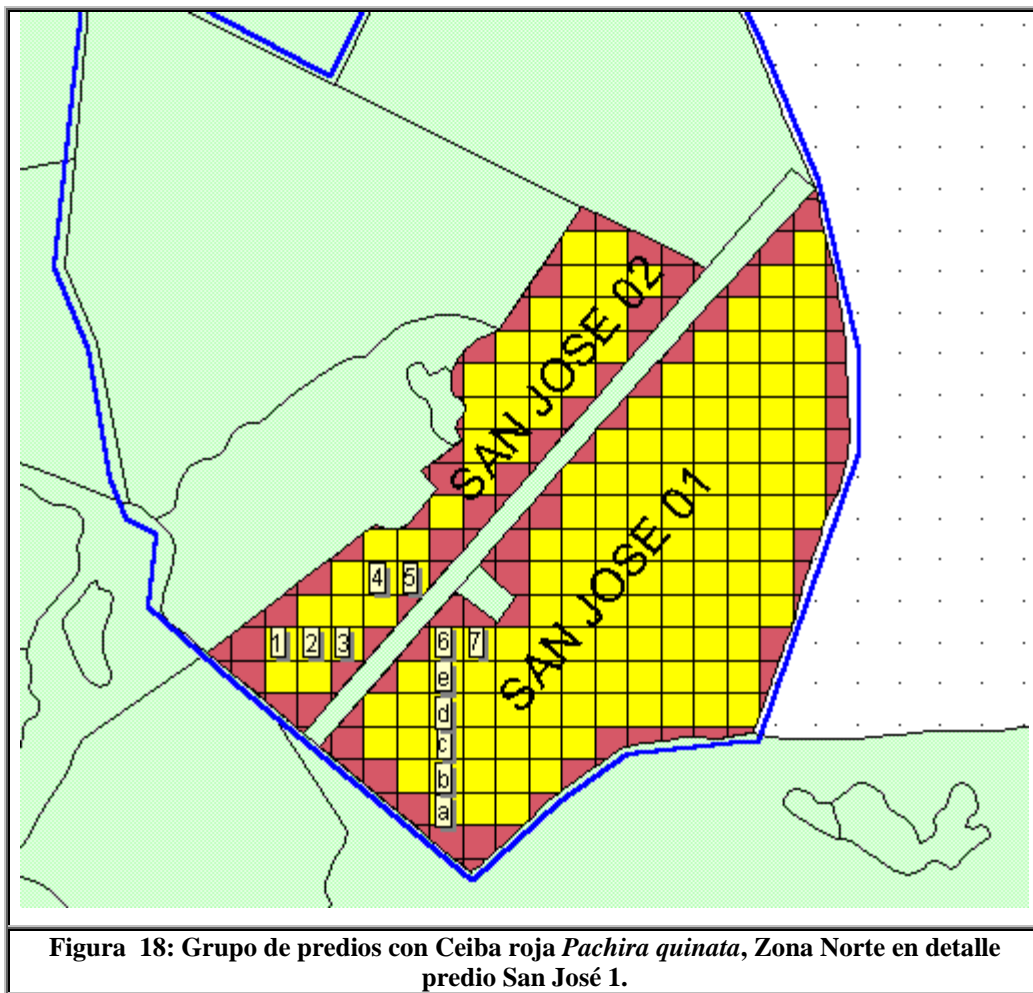


Figura 17: Grupo de predios con Ceiba roja *Pachira quinata*, Zona Sur en detalle Anadaluz 16 y 17.

En el *Figura 18* se observa, el segundo grupo denominado Zona Norte, conformado por el lote San José 01. Donde se observa la numeración similar a la zona sur con codificación numérica horizontal y alfabética vertical.

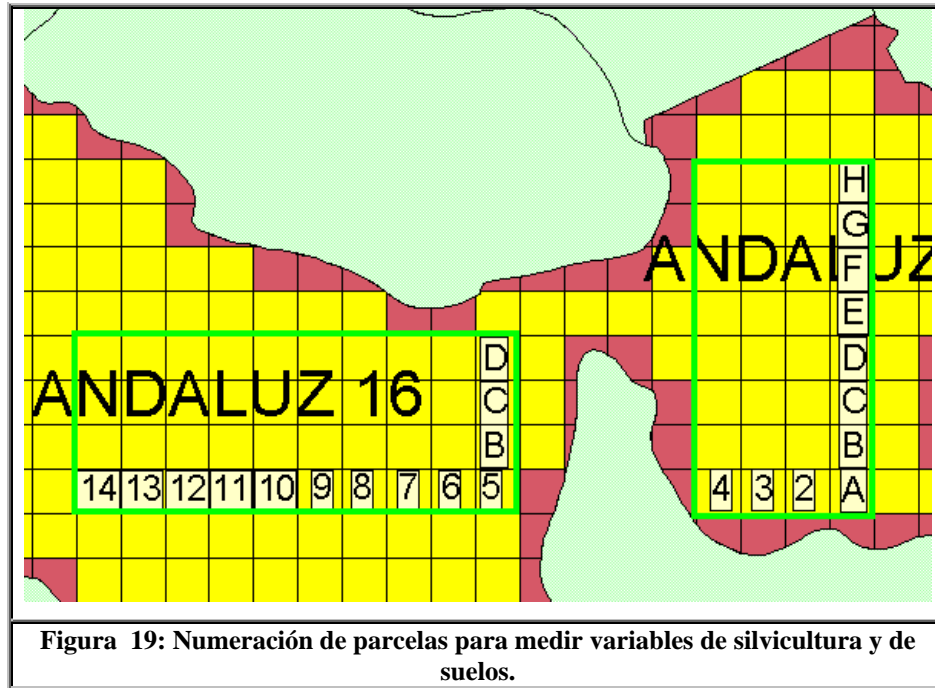


Las subparcelas tienen una dimensión de 60m X 60m correspondiente a cuatro píxeles de la imagen de satélite Landsat 9-53 del 10 de Enero de 2006, con el fin de realizar un análisis de correlación con las respuestas de las bandas electromagnéticas (azul, verde, roja, infrarroja cercana e infrarroja media), véase más adelante en la *Figura 35*.

Como se mencionó, los cuadrantes se codifican, las filas con letras y las columnas con números, como se muestra con mejor detalle en el *Figura 19*.

La demarcación de los cuadrantes de la grilla, la ubicación de los puntos de referencia forestal y los puntos de las observaciones de comprobación mediante barrenadas y calicatas, se realizó con ayuda de GPS (donde se pudo recibir señal, con error por debajo de 8 m), o con cinta y Brújula, asegurando su correcto trazado y georeferenciación.

A partir de la evaluación in situ de las muestras de suelo, se determinaron las zonas a las que se aplicó el muestreo detallado mediante el uso de calicatas, puntos de medición para infiltración y puntos para conductividad hidráulica a una distancia no mayor a 1 metro del punto centro del bloque.



En todos los centros de cuadrantes se colocó una estaca y se rotuló, como se muestra más adelante, donde se hicieron además de las observaciones mediante el barrenado y las calicatas del suelo, las mediciones forestales, las dos primeras en los sitios seleccionados únicamente (ver ítems siguientes).

4.6.2. MUESTREO DE SUELOS

Las observaciones de comprobación se llevan a efecto con el barrenado o en cortes existentes en el terreno (taludes de carretera, excavaciones siguientes o cárcavas); el objetivo de esta observación es identificar las unidades taxonómicas y de mapeo que han sido caracterizadas y definidas previamente mediante observaciones detalladas o las descripciones de perfiles en calicatas (Cortes y Malagón, 1984). Sin embargo para los efectos de la presente investigación las observaciones se utilizaron para identificar cambios y así seleccionar mejor los sitios de las calicatas.

Se hicieron 2 calicatas con 12 cilindros una en el grupo Zona Norte y otra en el grupo Zona Sur, estas calicatas permitieron conocer los perfiles de algunas variables de propiedades de física de suelos, en cada zona.

Se hicieron Calicatas con 2 cilindros (Figura 26) a 30 cm de profundidad en los bloques A1, B3, D2, D4, F3, G1 y H4 en Andalucía 17 y los bloques A5, A9, A11, B14, C10, C12, D6, D8 y D14 en Andalucía 16.

Se hicieron pruebas de Infiltración en los bloques A1, B3, D2, D4, F3, G1 y H4 en Andalucía 17 y los bloques A5, A9, A11, B14, C10, C12, D6, D8 y D14 en Andalucía 16.

Paralelamente también se realizaron pruebas de Antibisser en los bloques A1, B3, D2, D4, F3, G1 y H4 en Andalucía 17 y los bloques A5, A9, A11, B14, C10, C12, D6, D8 y D14 en Andalucía 16.

4.6.3. PROCEDIMIENTOS Y ANALISIS EN CAMPO DE SUELOS

En cada cuadrante se realizó una perforación hasta 120 cm de profundidad con un barreno holandés (*Figura 20*), para la identificación inicial de las características fundamentales de los diferentes tipos de suelo como son: Color, Textura, Consistencia y Plasticidad. Cada punto de barrenado es codificado y sus características particulares son registradas en la planilla correspondiente.

En las *Figuras 21 y 22* se observa las muestras de suelos extraídas con barreno y la forma de embalaje y etiquetado.

En el *Anexo 3*, se muestran todas las fotografías de las barrenadas que se hicieron, para seleccionar los sitios de tomas más detalladas como infiltración, densidad real, densidad aparente seca y húmeda, humedad gravimétrica y conductividad hidráulica, como se explica a continuación.





DENSIDAD REAL, APARENTE Y HUMEDAD GRAVIMÉTRICA

Mediante el uso de calicatas se realizó el muestreo detallado en las zonas seleccionadas para tal fin, a partir de la evaluación y clasificación de las planillas de registro de datos in situ de las muestras de suelo extraídas con el barreno.

Las Calicatas grandes tuvieron las siguientes especificaciones: 1 metro de longitud, 1 metro de profundidad (dependiendo de las características del suelo), y 80 centímetros de ancho. Donde se realizó una descripción siguiendo la metodología del Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC, 1990), para cada uno de los dos perfiles del suelo. En cada una de las calicatas se tomaron muestras siguiendo un sentido lineal con 15 cm de separación en forma horizontal y vertical, formando una red a lo largo del perfil de tres por cuatro hileras para un total de 12 muestras en Hachados, y tres por cinco en San José (*Figuras 23 a 25*). Estas calicatas grandes se hicieron con el objeto de conocer los perfiles de las dos zonas de estudio de por lo menos dos de los cuatro lotes muestreados.

El resto de calicatas se hicieron solamente con dos cilindros a 30 cm de profundidad y 15 cm entre cilindros, en los sitios que se explicó anteriormente, donde se tomaron datos de densidad aparente (seca y húmeda), densidad real y humedad gravimétrica.

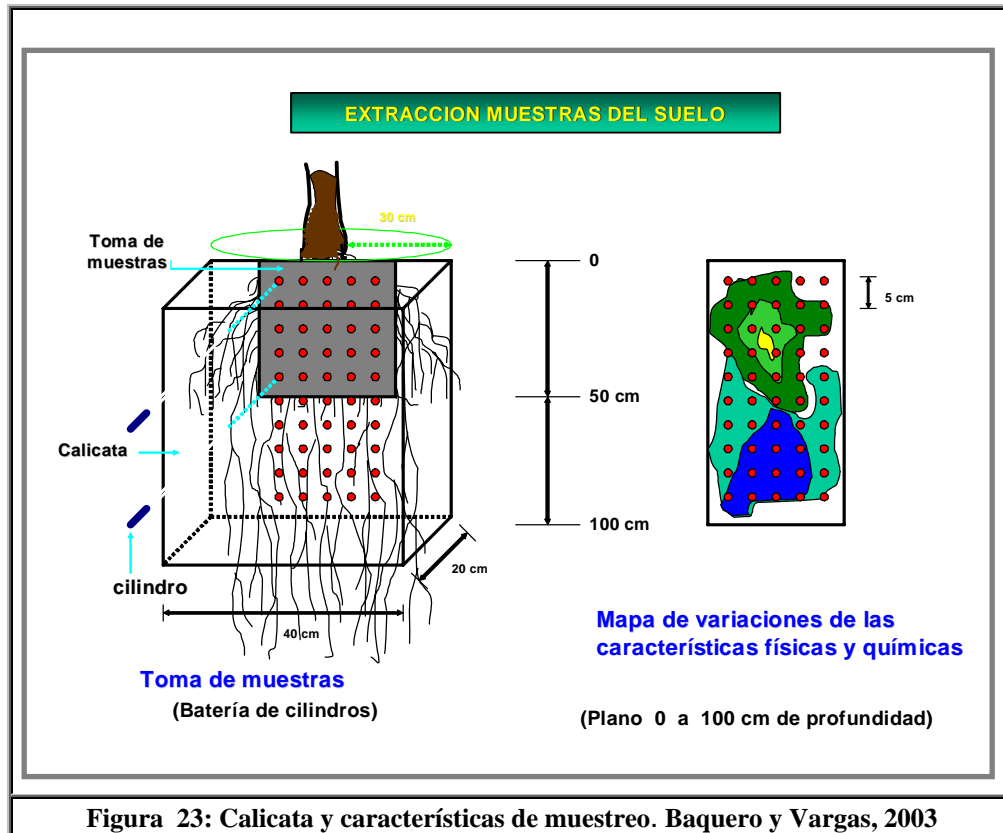


Figura 23: Calicata y características de muestreo. Baquero y Vargas, 2003



Figura 24: Calicata grande con tres muestras de cilindro.



Figura 25: Etiquetado de calicata grande.

Para la toma de las muestras se utilizaron cilindros de acero inoxidable cuyo volumen se determinó previamente, con el cual se tomó una muestra completa (el total del volumen ocupado), y se colocaron en bolsas de color negro con capacidad para un kilo, (Figuras 26 y 27).



Figura 26: Equipo para manipulación de muestras en calicatas.

Adicionalmente, se tuvo en cuenta los datos de precipitación de las estaciones pluviométricas, para los días correspondientes a la toma de datos, con el fin de alimentar la base de datos que proporciona los resultados físicos a obtener.

Cada calicata es codificada y sus características particulares son registradas en la planilla correspondiente.



Figura 27: Extractor de muestras de los cilindros. (Detalle).

INFILTRACIÓN

En las zonas seleccionadas para el muestreo detallado mediante el uso de calicatas pequeñas y grandes, se midió durante un periodo de tiempo el flujo de agua a través de la superficie del suelo, empleando un juego de cilindros o infiltrómetros con una lámina de agua permanente o constante. (Figuras 28 y 29).



Una vez ubicado el sitio no se removerá ni modificara su superficie, y se instalaran los cilindros usando un mazo hasta que hayan penetrado más o menos 15 cm uniformemente. Luego se llenan los cilindros colocando el plástico en el anillo interior, agregando agua dependiendo de la altura de la lámina que se va a mantener (sin que se rebase el agua de un cilindro a otro), IGAC, 1990.

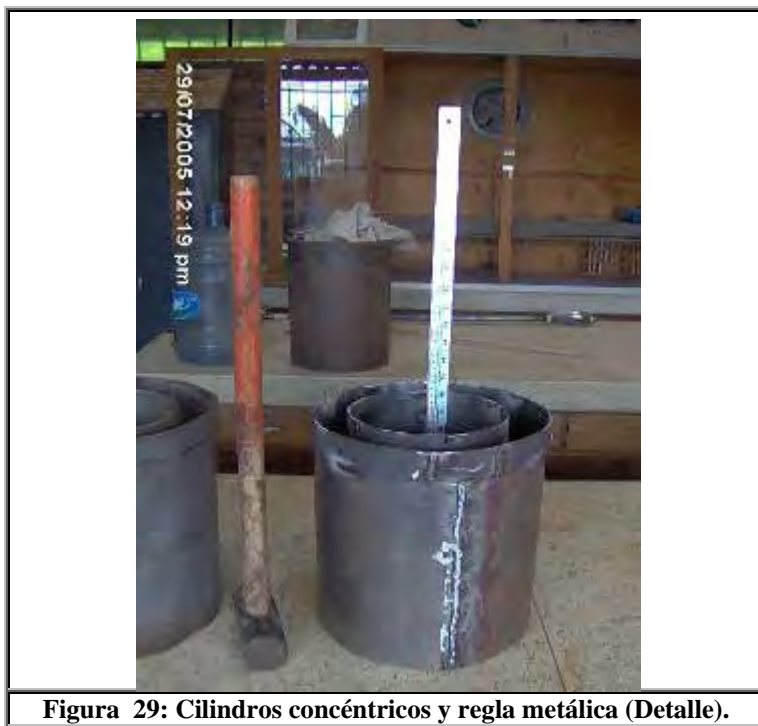


Figura 29: Cilindros concéntricos y regla metálica (Detalle).

A continuación se coloca el abastecedor de agua sobre los cilindros y tres minutos antes de comenzar las lecturas del anillo interior, se agrega agua en el anillo exterior. La medida de la infiltración se determina mediante la lámina de infiltración, observando la cantidad de agua gastada por tiempo hasta el momento en que su gasto se hace constante (IGAC, 1990).

Cada punto de medición para Infiltración es codificado y sus características particulares son registradas en la planilla correspondiente.

CONDUCTIVIDAD HIDRÁULICA

En las zonas seleccionadas para el muestreo detallado mediante el uso de calicatas, se realizó la medición de la conductividad hidráulica con la aplicación del método: ANTIBISSER, *Figuras 30 y 31*.

Luego de perforar el pozo con el barreno de diámetro conocido, se llena con agua y se registra mediante la escala acondicionada al soporte la velocidad a la que el agua se desplaza dentro del pozo, tomando la lectura cada 2 minutos o cada minuto cuando baja muy rápido (IGAC, 1990).



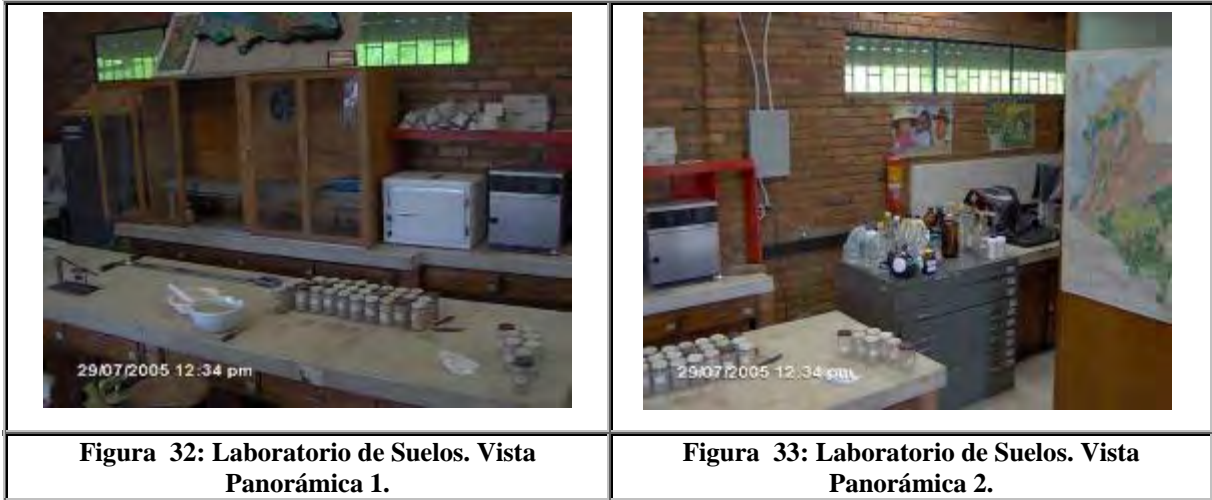
Figura 30: Equipo de Conductividad AntiBisser, elementos principales: listón y bloque de balsa o botella vacía.



Figura 31: Equipo de Conductividad AntiBisser, Aplicación en campo.

4.6.4. ANÁLISIS EN LABORATORIO

El análisis detallado de las muestras obtenidas en campo, se realizó en las instalaciones del Laboratorio de Suelos de la Facultad del Medio Ambiente y Recursos Naturales, Universidad Distrital, Sede Vivero. (Figuras 32 a 34).



DENSIDAD REAL, APARENTE Y HUMEDAD GRAVIMETRICA

Tan pronto como llegaron las muestras al laboratorio se procedió a pesar el material en húmedo manteniendo las cantidades que se toman por cada cilindro, luego se secaron las muestras en estufa a 105 °C durante 24 horas, se pesan en seco con el fin de determinar la humedad, para cada cilindro, este contenido de humedad se determinó mediante la siguiente fórmula:

$$pw = \frac{(pesomuestrahumeda - pesomuestra seca)}{pesomuestra seca} * 100$$

pw= contenido de humedad en porcentaje

Paso seguido se rompieron los agregados del suelo por medio de un rodillo de madera; se descartan los fragmentos de roca mayores a 2 mm de diámetro. La muestra molida se pasó por un tamiz de 2 mm. En este procedimiento se unieron las muestras tomadas en los cilindros por línea (fila) que para el presente trabajo se nombran con letras desde la A hasta la D, y las columnas se nombran con números de uno(1) a diez (3) según la profundidad en cada calicata.

Determinación de la densidad de las partículas o densidad real por el método del picnómetro

El método del picnómetro es el más empleado para medir la densidad de los sólidos o gravedad específica. Consiste en determinar la masa y el volumen de los sólidos del suelo a través de un frasco de volumen conocido (IGAC, 1990).

Materiales y equipos

Picnómetro de 10 o 25 cc con tapa; balanza analítica con aproximación de 0.01 g; campana de vacío; bomba de vacío; termómetro; agua destilada y hervida; suelo tamizado por 2 mm; cápsulas taradas para humedad y formato para registro de datos.

Procedimiento

Se pesó el picnómetro completamente seco (M_{pv}), luego se agrega aproximadamente 1 o 2 gramos de suelo seco a 105°C, tamizado por 2mm; donde se pesó el picnómetro mas el suelo seco (M_{pss}), se agregó agua al picnómetro hasta completar 1/3 de su volumen (el agua utilizada debe ser destilada y hervida para eliminar el aire que se encuentra en el suelo); se llevó el picnómetro destapado a la campana de vidrio y se aplicó vacío durante dos horas para eliminar las burbujas de aire; se retira el picnómetro de la campana de vacío y agregó agua hasta 2/3 del volumen del picnómetro y se llevó nuevamente al vacío durante una hora. Se llenó de agua por completo, se tapó, y pesó (M_{pssw}); se vació y lavó el contenido, se llenó con agua destilada y hervida, se tapó y pesó (M_{pw}). Luego se remplazaron estas variables en la fórmula para calcular la densidad real (IGAC, 1990).

Cálculos

Los cálculos se hicieron a partir de la siguiente relación:

$$D_s = \frac{(M_{pss} - M_{pv}) * D_w}{(M_{pw} - M_{pv}) - (M_{pssw} - M_{pss})}$$

$$D_s = \frac{M_{ss}}{V_{wns} - V_{wcs}} = \frac{M_{ss}}{V_{ss}}$$

Donde: D_s es la densidad de las partículas o densidad específica, g/cc; M_{pss} es la masa del picnómetro más suelo seco a 105 °C, en g; M_{pv} es la masa del picnómetro vacío y seco, en g; M_{pw} es la masa del picnómetro más agua en g; M_{pssw} es la masa del picnómetro más agua, mas suelo seco, en g y D_w es la densidad del agua. En la segunda ecuación queda remplazado por M_{ss} masa de suelo seco, en g; V_{wns} es el volumen del agua sin suelo, en cc; V_{wcs} es el volumen del agua con suelo, en cc; V_{ss} es el volumen de suelo seco en cc.

POROSIDAD

La densidad real y la densidad aparente en seco se calcularon para obtener la porosidad del suelo, por medio de las interpretaciones de las relaciones masa volumen.

4.6.5. ANÁLISIS DE LA IMAGEN LANDSAT

La georeferencia de la imagen Landsat del 10 de enero de 2006, se hizo a partir de puntos GPS (con un margen de error de 5 a 8 m, muy adecuado para escala 1:25.000) localizados en los ejes entre cruce de vías, o cruce de vía y río, corroborando la precisión de éstos cruces en la cartografía base, donde se obtuvieron una serie de puntos para georeferenciar la imagen con las coordenadas de la cartografía de la información suministrada por Pizano S.A. (correspondiente a elipsoide Observatorio Bogotá con proyección conforme a Gauss con Datum Bogotá). El error de georeferencia estuvo por debajo de los 5 m. Esta georeferencia se le hizo control de calidad revisando que los cuerpos de agua vías y demás elementos cartográficos evidentes en la imagen satelital fueran concordantes con la información de los predios, garantizando una georeferenciación adecuada para la escala de trabajo, *Figura 35*.

De cada pixel se extrae el valor de cada una de las 5 bandas electromagnéticas utilizadas. De las cuales son muy utilizadas para los índices de vegetación la Banda 3 (rojo) y banda 4 (infrarojo cercano). Según Díaz y Presutti (2009) los resultados sugieren que la banda 4 (NIR) es sensible a los cambios en la humedad de los residuos vegetales y/o del suelo, por lo que las precipitaciones en frecuencia e intensidad, ocurridas antes de la fecha de adquisición, podrían tener un impacto sobre la radiancia registrada por el satélite en esta banda. Es importante tener en cuenta que la imagen trabajada es del 10 de enero de 2006 y por tanto se encuentra en período seco, generando pérdida parcial del follaje de la Ceiba roja, lo que pudo afectar el valor espectral analizado, sin embargo, la imagen expresó una respuesta muy particular de la Ceiba roja, pese a las condiciones climáticas, lo que favoreció en una adecuada utilización de la misma.

ÍNDICES DE VEGETACIÓN

Jensen (2000) define los índices de vegetación como aquellas medidas radiométricas adimensionales, que funcionan como indicadores de la abundancia relativa y actividad de la vegetación verde, incluyendo también indicaciones relativas al índice de área foliar (LAI), el porcentaje de cubierta vegetal verde, el contenido en clorofila, la biomasa verde, o la radiación activa fotosintéticamente absorbida. A lo largo de décadas se han ido proponiendo nuevos índices espectrales para el estudio de la vegetación, fruto de ello es el gran número de expresiones que se pueden encontrar en la literatura especializada. Navarro et al (2006) indica que todas las formulaciones de los índices de vegetación son

presentados en su adaptación para ser calculados con datos procedentes del sensor Landsat. Para la presente investigación se han utilizado cuatro índices que reportan información relativa a la biomasa y verdor de la vegetación y/o humedad de la misma. Una breve descripción de los mismos se presenta a continuación. Dos de ellos buscan incluir información biofísica relacionada con la respuesta foliar (OSAVI y SAVI).

Normalized Difference Vegetation Index (NDVI).

La formulación original del NDVI es atribuida a Rouse et al., (1974). Este índice ha sido y es ampliamente utilizado, estando basado en un intento de realzar las diferencias en la reflectividad entre las regiones espectrales de rojo y del NIR (infrarrojo cercano) para firmas espectrales características de la vegetación y atribuibles a la estructura interna de las hojas (Jensen, 2000). El NDVI se formula mediante la siguiente expresión:

$$NDVI = \frac{\rho_{TM4} - \rho_{TM3}}{\rho_{TM4} + \rho_{TM3}}$$

Donde, TM4 es el valor de la banda 4 (infrarojo) y TM3 en el valor de la banda 3 (rojo visible). NDVI se relaciona entre otros parámetros con (Chuvienco, 2002): productividad meta de la vegetación, contenido en clorofila de la hoja, LAI, contenido en agua de la hoja, etc.

Optimized Soil Adjusted Vegetation Index (OSAVI).

El índice de vegetación OSAVI es encuadrado dentro de la familia de índices con ajuste para el efecto del suelo, cuya expresión general es (Rondeaux et al., 1996):

$$VI = \frac{(NIR - R)}{(NIR + R + X)}$$

Rondeaux et al. (1996) estimaron el valor óptimo del factor de corrección X en 0,16. mediante el empleo de reflectancia bidireccional. Posteriormente Steven (1998) evaluó el índice bajo las condiciones impuestas por parámetros observacionales reales. OSAVI se formula mediante la siguiente expresión:

$$OSAVI = \frac{\rho_{TM4} - \rho_{TM3}}{\rho_{TM4} + \rho_{TM3} + 0,16}$$

OSAVI está especialmente indicado para la monitorización agrícola y reporta información biofísica de la vegetación análoga al NDVI.

Soil Adjusted Vegetation Index (SAVI).

Al igual que para el caso del índice anterior, el SAVI resulta de la modificación del NDVI mediante la adición de una factor de ajuste del suelo (L) (Huete, 1988; Huete et al., 1992). El valor de L varía dependiendo de las características del suelo y es índice se formula como:

$$SAVI = \frac{(\rho_{TM4} - \rho_{TM3})}{(\rho_{TM4} + \rho_{TM3} + L)} \cdot (1 + L)$$

Huete (1988) sugiere un valor de L igual a 1 para áreas con poca vegetación, un valor de L igual a 0.5 para áreas intermedias, y un valor de L igual a 0.25 para áreas con vegetación densa. SAVI reporta información similar al NDVI al respecto de los parámetros biofísico con los que se relaciona.

Simple ratio (SR)

Según Diaz y Presutti (2009), la formula de este indicador es la siguiente:

$$SR = bc4/bc3$$

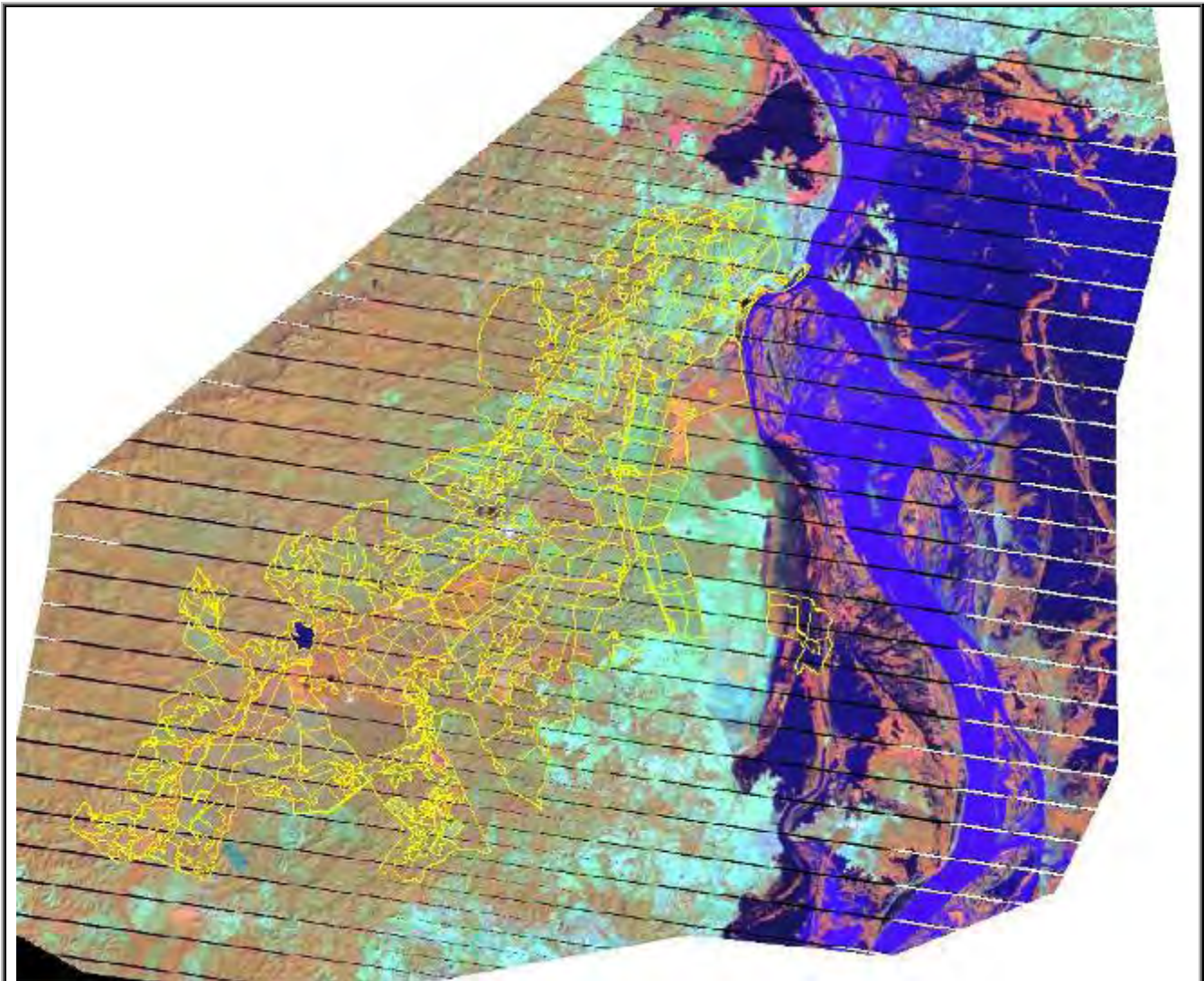


Figura 35: Subescena de imagen Landsat 9-53 del 10 de Enero de 2006 combinación RGB 4-5-3 Hacienda Monterrey Zambrano (Bolívar). Fuente: Landsat y Pizano S.A. 2007

4.6.6. DATOS DE VEGETACIÓN E INVENTARIO FORESTAL (DASOMETRÍA)

La metodología aplicada para la recolección de la información en campo se basó en el Muestreo Sistemático.

En los sitios seleccionados para el muestreo (cuadrantes), se ubicó el punto de referencia para las parcelas del inventario forestal en el centro de cada cuadrante. Desde ese punto se tomaron los datos de los tres árboles de Ceiba roja más cercanos (Figura 36). Esta metodología no es la usualmente trabajada para los inventarios forestales, los cuales se hacen para obtener datos promedio por hectárea y no para obtener los datos dasométrico de un punto específico, como se planteó para esta tesis.

Los Latizales son arbolitos con alturas mayores a 1.50 m y un diámetro a la altura del pecho (DAP) de 5 a 10 cm, y los Fustales son árboles establecidos con un DAP superior a los 10 cm. Para este inventario sólo se tuvieron en cuenta los fustales.

Las variables registradas en campo para los fustales fueron: altura total, altura comercial, DAP, distancia al centro de la parcela. Otras datos se tomaron como diámetro de copa, densidad de copa y estado fitosanitario, con el objeto de analizar y ajustar los datos en caso de una inconsistencia.



Figura 36: Centro de bloque de Muestreo Forestal.

En general el Inventario Forestal contempla actividades como georeferenciación, marcación, registro en planillas de campo, toma de fotografías y ubicación en planos, como se describe a continuación:

MARCADO DE LOS INDIVIDUOS

En cada parcela de muestreo se marcara el centro con una estaca para la identificación de la superficie a intervenir (*Figura 37*), luego se colocaran placas numeradas a los dos individuos ubicados alrededor del punto central de la parcela para una fácil ubicación de la misma en el terreno (*Figura 38*).



Figura 37: Placas de Aluminio en las estacas para la marcación de los Bloques de Muestreo.



Figura 38: Placas de Aluminio para la marcación de los árboles más cercanos al centro del Bloque. Fuente: Tesis

MEDICIONES FORESTALES

Una vez se marcaron los individuos se procedió al diligenciamiento de los formatos de Registro de Datos en Campo, determinando los siguientes aspectos:

- *Altura Total*: altura desde la base hasta la punta ubicada en la última rama. Medida y expresada en metros. Se midió con el equipo Vertex (*Figura 40 y 41*).
- *Altura comercial*: altura a la que se encuentra la primera ramificación, Medida y expresada en metros. Se midió con el equipo Vertex (*Figura 40 y 41*).
- *Diámetro a la altura del pecho-DAP*: medida del diámetro del fuste a 1.30 m de altura de su base, se determina utilizando Forcípula que indica el valor en centímetros, para luego hacer la conversión a metros y realizar el cálculo del Volumen (*Figura 39*).
- *Distancia al centro de la parcela*: distancia en línea recta del centro de la parcela a cada uno de los tres individuos más cercanos (con cinta métrica, en centímetros).



Figura 39: Forcípula para la medición del Diámetro a la altura de pecho.



Figura 40: Vertex para la medición digital de alturas.



Figura 41: Prisma para lectura láser del Vertex.

UBICACIÓN EN PLANOS Y CÁLCULOS

Las parcelas fueron ubicadas a partir de los puntos de navegador GPS (Sistema Global de Posicionamiento) que se tenían con buena señal, es decir donde se tomó puntos en 3D con precisión menor de 8 ó 10 metros. Estos puntos se unieron y se armó la malla a partir de las medidas cada 60 metros que se tenía en cada cuadrante, concordante con las parcelas de suelos, la imagen satelital Landsat y la precipitación, que ya se explicaron. Luego cada punto se codificó según los croquis levantados en campo y se les vinculó la base de datos forestal o dasométrica asociada a cada punto.

Se calculó el volumen total y el volumen comercial de cada árbol con la siguiente fórmula: La ecuación de volumen con corteza es:

$vcc = a(d \exp b)(h \exp c)$, donde:

$a = 1,049145 \times 10 \exp -4$

$d =$ diámetro

$b = 1,750088$

$h =$ altura

$c = 0,848563$

Estos datos fueron suministrados por Pizano S.A. y Monterrey Forestal Ltda. Exclusivos para Ceiba roja en sus plantaciones. La altura total se aplicó en volumen total y la altura comercial para volumen comercial.

4.6.7. ANÁLISIS DE DATOS

Los análisis de datos se realizaron para cada una de las variables de cada temática: suelos, dasometría, respuesta espectral y precipitación. Con el objeto de obtener los datos representativos de las mismas, para cada punto y de ésta manera tener la información pertinente para realizar los análisis estadísticos que sustentan los geoestadísticos (ver resultados).

ANÁLISIS DE DATOS DE SUELOS

Con las muestras y datos de suelos tomados en campo, se llevaron al laboratorio de suelos de la Universidad Distrital⁸, obteniéndose datos de 4 predios Andaluz 16, Andaluz 17, San José 1 y Hachados 2 (*Anexo 4*). Las variables de suelos obtenidas fueron 20, como se observa en la *Tabla 8*.

En variables como humedad gravimétrica, densidad aparente seca y húmeda y densidad real se obtuvieron dos datos por sitio los cuales fueron promediados.

Las variables edáficas fueron modificadas, excluidas e incluidas. La capacidad de intercambio catiónico obtenida en laboratorio fue excluida y se incluyó la capacidad de intercambio catiónico efectiva (debido al tipo de suelo que se está manejando), la suma

⁸ Laboratorio especializado en suelos forestales liderado por el Ing. Forestal Miguel Cadena PhD en suelos

de bases fue excluida, el carbono orgánico oxidable, es un dato de laboratorio con el cual se obtiene el carbón orgánico total, por lo que se excluyó y porque un contenido de carbón orgánico es representativo de un porcentaje de materia orgánica, siendo la misma determinada por un producto del C.O. y un factor; por ende se encuentran autocorrelacionados y debe excluirse; el porcentaje de arenas se excluyó ya que este correlacionaba de manera muy similar al porcentaje de arcillas, pero de forma negativa. La humedad gravimétrica se excluyó debido a que esta representa el contenido de humedad en un momento dado, que es determinado por las condiciones ambientales y edáficas, para tener una medida sobre este tema es mejor involucrar variables como las curvas de retención de humedad. La densidad real y la densidad aparente en seco se modificaron para obtener la porosidad del suelo, por medio de las interpretaciones de las relaciones masa volumen.

Abreviatura	Unidad	Nombre	Método
pH	Un	Potencial de Hidrogeniones	Relación 1:1 Agua – Suelo
CIC	Meq/100 gr	Capacidad de Intercambio Catiónico	Extracción Acetato de Amonio
SB	%	Bases intercambiables	Acetato de amonio 1 N - Absorción Atómica
Ca	Meq/100 gr	Calcio	Acetato de amonio 1 N - Absorción Atómica
Mg	Meq/100 gr	Magnesio	Acetato de amonio 1 N - Absorción Atómica
K	Meq/100 gr	Potasio	Acetato de amonio 1 N - Absorción Atómica
Na	Meq/100 gr	Sodio	Acetato de amonio 1 N - Absorción Atómica
MO	%	Materia orgánica	Método de Walckley - Black
COO	%	Carbono orgánico oxidable	Método de Walckley - Black
CO	%	Carbono orgánico total	Método de Walckley - Black
P	Ppm	Fósforo	Bray y Kurtz No. II
AR	%	Arcilla (Textura)	Método del Bouyoucos
L	%	Limo (Textura)	Método del Bouyoucos
A	%	Arena (Textura)	Método del Bouyoucos
HG	%	Humedad Gravimétrica	Anillos. Relación masa de agua – masa de sólidos
DAS	gr/cc	Densidad aparente Seco	Anillos
DAH	gr/cc	Densidad aparente Húmedo	Anillos
DR	gr/cc	Densidad Real	Picnómetro
IN	Cm/hora	Infiltración	Cilindros Concéntricos
CH	Cm/hora	Conductividad Hidráulica	Anti – visser

Tabla 8: Propiedades de suelos obtenidas. Anexo 4. Laboratorio de suelos de la Universidad Distrital, 2006

Estas propiedades se ajustaron para así obtener las variables finales que se incluyeron en el análisis estadístico, donde después de varias iteraciones o intentos con diferentes juegos de estas variables o sus modificaciones, se obtuvo el mejor resultado de separación de grupos, con las variables que finalmente se dejaron. De los 38 registro de datos de suelos finalmente se trabajaron con 31 que tenía todos los datos con respecto a las demás temáticas (Anexo 5), ver resultados estadísticos.

ANÁLISIS DE DATOS DASOMÉTRICOS

Se aplicó el método de inverso a la distancia y se estableció un promedio entre los tres datos de cada sitio de muestreo a partir de los 3 árboles más cercanos, generando un

volumen virtual para cada punto centro de cada cuadrante, donde se obtuvieron cinco variables forestales volumen total, volumen comercial, altura total, índice de sitio e incremento medio anual, para 138 sitios de muestreo, en 4 predios midiendo 414 árboles de Ceiba roja, de los cuales fueron efectivos 127 sitios, (*Anexo 6*). De las cuales se dejaron dos variables (volumen total e índice de sitio), la razón por la cual se dejaron éstas en el análisis estadístico, fue porque el volumen comercial se correlaciona con el volumen total, la altura total tiene involucrada la edad por lo cual no se puede correlacionar, ya que de partida tiene un factor diferenciador que puede enmascarar resultados y el incremento medio anual-IMA se descartó, ya que éste es obtenido a partir de la ecuación de índice de sitio y por lo cual se autocorrelacionan.

ANÁLISIS DE DATOS ESPECTRALES

Se tomaron los valores correspondiente al valor del pixel de la imagen Landsat del 10 de enero de 2006, para cada punto de muestreo y para cada una de las 5 bandas electromagnéticas, banda 1 (visual azul), banda 2 (visual verde), banda 3 (visual rojo), banda 4 (infrarrojo cercano) y banda 5 (infrarrojo medio).

Esta información se tabuló relacionando los valores de los 127 puntos dasométricos con los valores de las bandas electromagnéticas que contenían la información completa. Del mismo modo se relacionó los valores de las bandas y la dasometría, con los 31 puntos con datos de suelos completos, y como se explica a continuación con los valores de la precipitación en cada punto. Permitiendo obtener una base de datos completa para realizar los respectivos análisis estadísticos (*Anexo 6*).

ANÁLISIS DE DATOS DE PRECIPITACIÓN

A partir del mapa de precipitación obtenido, se interceptó espacialmente con los puntos de muestreo dasométricos y de suelos, y se estableció el valor de la precipitación media anual correspondiente a cada punto. Esta variable enriquece el modelo, en el sentido de que se tenían datos de suelos (físicos, químicos y orgánicos), datos forestales (dasométricos) y datos espectrales (bandas electromagnéticas), faltando datos referentes a clima y el más representativo y diferenciador dato es el de precipitación media anual y puesto que se contaba con la información con un nivel de detalle suficiente y adecuado para la escala, se incluyó en el análisis estadístico (*Anexo 6*).

5. RESULTADOS

Los resultados del estudio se presentan en ocho partes: 1) análisis exploratorio de variables dasométricas, espectrales y precipitación⁹ de la muestra grande (con 127 puntos), 2) análisis exploratorio de variables dasométricas, edáficas, espectrales y precipitación de la muestra pequeña (con 31 puntos), 3) correlaciones encontradas de la muestra grande, 4) correlaciones encontradas de la muestra pequeña, 5) análisis estadísticos multivariados de la muestra grande, 5) análisis estadísticos multivariados de la muestra pequeña, 7) interpretación de datos estadísticos, y 8) variabilidad espacial. La muestra grande con 127 datos completos, se obtiene de los datos de menor costo o aquellos obtenidos de manera costo efectiva, como el inventario forestal, el espectro y la precipitación, mas no quiere decir que sean de menor importancia en el modelo encontrado. La muestra pequeña es un subgrupo seleccionado de estas mismas variables anteriores, pero que cuentan con los datos de las variables edáficas de propiedades tanto físicas como químicas, las cuales tienen alto costo, obteniendo 31 puntos efectivos con todos los datos completos. Tanto la muestra grande como la pequeña están distribuidos en los tres grupos muestreados (Andaluz, Hachados y San José), que se encuentran en tres tipos de suelos, donde se localiza el 89,42% de la Ceiba roja (4.567 ha).

5.1. ANALISIS EXPLORATORIO DE VARIABLES DASOMÉTRICAS, ESPECTRALES Y PRECIPITACIÓN (MUESTRA GRANDE)

En la Tabla 9, se presentan las estadísticas descriptivas de las variables estudiadas de la muestra grande. Donde se identifican 4 grupos los datos¹⁰: dasométricos, climáticos, espectrales, e índices de vegetación.

Los coeficientes de variación de las variables dasométricas varía son de 21% y 13%, el primero referente al *volumen total*, el cual no fue tan alto dado que el rango de volúmenes si lo fue. Este coeficiente de variación el más alto con el 40% lo tiene *precipitación*, lo que indica que puede ser una variable claramente diferenciadora; el espectro presentó variaciones entre 16% y 23%, donde la *banda 3* tuvo el menor valor y la *banda 4* presentó la mayor variación, siendo las dos bandas utilizadas para determinar los índices de vegetación, los cuales se mantienen datos similares en 19%. Aunque la *banda 5*, presenta la mayor desviación estándar también presenta el mayor rango entre sus datos. El coeficiente de variación como la desviación estándar de las *bandas 1 y 2* resultan ser muy similares, aunque su rango presente valores diferentes, además de ser bandas del espectro donde no se resalta la vegetación, por tanto se descartan en análisis posteriores, lo que coincide con Hall et al, 2006.

⁹ Variable que al incorporarse al modelo metodológico permite mejorar la diferenciación de grupos (subcapítulo 5.5) lo que permitió concluir que la sensibilidad de la misma es significativa.

¹⁰ 1) dasométricos (VT= Volumen Total, IS=Índice de Sitio; 2) climáticos (PMM= precipitación media anual en mm); 3) espectrales (5 bandas electromagnéticas, B1=banda 1 (visual azul), B2=banda 2 (visual verde), B3=banda 3 (visual rojo), B4=banda 4 (infrarrojo cercano) y B5= banda 5 (infrarrojo medio); y 4) índices de vegetación (NDVI= Normalized Difference Vegetation Index, OSAVI= Optimized Soil Adjusted Vegetation Index, SAVI= Soil Adjusted Vegetation Index y SR= Simple Ratio).

La matriz de los datos de las variables de la muestra grande para los 127 puntos se observa en el *Anexo 6*.

Estadíst.	Variables											
	VT	IS	PMM	B1	B2	B3	B4	B5	NDVI	OSAVI	SAVI	SR
N	127	127	127	127	127	127	127	127	127	127	127	127
máximo	0,47	22,83	1047,73	75	58	63	71	109	0,288	0,288	0,360	1,811
Mínimo	0,10	8,30	726,03	64	48	37	52	74	-0,096	-0,096	-0,119	0,825
DE	0,08	1,91	127,32	2,33	2,20	4,10	4,42	6,62	0,072	0,072	0,090	0,187
CV (%)	21,17	13,17	39,58	21,17	21,96	15,75	23,25	18,91	18,859	18,860	18,861	18,934
Promedio	0,25	13,90	825,07	69,44	53,24	49,31	60,62	89,37	0,103	0,103	0,128	1,244
Unidad	m3	m	mm	unidad	Unidad	unidad	unidad	unidad	índice	Índice	índice	índice

Tabla 9. Estadísticas descriptivas de las variables estudiadas (muestra grande), Zambrano (Bolívar).

Los valores NDVI, OSAVI y SAVI fueron relativamente bajos dado que la imagen fue tomada en enero que corresponde a la época más seca del año (*Figura 12*), en donde la Ceiba roja pierde gran cantidad de sus hojas. De ahí la importancia de tomar otros índices donde refuerzan las características biofísicas como el OSAVI y SAVI, donde en este último la desviación estándar aumentó, lo que puede significar una respuesta adicional del espectro a las condiciones biofísicas o ecofisiológicas, lo que coincide con Yabra y Chuvieco (2008).

5.2. ANALISIS EXPLORATORIO DE VARIABLES DASOMÉTRICAS, EDÁFICAS, ESPECTRALES Y PRECIPITACIÓN (MUESTRA PEQUEÑA)

En la *Tabla 10*, se observan las estadísticas de las variables estudiadas de la muestra pequeña. Donde se identifican 5 grupos de datos: dasométricos, edafológicos¹¹, climáticos, espectrales e índices de vegetación.

De las variables analizadas en la muestra grande la dasometría aumenta el coeficiente de variación especialmente el *índice de sitio*, dado que su rango disminuye por el menor número de puntos. La *precipitación* se mantiene muy similar, así como los índices de vegetación aunque su coeficiente de variación aumenta en 4 puntos porcentuales por la misma razón que el *índice de sitio*. Los datos más cambiantes son los relacionados con las bandas aunque la desviación estándar en general mantuvo sus proporciones y el coeficiente de variación aumento por la misma razón ya explicada, especialmente en la *banda 3*, con más de 7 puntos porcentuales.

Respecto a las variables edafológicas de propiedades químicas presentaron un coeficiente de variabilidad entre el 20% y el 26% (*Tabla 10*). El *pH* a excepción de 3 puntos muestreados, estuvieron dentro del rango adecuado para la Ceiba roja (*Anexo 5*), dado que soporta suelos ligeramente ácidos con tendencia a la neutralidad. El *CICE*

¹¹ Edafológicos: pH, CICE= Capacidad de Intercambio Catiónico Efectiva, Ca= calcio, K= potasio, Mg= magnesio, Na= sodio, CO= carbono orgánico, P= fósforo, L= limo, Ar= arcilla, INFIL= infiltración, CH= conductividad hidráulica, DAH= densidad aparente húmeda, y POR= porosidad.

presentó en todos los puntos valores altos. El *calcio* y el *magnesio* el coeficiente de variabilidad es similar, y como bases intercambiables resultaron en todos los puntos con valores altos, pero como saturación de bases el *calcio* presentó valores medios altos e ideales y el *magnesio* en todos los puntos valores altos, aunque su relación Ca/Mg resultó baja en la mayoría de los puntos (*Anexo 5*). El *potasio* presentó como base intercambiable en la mayoría de puntos valores altos, pero por lo contrario en saturación de bases valores resultaron en su mayoría bajos. El *sodio* igual que el *potasio* en su mayoría valores altos en las bases intercambiables, pero en la saturación de bases valores bajos, medios, altos e ideales, lo que no representa estar en suelos sódicos (*Anexo 5*). El contenido de materia orgánica en la mayoría de puntos se presentó valores bajos a excepción de 3 puntos con valores medios. El fósforo presentó en su mayoría valores altos a excepción de 3 puntos y el coeficiente de variabilidad es el más bajo de las propiedades químicas del suelo (*Anexo 5*).

Las propiedades físicas del suelo presentaron datos entre 23 y 29% de coeficiente de variación (*Tabla 10*). La porosidad presenta valores medios e ideales a excepción de 2 puntos. La textura toda es arcillosa a excepción de un punto con suelos francos (*Anexo 5*).

Variables														
Estadíst.	VT	IS	PH	CICE	CA	K	MG	NA	CO	P	L	AR	INFIL	CH
n	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31
máximo	0,43	16,70	7,72	51,78	36,35	2,17	16,65	7,12	2,15	161,75	23,32	83,96	75,95	2,09
mínimo	0,10	9,00	5,03	21,52	10,78	0,15	5,06	0,11	0,28	6,80	9,03	28,36	0,00	0,00
DE	0,08	1,69	0,57	7,93	6,31	0,47	2,44	1,67	0,39	31,46	3,35	13,51	19,43	0,60
CV(%)	25,53	21,92	21,16	26,20	24,68	23,49	21,03	23,79	20,88	20,31	23,45	24,30	25,59	28,84
Promedio	0,26	13,91	6,50	39,58	24,99	0,89	11,28	2,42	0,70	87,89	17,11	66,69	12,75	0,43
unidad	m3	m	Un	Meq/100gr	Meq/100gr	Meq/100gr	Meq/100gr	Meq/100gr	%	Ppm	%	%	Cm/hora	Cm/hora

Variables													
Estadíst.	DAH	POR	PMM	B1	B2	B3	B4	B5	NDVI	OSAVI	SAVI	SR	
N	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	
Máximo	1,81	59,00	1046,43	73	58	56	69	100	0,25	0,25	0,32	1,68	
Mínimo	1,56	38,33	727,13	65	50	41	53	76	-0,02	-0,02	-0,02	0,96	
DE	0,07	5,79	123,27	2,14	1,98	3,53	3,80	5,46	0,06	0,06	0,08	0,16	
CV(%)	27,52	27,99	38,61	26,77	24,73	23,54	23,76	22,73	22,88	22,88	22,88	22,36	
Promedio	1,66	47,92	817,25	69,42	53,23	49,00	60,45	88,65	0,10	0,10	0,13	1,24	
Unidad	gr/cc	%	mm	unidad	unidad	unidad	unidad	unidad	índice	índice	índice	Índice	

Tabla 10. Estadísticas descriptivas de las variables estudiadas (muestra pequeña), Zambrano (Bolívar).

5.3. CORRELACIONES ENCONTRADAS ENTRE VARIABLES DASOMÉTRICAS, ESPECTRALES Y PRECIPITACIÓN (MUESTRA GRANDE)

Para la muestra grande (127 puntos), las correlaciones entre las variables dasométricas con las espectrales y la precipitación en general fue mayor para el volumen total que para el índice de sitio. En volumen total correlacionó con significancia al 0.01 con la variable precipitación (PMM) y las bandas 1, 2, 3 y 5 de manera positiva y con la banda 4 y todos índices de manera negativa. Lo anterior debido a que la banda 1 (0,4-0,5 μ m) como azul visible, se usa para discriminar suelo de vegetación, la banda 2 (0,5-0,6 μ m) como verde visible es utilizada para la identificación de centros poblados y no para vegetación, la banda 3 (0,6-0,7 μ m) como rojo visible se usa para hacer discriminación entre vegetación y otro tipo de coberturas; La banda 4 (0,7-1,2 μ m) como infrarrojo cercano, puede detectar y analizar vegetación en un área, y la banda 5 (1,55-1,75 μ m) como infrarrojo de onda corta, puede discriminar entre especies de vegetación (Nasa, 2004).

El *índice de sitio* correlacionó con las bandas 3 y 5 de manera negativa y con significancia al 0.01 y con las bandas 1, 2 y 4, y los índices con significancia al 0.05; entre las bandas la correlación fue muy alta y aumento con los índices (*Tabla 11*). La correlación de la *precipitación* con el *volumen total* indica una correlación positiva de 0,48 y con el *índice de sitio* no fue significativa. La *precipitación* con las bandas presentaron correlaciones altas y aumentan un poco con los índices a excepción de SR (simple ratio).

	VT	IS	PMM	B1	B2	B3	B4	B5	NDVI	OSAVI	SAVI
IS	0,40										
PMM	0,48										
B1	0,35	-0,20	0,69								
B2	0,32	-0,20	0,68	0,82							
B3	0,38	-0,24	0,68	0,82	0,853						
B4	-0,33	0,17	-0,66	-0,80	-0,744	-0,77					
B5	0,36	-0,27	0,69	0,81	0,854	0,89	-0,79				
NDVI	-0,38	0,22	-0,71	-0,86	-0,850	-0,95	0,93	-0,90			
OSAVI	-0,38	0,22	-0,71	-0,86	-0,850	-0,95	0,93	-0,90	1		
SAVI	-0,38	0,22	-0,71	-0,86	-0,850	-0,95	0,93	-0,90	1	1	
SR	-0,37	0,22	-0,67	-0,84	-0,844	-0,94	0,93	-0,88	0,99	0,99	0,99

En **amarillo** significantes al nivel 0,01 el resto al 0,05

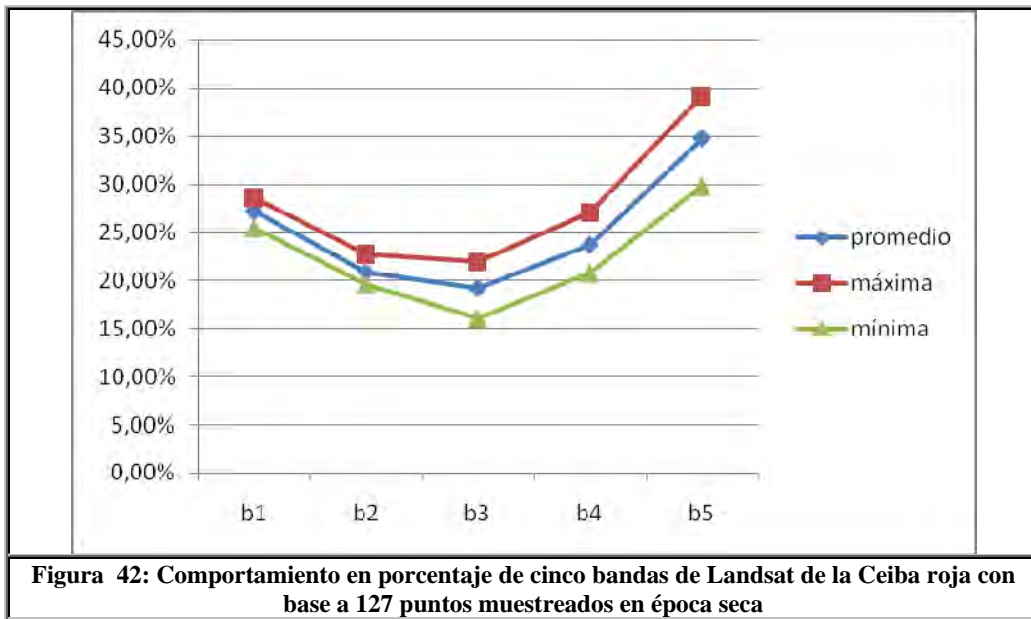
Tabla 11. Correlaciones significativas entre las variables dasométricas, precipitación y bandas e índices (muestra grande).

El NDVI y en general los índices presenta una correlación inversa con respecto a la productividad, al parecer que dada la fecha de la toma de la imagen, enero, como el mes más seco del año en promedio, la Ceiba roja por ser especie caducifolia, es decir, que en época seca elimina gran parte de su follaje, por tanto se explica que posiblemente los árboles más vigorosos son los primeros en eliminar su follaje.

Aunque resulten lógicas las correlaciones entre bandas, si presentan sutiles diferencias dado correlaciones entre el 74% entre las *bandas 2 y 4*, y el 89% entre las *bandas 3 y 5*. Las *bandas 3, 4 y 5* con los índices presentas las mayores

correlaciones, las cuales son las seleccionadas para otros tipos de análisis estadísticos más adelante.

En la *Figura 42*, presenta el comportamiento en porcentaje encontrada a partir de 127 puntos muestreados con Ceiba roja. En donde el hecho de que estuviera en periodo seco, esta especie pierde parte de sus hojas pero no lo suficiente dado que la respuesta en infrarrojo aumenta, aunque no con las proporciones que aumenta la vegetación vigorosa de acuerdo a Chuvieco 2002. Sin embargo la respuesta de las bandas electromagnéticas de la imagen Landsat, en las plantaciones de Ceiba roja estudiadas, es muy particular.



La *Figura 43* presenta las formas espectrales reales adaptadas de Chuvieco 2002. Donde el aumento del infrarrojo en la vegetación es bastante significativo, lo que no ocurre con la Ceiba roja en época seca, siendo más parecida a la vegetación enferma y en el infrarrojo al suelo, sin embargo su comportamiento en general es muy particular.

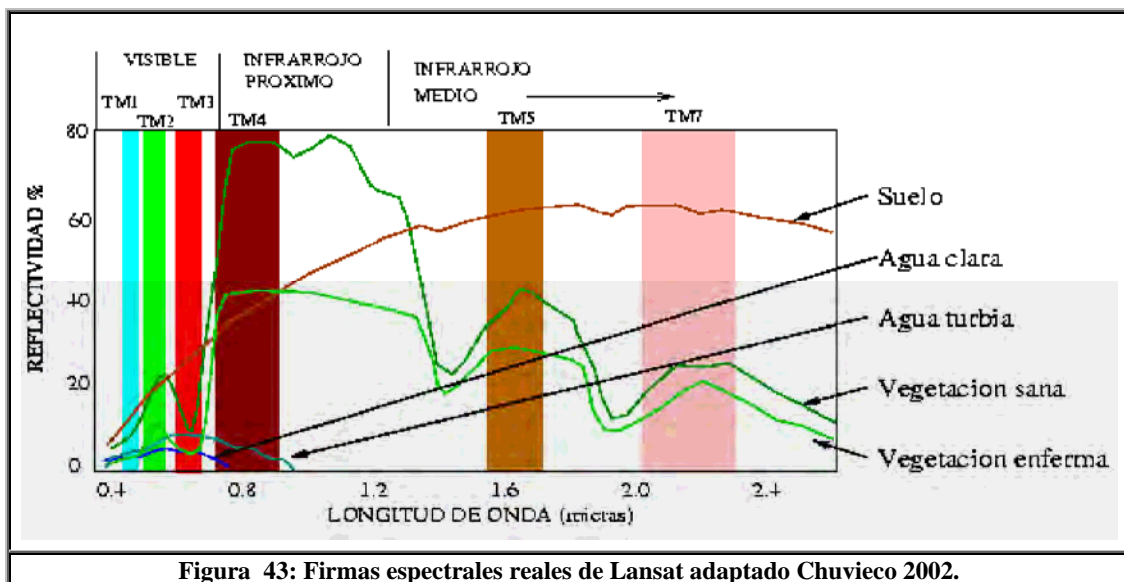


Figura 43: Firmas espectrales reales de Lansat adaptado Chuvieco 2002.

5.4. CORRELACIONES ENCONTRADAS ENTRE VARIABLES DASOMÉTRICAS, EDÁFICAS, ESPECTRALES Y PRECIPITACIÓN (MUESTRA PEQUEÑA)

Para la segunda muestra o muestra pequeña (31 puntos), se establece la matriz de correlación (Tabla 12), entre las variables dasométricas con la precipitación, propiedades edáficas y electromagnéticas con sus índices. Las variables dasométricas se correlacionaron así: el *volumen total* con la *banda 3* (0.30), con la *banda 5* (0.31) y con la *precipitación* (0.35), con significancia 0.10. La *banda 4* correlacionó con 0.29 y no está en la Tabla 12, ya que su significancia es mayor a 0.10. Comparada con la muestra grande presentaron menores valores, al parecer dado por el menor número de puntos. Respecto a las correlaciones del *volumen total* y variables de propiedades edáficas, se obtuvieron con el 0.05 de significancia, el *magnesio* con -0.39, *limo* con 0.43 y *conductividad hidráulica* -0.40. El *magnesio* presentó correlación inversa dado que todos los puntos muestreados presentaron valores altos de *magnesio*, por tanto, ya siendo altos, entre más altos la productividad disminuye dado que puede limitar la disponibilidad de otras bases intercambiables. La *conductividad hidráulica* también resultó inversa dado que entre más rápido se transporte el agua menor es su retención y disponibilidad, por tanto, menor producción. El *índice de sitio* presentó solo tres variables correlacionadas, dos con significancia de 0.10, *pH* (-0.31) y *calcio* (0.31), y una con significancia del 0.05, *potasio* con 0.39. El *pH* entre más alto menor índice de sitio, dado que algunas bases intercambiables pueden estar inhibidas por otras. El *potasio* por encontrarse en cantidades bajas en saturación de bases (Anexo 5) al ser mayor lo es también el *índice de sitio*.

Valbuena et al, 2008, indican que la producción de los cultivos fluctúa dentro de los lotes, como consecuencia de la variación que presentan diversos factores, entre ellos las propiedades del suelo.

Por tanto, las variables de propiedades edáficas de carácter químico en general se correlacionaron entre los componentes del complejo de cambio, específicamente el *CICE* se correlaciona con significancia al 0.01, con *calcio* (0.90), *potasio* (0.62) y *magnesio* (0.68), pero no tiene correlación significativa con el *sodio*, posiblemente se pueda explicar por la heterogeneidad del *sodio* en sus valores con respecto su ideal presentando valores en cuanto a saturaciones de bases bajos, medios, altos e ideales (Anexo 5). También la *capacidad de intercambio catiónico efectivo* (*CICE*) correlacionó positivamente con el *carbono orgánico* (0.30) y *conductividad hidráulica* (0.34) ambas con significancia del 0.10; igualmente con el porcentaje de *arcillas* (0.88), la *infiltración* (0.50), y con la *densidad aparente en húmeda* (-0.48) todas con significancia del 0.01. Esta última correlaciona negativamente también con *calcio* y *potasio*, también se puede indicar que correlaciona bien con las propiedades físicas del suelo como porcentajes de arcillas, infiltración y conductividad hidráulica, lo que se puede explicar que estas propiedades favorecen el intercambio de bases. Las correlaciones entre del *pH* con el porcentaje de *limos* (0.42), dado que el limo permite mayor retención de agua y bases intercambiable y con la *banda 3* (0.41), ambas con significancia del 0.05;

El *calcio* intercambiable con el *carbono orgánico* (0.44), el *fósforo* (0.33) con significancia del 0.10, el porcentaje de *arcillas* (0.71), la *infiltración* (0.51), la *conductividad hidráulica* (0.43) y la *densidad aparente en húmedo* (-0.41) con significancia del 0.05, éstos porcentajes de correlación del *calcio* en general son similares al *CICE* dado que este aporta un porcentaje mayoritario en su porcentaje; el *potasio* igualmente se correlaciona con el *carbono orgánico* y el *fósforo* (0.64 y 0.65, respectivamente) y con todas las variables físicas excepto el porcentaje de limos, posiblemente porque el predominio de los suelos es arcilloso; la *banda 4* correlaciona

un 0.32 con el *potasio* con significancia del 0.10, lo que se puede explicar con una mayor fotosíntesis en suelos con alto *potasio*; por su parte el *magnesio* intercambiable se correlaciona con el porcentaje de *arcillas* (0.72), la *infiltración* (0.31) con significancia del 0.10 y la *banda 1* (0.37) con significancia del 0.05; el *sodio* intercambiable se correlaciona negativamente con el *carbono orgánico* (-0.35) con significancia del 0.05, la *conductividad hidráulica* (-0.40) con significancia del 0.05 y la *banda 4* (-0.63), mientras que con las *bandas 1, 2, 3 y 5*, y con la *precipitación* se correlacionan positivamente 0.76, 0.79, 0.58, 0.65 y 0.69, respectivamente, todas con significancia del 0.01 a excepción de las especificadas con otro valor (*Tabla 12*). Esta última variable, es decir el *calcio*, es la variable con mayores correlaciones con la *precipitación*, las *bandas* y por consecuencia los índices, explicado por el hecho de que aunque no son suelos sódicos al igual que las demás bases intercambiables presentan valores altos, y la saturación de bases se mantiene alta solamente en el *magnesio*, en *potasio* presentaron valores bajos, en el *calcio* valores, altos, medios e ideales, y en *sodio*, bajos medios, altos e ideales, siendo este último el de mayor diferencia, lo que representó un mayor cambio en la respuesta espectral.

Las otras dos variables de propiedades químicas del suelo analizadas fueron el porcentaje de *carbono orgánico* y el *fósforo*, las cuales se correlacionan entre sí en 0.31 con significancia del 0.10; el primero de los dos se correlaciona con la *infiltración* y la *conductividad hidráulica* ambas con 0.36 con significancia del 0.05, lo que significa que los suelos con mejores valores del movimiento del agua se obtienen mejores contenidos de materia orgánica; y negativamente con la *porosidad* (-0.40) al parecer por tener valores de porosidad ideales y medios al aumentar la *porosidad* se empieza a perder la materia orgánica, y la *banda 2* (-0.36) también con significancia del 0.05, y con la *banda 4* (0.48) con significancia del 0.01, lo que demuestra que el verdor fotosintético se presentó en donde existe mayor contenido de materia orgánica. El *fósforo* solo se correlacionó negativamente con la *densidad aparente en húmedo* (-0.34) y la *banda 5* (-0.35) con significancia del 0.10, al parecer por tener en la mayoría de puntos valores altos (*Anexo 5*).

Las variables de propiedades físicas del suelo que presentaron más correlaciones fueron: el porcentaje de *limo* y *conductividad hidráulica* las cuales correlacionaron entre sí negativamente (-0.41) con significancia del 0.05, porque entre más cantidad de *limo* menor la velocidad del agua y el *limo* con la *densidad aparente en húmedo* (0.33) con significancia del 0.10, con las *bandas 1, 2, 3, 5 y 4* (0.34, 0.31 (con significancia del 0.10), 0.52, -0.50 (con significancia del 0.01) y -0.37 (con significancia del 0.05), respectivamente) y con la *precipitación* (0.34) con significancia del 0.10. Estas altas correlaciones pueden estar dadas por que al ser casi todos los puntos muestreados suelos arcillosos la cantidad de *limo* marca la diferencia en la respuesta de la vegetación y por ende del espectro. La *banda 4* presenta un comportamiento inverso a las demás *bandas* por eso su correlación es negativa. La *conductividad hidráulica* con las *bandas 1, 2, 3, 4 y 5* (-0.47, -0.47, -0.38, 0.54 y -0.60, respectivamente (con significancia del 0.01 a excepción de *banda 3* con 0.05) (*Tabla 12*). Esta *conductividad hidráulica* al tener correlación inversa con el *limo*, sus correlaciones con las *bandas* resultaron proporcionalmente inversas y al parecer marcan diferencia con la respuesta de la vegetación y por tanto del espectro.

El porcentaje de *arcillas* se correlacionó positivamente con la *infiltración* y la *conductividad hidráulica* (0.53 con significancia de 0.01 y 0.38 con significancia del 0.05, respectivamente) y negativamente con la *densidad aparente en húmedo* (-0.57) con significancia del 0.01 (*Tabla 12*). Lo que se explica que el movimiento del agua es mejor ente más *arcilla* dentro de unos suelos arcillosos pero a su vez menos *limo*. La *porosidad* se correlacionó negativamente con la *infiltración* y la *conductividad hidráulica* (-0.39 con significancia del 0.05 y -0.58 con significancia del 0.01,

respectivamente), por otro lado, la infiltración con la banda 5 (-0.39 con significancia del 0.05). Al parecer por ser suelos arcillosos entre más porosidad se aumenta la resistencia a perder o mover agua.

La variable precipitación (PMM) obtuvo una excelente correlación con todas las bandas (B1, B2, B3, B4 y B5) con correlaciones 0.69, 0.68, 0.72, -0.59 y 0.68 respectivamente con significancia del 0.01. Lo que representa que los valores del espectro son altamente sensibles a la humedad de cada sector. Comparando estos resultados con los obtenidos en la muestra grande son bastante similares a excepción de la *banda 4*, que disminuye 10 puntos porcentuales, pero en términos prácticos se puede decir que se comportaron igual. Otras correlaciones como la *densidad aparente en húmedo* y la *porosidad* se correlacionaron negativamente con la precipitación (-0.32 con significancia del 0.10 y -0.37 con significancia del 0.05).

En general, los índices correlacionan con el *sodio*, *limos*, *conductividad hidráulica*, con las 5 bandas y con *precipitación*, con significancia al 0.01; con el contenido orgánico (CO) con significancia al 0.05 y 0.10; y el pH con significancia 0.10 (*Tabla 12*). Estos se comportan de manera similar a las bandas especialmente 3 y 4 que son las que los componen, sin embargo tienden de manera discreta a mejorar el promedio de la correlación con respecto a estas bandas, lo que significa una mejor identificación de la respuesta vegetal dado que las estas dos bandas son estratégicas para determinar cambios de vegetación.

La Matriz de datos de suelos para la muestra pequeña se observa en el Anexo 5.

	VT	IS	PH	CICE	CA	K	MG	NA	CO	P	L	AR	INFIL	CH	DAH	POR	PMM	B1	B2	B3	B4	B5	NDVI	OSAVI	SAVI
IS	0,46																								
PH		-0,31																							
CICE																									
CA		0,31		0,90																					
K		0,39		0,62	0,67																				
MG	-0,39			0,68	0,35																				
NA							0,40																		
CO				0,30	0,44	0,64		-0,35																	
P					0,33	0,55			0,31																
L	0,43		0,42																						
AR				0,88	0,71	0,58	0,72																		
INFIL				0,50	0,51	0,55	0,31		0,36			0,53													
CH	-0,40			0,34	0,43	0,59		-0,40	0,36		-0,41	0,38	0,72												
DAH				-0,48	-0,41	-0,35				-0,34	0,33	-0,57													
POR						-0,53			-0,40				-0,39	-0,58											
PMM	0,35							0,69			0,34				-0,32	-0,37									
B1							0,37	0,76			0,34		-0,47				0,69								
B2								0,79	-0,36		0,31		-0,47				0,68	0,78							
B3	0,30		0,41					0,58			0,52		-0,38				0,72	0,75	0,78						
B4	0,29					0,32		-0,63	0,48		-0,37		0,54				-0,59	-0,82	-0,76	-0,77					
B5	0,31							0,65		-0,35	0,50		-0,39	-0,60			0,68	0,75	0,82	0,84	-0,76				
NDVI			-0,32					-0,64	0,33		-0,48		0,48				-0,70	-0,83	-0,82	-0,95	0,93	-0,85			
OSAVI			-0,32					-0,64	0,33		-0,48		0,48				-0,70	-0,83	-0,82	-0,95	0,93	-0,85	1,00		
SAVI			-0,32					-0,64	0,33		-0,48		0,48				-0,70	-0,83	-0,82	-0,95	0,93	-0,85	1,00	1,00	
SR			-0,34					-0,62	0,36		-0,48		0,49				-0,66	-0,81	-0,80	-0,94	0,93	-0,84	0,99	0,99	0,99

Tabla 12. Correlaciones significativas de propiedades del suelo, dasometría, precipitación, bandas e índices. En amarillo significancia al 0,01, naranja 0,05 y el resto al 0,10

5.5. ANALISIS ESTADÍSTICOS MULTIVARIADOS DE VARIABLES DASOMÉTRICAS, ESPECTRALES (MUESTRA GRANDE)

Siendo uno de los objetivos específicos evaluar las correlaciones entre los diferentes grupos de variables y en el espacio, como son las variables dasométricas Volumen total e índice de sitio¹², y las variables correspondientes a las 5 bandas electromagnéticas utilizadas (banda 1, 2, 3, 4 y 5), donde se inicio una evaluación de sus características; logrando determinar que las bandas electromagnéticas de la imagen Landsat utilizada, se agrupan espacialmente de acuerdo con los sitios de muestreo y es explicado con el **análisis de componentes principales**, por el primer componente principal en un 85%, y los restantes cuatro componentes principales explican menos del 6% cada uno (*Tabla 13*).

Componente Principal	Valor propio	Diferencia	Proporción	Acumulado
1	4.26413026	3.98060178	0.8528	0.8528
2	0.28352848	0.08690203	0.0567	0.9095
3	0.19662645	0.04678560	0.0393	0.9489
4	0.14984085	0.04396689	0.0300	0.9788
5	0.10587396		0.0212	1.0000

Tabla 13. Valores propios de la matriz de correlación para las bandas 1, 2, 3, 4 y 5.

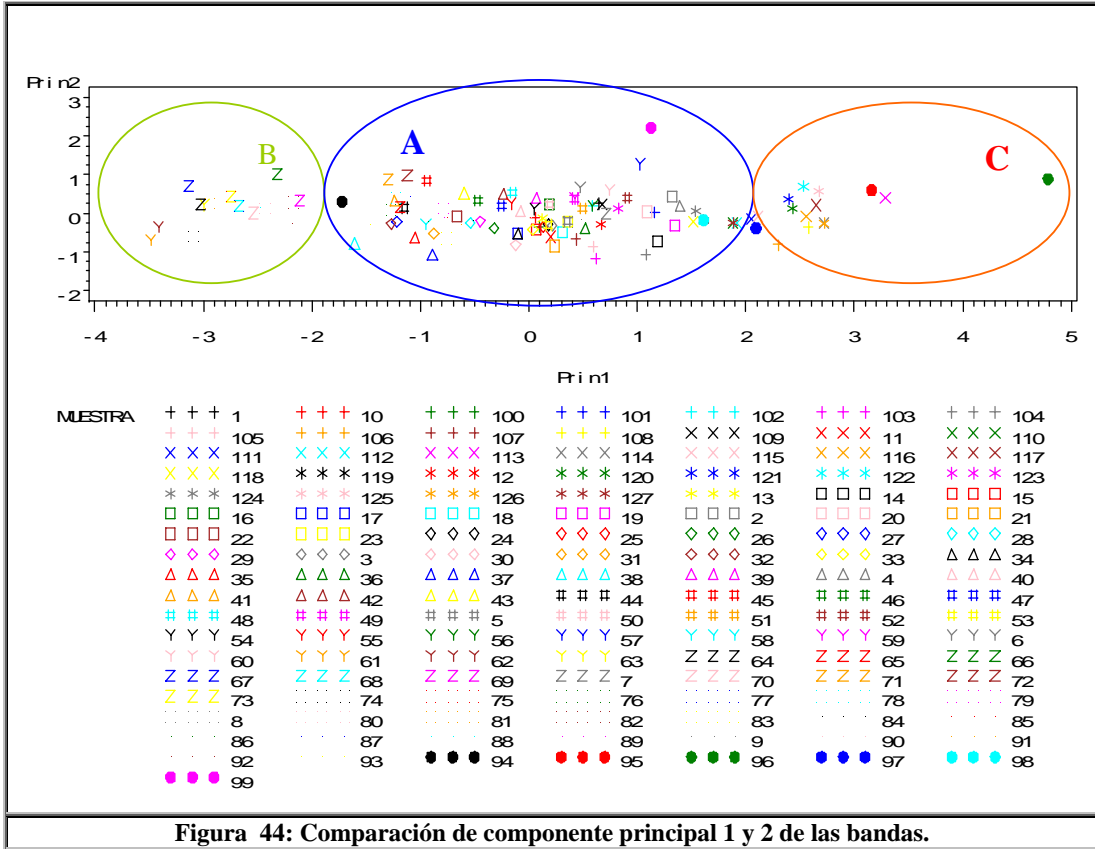
En la *Tabla 14*, se encuentra la proporción de las variables originales sobre cada una de las nuevas variables creadas, aunque otros componentes principales expliquen con coeficientes más altos algunas variables, la homogeneidad del primer componente para explicar todas las variables es el objeto de este tipo de técnicas.

Vectores propios	Prin1	Prin2	Prin3	Prin4	Prin5
B1	0.445065	-0.195703	0.806152	0.325738	0.087358
B2	0.447738	0.424752	0.171189	-0.766209	-0.052291
B3	0.455518	0.306524	-0.274524	0.420373	-0.668184
B4	-0.429951	0.799153	0.316875	0.255468	0.104030
B5	0.457267	0.220642	-0.380842	0.254638	0.729618

Tabla 14. Vectores propios y proporción de la variación explicada-ACP para los componentes principales.

El primer componente principal marca la agrupación de las muestras, que es comprobado por la *Figura 44* de los componentes principales Prin 1 – Prin 2 y Prin 1 – Prin 3, con la *Figura 45*. Cada sector (unidades) del plano definido por estos componentes principales sintetiza una condición diferente, de manera que una vez conocida la ubicación del sitio en el plano se realizó la agrupación preliminar de condiciones.

¹² Inicialmente se contemplaron 5 variables dasométricas, de las cuales se dejaron para el análisis estadístico dos (volumen total e índice de sitio), dado que el volumen comercial se correlaciona con el volumen total, la altura total tiene involucrada la edad por lo cual no se puede correlacionar, ya que de partida tiene un factor diferenciador que puede enmascarar resultados y el IMA (incremento medio anual) se descarto, puesto que este es obtenido a partir de la ecuación de índice de sitio por lo cual se auto correlacionan.



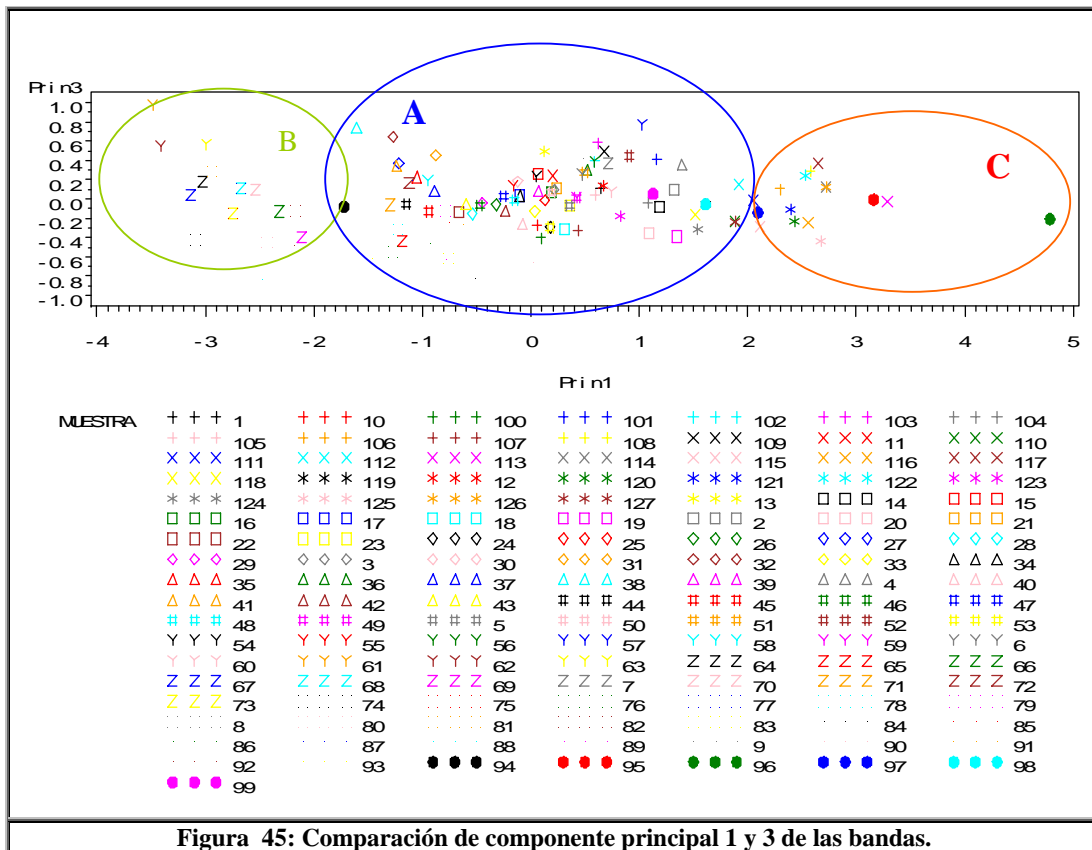


Figura 45: Comparación de componente principal 1 y 3 de las bandas.

El grupo A, resume principalmente las condiciones encontradas en los lotes andaluz 16 y 17, el Grupo B presenta el ambiente reinante en el lote Hachados y finalmente el lote san José es explicado por el Grupo C.

La conformación de los grupos bajo la mirada de los restantes componentes principales es mantenida. Lo que se puede interpretar como que los datos si responden inicialmente a la hipótesis planteada dada la claridad de separación de los grupos o lotes como se tomaron los datos en campo.

Dentro del objetivo específico resaltado anteriormente se incluye la generación de modelos compuestos de variabilidad espacial, el paso siguiente radica en realizar el análisis de componentes principales incluyendo las dos variables dasométricas (volumen total e índice de sitio) y excluyendo las bandas 1 y 2, ya que con el análisis de correlación muestra como estas distancias de onda del espectro no son indicativas de la vegetación, especialmente con la variable índice de sitio. Parece obvio para un estudio de reforestación o deforestación utilizar transformaciones de imágenes que refuercen el componente vegetal. Por ello, existen índices de vegetación de diferencia normalizada (NDVI). Este índice es un indicador de comprobada eficacia para realzar la señal de la vegetación frente a otras cubiertas, donde se indican las reflectividades del píxel infrarrojo en la banda del infrarrojo cercano (B4) y del rojo (B3), Chuvieco et al, 2002).

Los valores propios (*Tabla 15*) de los componentes principales (variable que resulta de la mejor combinación lineal de las variables originales, sintetiza la máxima variabilidad de la población objeto de estudio), denotado como y_1 que posee una varianza (valor propio) λ_1 , y utiliza esta nueva variable para estratificar la población (Cadena, 2008 citado por Guauque, 2008).

Al involucrar las variables dasométricas, son necesarios dos componentes principales para explicar la variación de las variables en estudio (85%); el efecto ocasionado por esta inclusión es, que las variables dasométricas son explicadas por el segundo componente principal, siendo el primer componente principal el que explica a las variables espectrales (*Tabla 16*).

Componente Principal	Valor propio	Diferencia	Proporción	Acumulado
1	2.88405956	1.49914636	0.5768	0.5768
2	1.38491320	0.99163762	0.2770	0.8538
3	0.39327558	0.16139766	0.0787	0.9324
4	0.23187793	0.12600419	0.0464	0.9788
5	0.10587373		0.0212	1.0000

Tabla 15. Valores propios de la matriz de correlación para las variables dasométricas y espectrales.

Vectores propios	Prin1	Prin2	Prin3	Prin4	Prin5
VT	0.28137	0.64918	0.66890	-0.22796	-0.00243
IS	-0.14160	0.75567	-0.59246	0.23843	0.03245
B3	0.55653	-0.04351	-0.02514	0.49635	-0.66437
B4	-0.52686	0.02112	0.44638	0.71883	0.07742
B5	0.55988	-0.07202	-0.04095	0.35792	0.74267

Tabla 16. Vectores propios y proporción de la variación explicada-ACP para los componentes principales.

La *Figura 46*, muestra gráficamente la conformación de los grupos, resaltándose una mayor diferenciación entre el grupo A y el grupo B; pero siendo la conformación muy afectada por las variables espectrales, ya que continúa con la tendencia del análisis de las bandas, *Figura 47*.

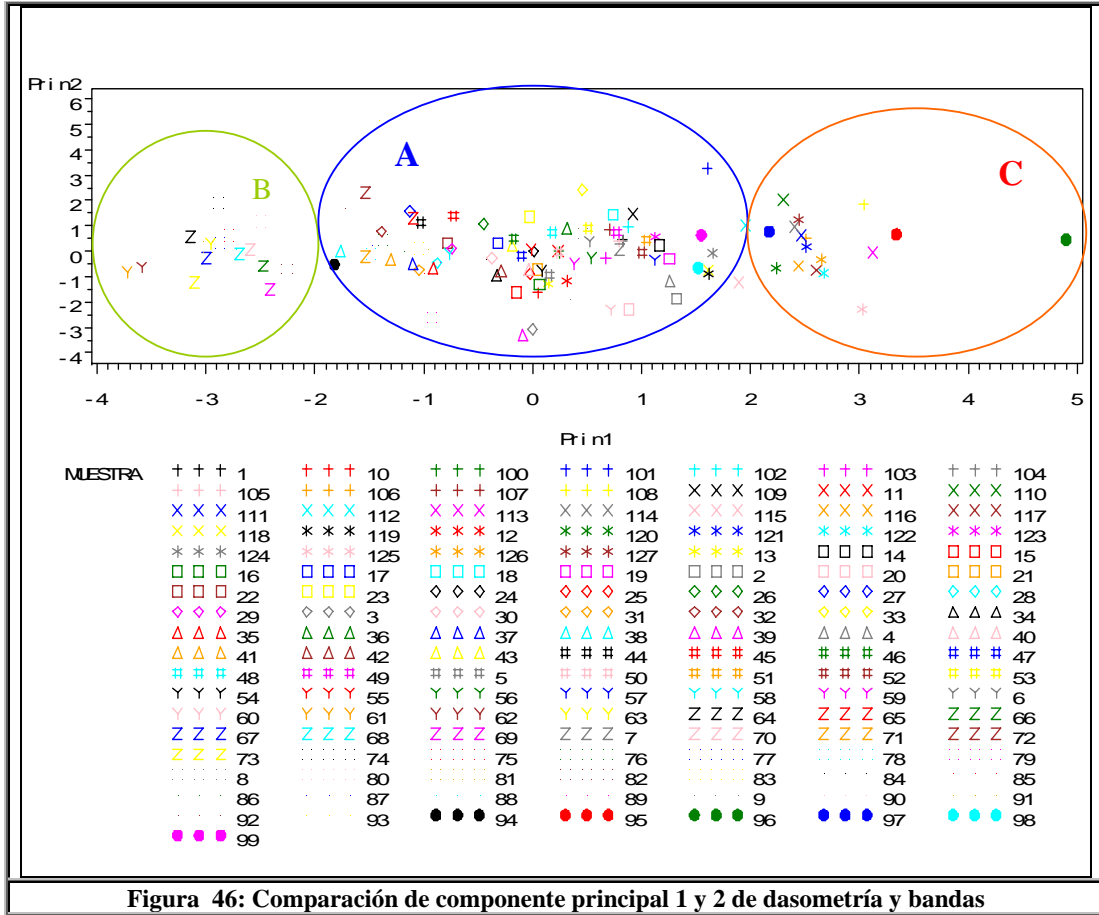
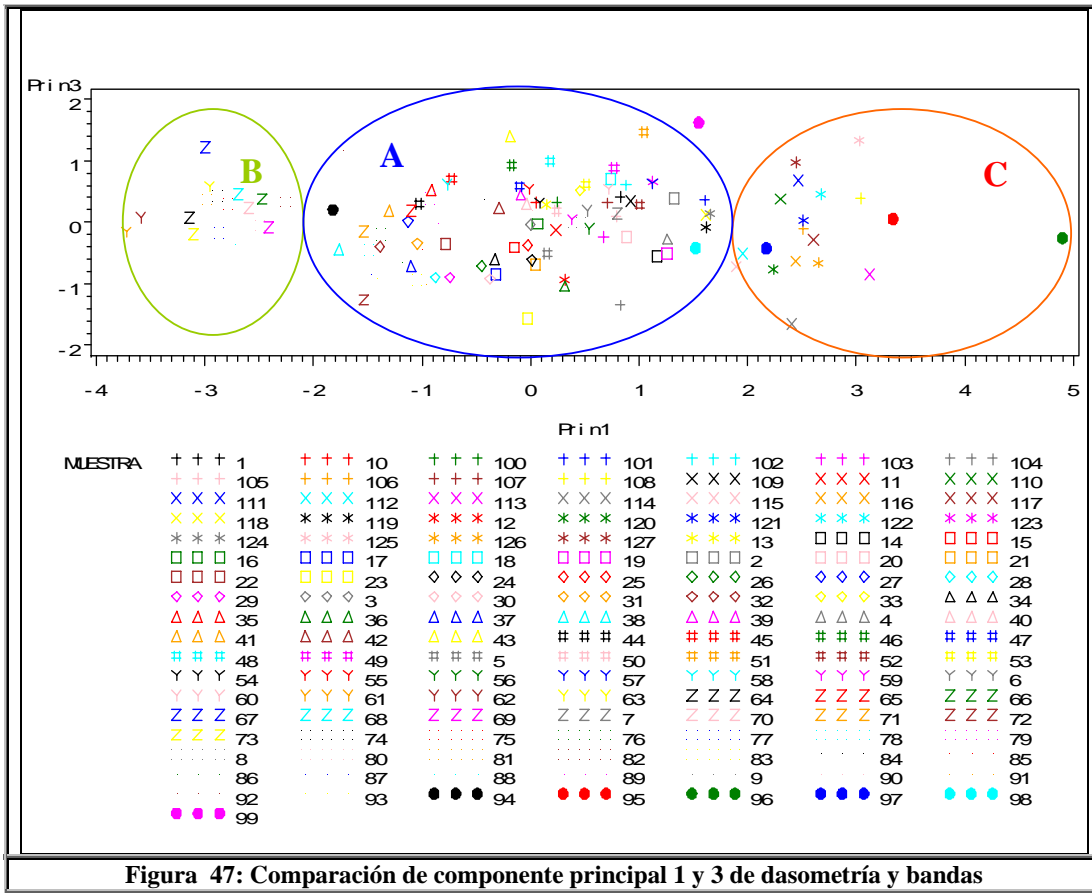


Figura 46: Comparación de componente principal 1 y 2 de dasometría y bandas



Con el análisis de factor principal, se pudo explicar que es suficiente con los dos primeros componentes principales explicar la variación de las variables dasométricas y espectrales, ya que la proporción acumulada llega al 100% con estos dos componentes (Tabla 17). Nótese que el valor propio del 3 al 5 son negativos por eso se explica el 110% del valor propio 2 y se ajusta con los valores propios 3 al 5, hasta llegar al 100%.

Factor	Valor propio	Diferencia	Proporción	Acumulado
1	2.62357244	1.85235036	0.8552	0.8552
2	0.77122208	0.80984905	0.2514	1.1066
3	-0.03862697	0.03536230	-0.0126	1.0940
4	-0.07398927	0.14037931	-0.0241	1.0699
5	-0.21436858		-0.0699	1.0000

Tabla 17. Valores propios y proporción explicada por el análisis de factor principal.

A fin de comprender el grado de participación de las variables originales en cada componente, según Johnson (2000), se examinan los vectores propios y la correlación entre las variables originales y los componentes principales (Tabla 18).

Vectores propios	1	2
VT	0.24546	0.67462
IS	-0.12700	0.73248
B3	0.57217	-0.03882
B4	-0.51060	0.00485
B5	0.57925	-0.08267

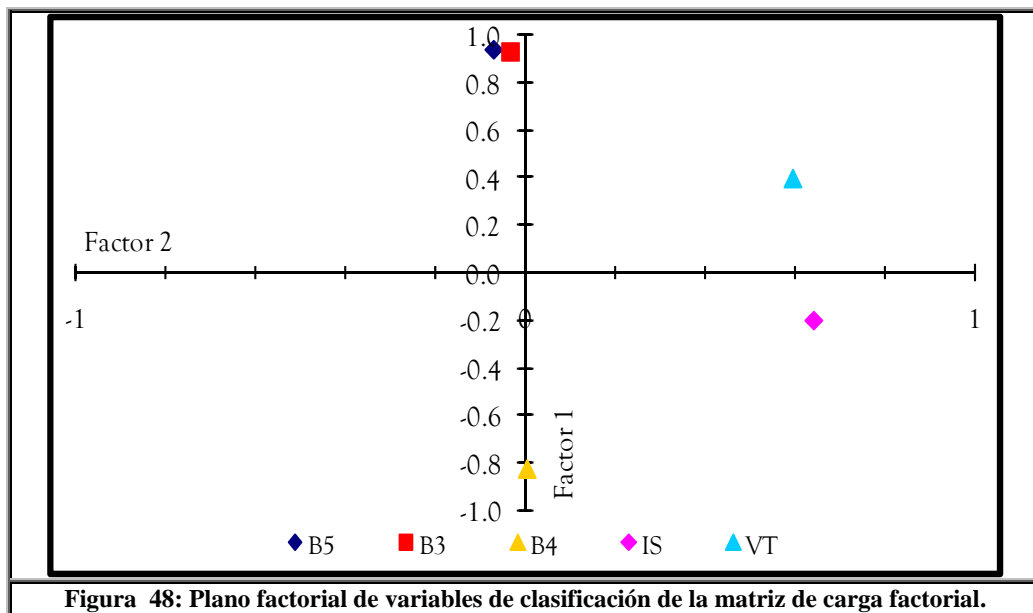
Tabla 18. Vectores propios de la matriz de correlación del análisis de factor principal.

Los coeficientes del primer vector propio señalado en la *Tabla 18*, indican que esta combinación lineal es aproximadamente un promedio de las variables espectrales con ponderación relativa mayores para banda 3 (0.57217), banda 4 (-0.51060), banda 5 (0.57925). Este vector clasifica las variables espectrales, mientras que, el segundo vector propio clasifica las variables dasométricas; esta combinación lineal contiene una ponderación relativa mayor para el volumen total (0.67462) e índice de sitio (0.73248).

Siendo bautizados el primer factor principal como la combinación lineal “Valor de Importancia de las variables espectrales” y el segundo factor principal como la combinación lineal “Valor de Importancia de las variables dasométricas”.

Las variables regionalizadas determinadas por el análisis de factor principal, fueron las bandas 3, 4 y 5¹³. El concepto de regionalizado, es indicativo para aquellas variables que marcan el grado de diferenciación y de mayor variación (*Figura 48*).

Su importancia se debe a que estas bandas son utilizadas comúnmente para evaluar la vegetación, Chuvieco et al, 2002.



Para evaluar la bondad del análisis de factor principal en el software SAS, se calcularon dos índices:

¹³ Porque una sola variable puede resumir a las bandas 1 y 2 y su valor está por debajo de las bandas 3 y 5. Además de lo dicho por Chuvieco et al, 2002.

1. Medida de adecuación de la muestra Kaiser's (MSA), que resume para cada variable y para todas las variables juntas el nivel de cercanía entre las correlaciones parciales y las correlaciones originales.

2. La comunalidad, mide la proporción de la variable explicada por los factores comunes en una variable, con ella se estima la cercanía entre la comunalidad final (CF) y la comunalidad preliminar (CP).

El MSA total (*Tabla 19*), es de 0.723 y para cada una de las variables así: volumen total de 0.6062, índice de sitio de 0.4710, la banda 3 de 0.7452, la banda 4 de 0.8771 y la banda 5 de 0.7170. Los valores determinados son meritorio para la banda 4, bueno para la MSA total, la banda 3 y la banda 5, medio bueno para el volumen total y no procedente la variable índice de sitio, que se localiza por debajo mínimo de aceptación 0.5¹⁴; siendo aceptados todos excepto para esta ultima variable (Díaz, 2007).

Vectores propios	MSA	CF	CP
VT	0.6062	0.4095	0.5091
IS	0.4710	0.3618	0.4561
B3	0.7452	0.8128	0.8600
B4	0.8771	0.6538	0.6840
B5	0.7170	0.8299	0.8856
total	0.7230		

Tabla 19. Muestra de Kaiser's (MSA) y comunalidad final y preliminar.

La comunalidad final de las variables dasométricas (*Tabla 19*), mejoro ostensiblemente con el análisis de factor principal, ya que sus valores aumentaron de 0.4095 (CP) a 0.5091 (CF) para el volumen total y de 0.3618 (CP) a 0.4561 (CF) para índice de sitio, que representa aproximadamente diez puntos porcentuales. La comunalidad final para las variables espectrales aumentó aproximadamente cinco puntos porcentuales para las bandas 3 y 5, ya que sus comunalidades pasaron de 0.8128 (CP) a 0.8600 (CF) y 0.8299 (CP) a 0.8856 (CF), respectivamente; para la banda 4, su comunalidad preliminar paso de 0.6538 a una comunalidad final de 0.6840, que es un valor aceptable de cambio.

Las variables originales al superar estos índices, demuestran que estaban correlacionadas, y que al determinar los factores subyacentes, se establecieron unas nuevas variables no correlacionadas, útiles para nuevos análisis (Johnson, 2000).

Para poder asegurar la existencia de los grupos, así como confirmar los individuos que pertenecen a cada uno de ellos se realizó el Análisis Discriminante, el cual actúa como una regresión, excepto que la variable dependiente es categórica, en lugar de continua. En el análisis discriminante se desea poder predecir la pertenencia a una clase de observación particular, con base en un conjunto de variables predictoras (Johnson, 2000).

El procedimiento DISCRIM se desarrollo con la opción POOL=YES, en SAS con el objetivo de evaluar las matrices de varianza – covarianza combinadas y no

¹⁴ Dato estándar estadísticamente

combinadas, debido a que se producen matrices resúmenes de clasificación (Johnson, 2000).

En el procedimiento DISCRIM se empleó la opción PRIORS PROP en SAS, por que los únicos datos de los que se dispone para probar la regla discriminante son aquellos que se están usando para formar la propia regla, y estos conjuntos de datos no tienen números iguales en cada uno de los tres grupos. Como consecuencia, para cumplir la regla discriminante, se debe dar peso a las clasificaciones a favor de aquel grupo que tuvo más observaciones.

En la *Tabla 20*, se definen o se redefinen los puntos de muestreo en las unidades originalmente encontradas o en nuevas unidades, de acuerdo con la estimación de Probabilidades Posteriores. Los datos numéricos indican la probabilidad de pertenecer a un grupo o a otro, la suma de los tres es igual a uno, y entre más cercano a éste, mayor probabilidad de pertenecer a uno u otro grupo.

El punto 14, 51 y 45 inicialmente clasificados dentro del grupo A (Andaluz 16 y 17), por el método de validación cruzada fueron reclasificados en el grupo C (San José) los dos primeros y el tercero en el grupo B (Hachados); habiendo sido clasificadas originalmente en el grupo B, los puntos 79 y 90 se les reclasifico hacia la unidad A; y del grupo C al A fueron reclasificados los puntos 99, 100, 104, 107 y 123. En general, tales opciones de reclasificación son porcentualmente bajas (error total = 11.0%), admitiendo por lo tanto que las unidades de clasificación originales son apropiadas.

PUNTOS	DEL GRUPO	AL GRUPO		A	B	C
1	A	A		0.7467	0.0001	0.2532
2	A	A		0.7398	0.0000	0.2602
3	A	A		0.9929	0.0009	0.0062
4	A	A		0.5805	0.0000	0.4195
5	A	A		0.9805	0.0051	0.0144
6	A	A		0.9251	0.0010	0.0739
7	A	A		0.6399	0.0000	0.3601
8	A	A		0.8853	0.0008	0.1138
9	A	A		0.9490	0.0000	0.0510
10	A	A		0.9798	0.0138	0.0064
11	A	A		0.8757	0.0001	0.1243
12	A	A		0.9692	0.0008	0.0300
13	A	A		0.9471	0.0000	0.0528
14	A	C	*	0.3913	0.0000	0.6087
15	A	A		0.9879	0.0007	0.0114
16	A	A		0.9856	0.0060	0.0084
17	A	A		0.9792	0.0100	0.0108
18	A	A		0.6040	0.0002	0.3958
19	A	A		0.6863	0.0002	0.3135
20	A	A		0.9660	0.0025	0.0315
21	A	A		0.9599	0.0003	0.0398
22	A	A		0.6332	0.3661	0.0007
23	A	A		0.9340	0.0508	0.0152
24	A	A		0.9535	0.0362	0.0104
25	A	A		0.9834	0.0036	0.0130
26	A	A		0.9462	0.0465	0.0073
27	A	A		0.9665	0.0303	0.0032
28	A	A		0.5170	0.4828	0.0003
29	A	A		0.7575	0.2415	0.0009
30	A	A		0.9850	0.0017	0.0133
31	A	A		0.9929	0.0052	0.0019
32	A	A		0.9816	0.0170	0.0014
33	A	A		0.6541	0.0003	0.3456
34	A	A		0.9874	0.0067	0.0059
35	A	A		0.9932	0.0033	0.0035
36	A	A		0.8714	0.0002	0.1284
37	A	A		0.9763	0.0223	0.0015
38	A	A		0.9919	0.0074	0.0007
39	A	A		0.9899	0.0084	0.0017
40	A	A		0.9569	0.0371	0.0061
41	A	A		0.7705	0.2293	0.0002
42	A	A		0.8434	0.1550	0.0016
43	A	A		0.9708	0.0199	0.0093
44	A	A		0.5419	0.4576	0.0005
45	A	B	*	0.2736	0.7261	0.0003
46	A	A		0.9682	0.0206	0.0112
47	A	A		0.9803	0.0075	0.0121
48	A	A		0.9598	0.0063	0.0339
49	A	A		0.7715	0.0003	0.2282
50	A	A		0.9651	0.0025	0.0325
51	A	C	*	0.3196	0.0000	0.6804
52	A	A		0.5868	0.0000	0.4132
53	A	A		0.8486	0.0009	0.1505
54	A	A		0.9751	0.0008	0.0241
55	A	A		0.9760	0.0031	0.0209
56	A	A		0.8786	0.0001	0.1213
57	A	A		0.6409	0.0000	0.3591
58	A	A		0.9885	0.0071	0.0045
60	A	A		0.9687	0.0006	0.0307
61	B	B		0.2121	0.7879	0.0000
62	B	B		0.0099	0.9901	0.0000
63	B	B		0.0382	0.9618	0.0000
64	B	B		0.0006	0.9994	0.0000
66	B	B		0.0001	0.9999	0.0000
67	B	B		0.0004	0.9996	0.0000
68	B	B		0.0050	0.9950	0.0000
69	B	B		0.0002	0.9998	0.0000
70	B	B		0.0088	0.9912	0.0000
71	B	B		0.0081	0.9919	0.0000

PUNTOS	DEL GRUPO	AL GRUPO		A	B	C
72	B	B		0.0047	0.9953	0.0000
73	B	B		0.0000	1.0000	0.0000
74	B	B		0.0006	0.9994	0.0000
75	B	B		0.0002	0.9998	0.0000
76	B	B		0.0062	0.9938	0.0000
77	B	B		0.0010	0.9990	0.0000
78	B	B		0.0059	0.9941	0.0000
79	B	A	*	0.6793	0.3206	0.0001
80	B	B		0.0001	0.9999	0.0000
81	B	B		0.0034	0.9966	0.0000
82	B	B		0.0039	0.9961	0.0000
83	B	B		0.0728	0.9272	0.0000
84	B	B		0.2319	0.7678	0.0003
85	B	B		0.2848	0.7151	0.0001
86	B	B		0.0409	0.9591	0.0000
87	B	B		0.0849	0.9151	0.0000
88	B	B		0.0000	1.0000	0.0000
89	B	B		0.0764	0.9236	0.0000
90	B	A	*	0.7666	0.2309	0.0025
91	B	B		0.2616	0.7383	0.0001
92	B	B		0.0365	0.9635	0.0000
93	B	B		0.0029	0.9971	0.0000
94	B	B		0.0234	0.9766	0.0000
95	C	C		0.0021	0.0000	0.9979
96	C	C		0.0000	0.0000	1.0000
97	C	C		0.0325	0.0000	0.9675
98	C	C		0.4037	0.0000	0.5963
99	C	A	*	0.7396	0.0016	0.2588
100	C	A	*	0.9611	0.0077	0.0312
101	C	C		0.0199	0.0000	0.9801
102	C	C		0.4593	0.0000	0.5407
103	C	C		0.3088	0.0000	0.6912
104	C	A	*	0.5957	0.0000	0.4043
106	C	C		0.0034	0.0000	0.9966
107	C	A	*	0.6920	0.0002	0.3078
108	C	C		0.0003	0.0000	0.9997
109	C	C		0.3600	0.0000	0.6400
110	C	C		0.0106	0.0000	0.9894
111	C	C		0.0081	0.0000	0.9919
112	C	C		0.0389	0.0000	0.9611
113	C	C		0.0078	0.0000	0.9922
114	C	C		0.0192	0.0000	0.9808
115	C	C		0.3826	0.0000	0.6174
116	C	C		0.0623	0.0000	0.9377
117	C	C		0.0144	0.0000	0.9856
118	C	C		0.3159	0.0000	0.6841
119	C	C		0.3197	0.0000	0.6803
120	C	C		0.1566	0.0000	0.8434
121	C	C		0.0332	0.0000	0.9668
122	C	C		0.0218	0.0000	0.9782
123	C	A	*	0.5798	0.0001	0.4201
124	C	C		0.3708	0.0000	0.6292
125	C	C		0.0320	0.0000	0.9680
126	C	C		0.0103	0.0000	0.9897
127	C	C		0.0073	0.0000	0.9927

Tabla 20. Definición y redefinición de los grupos por validación cruzada usando la Función Lineal Discriminante y la Distancia Cuadrada Generalizada de Pairwise.

* Observaciones a ser reclasificadas.

La estimación de las probabilidades se puede realizar por cuatro métodos, el empleado es “Estimaciones por Resustitución” (Tabla 21), siendo igualmente evaluado por “estimaciones por Valididad cruzada” (Tabla 22), el cual resulta ser el mejor método. A continuación se anexan las tablas resúmenes de la clasificaciones por los dos métodos, siendo aproximadamente iguales con la diferencia que la validación cruzada clasifico una muestra del Grupo B a grupo C.

DEL GRUPO	A	B	C	Total
A	57	1	2	60
	95	2	3	100
B	2	32	0	34
	6	94	0	100
C	5	0	28	33
	15	0	85	100
Total	64	33	30	127
	50	26	24	100

Tabla 21. Resumen de Clasificación por Resustitución usando la Función Lineal Discriminante.

DEL GRUPO	A	B	C	Total
A	55	2	3	60
	92	3	5	100
B	2	32	0	34
	6	94	0	100
C	7	0	26	33
	21	0	79	100
Total	64	34	29	127
	50	27	23	100

Tabla 22. Resumen de Clasificación por Validación Cruzada usando la Función Lineal Discriminante.

La clasificación de los puntos de muestreo es posible realizar por medio de la distancia cuadrada de Mahalanobis entre este y cada una de las medias de las poblaciones y, a continuación, clasificar esa observación en una población a cuya media se encuentra más próxima (Johnson, 2000).

La afinidad de los grupos entre sí, se analizan mediante la distancia cuadrada generalizada de Pairwise. Al analizar la *Tabla 23*, se observa que el mejor agrupamiento de las parcelas en las mencionadas unidades de suelos, se obtiene en el grupo A (1.50), con respecto a B (2.64) y C (2,70). De otra parte, la mayor tendencia de acercamiento entre las diferentes unidades de suelos, se observa entre las unidades A y C con distancias recíprocas de 9.10 y 7.90; y el distanciamiento más acentuado es entre el grupo B y el grupo C 34.38 y 34.44.

DEL GRUPO	A	B	C
A	1,4997	13,5391	9,0963
B	12,4032	2,6356	34,4362
C	7,9006	34,3764	2,6954

Tabla 23. Distancia Cuadrada Generalizada.

Sin perjuicio alguno, la *Tabla 23*, muestra que la matriz de la distancia cuadrada de Mahalanobis no es simétrica, debido a que las matrices de varianzas – covarianzas o las probabilidades previas son desiguales (Johnson, 2000). Se determina esta situación debido a que la distancia cuadrada entre el grupo A y B es ponderada de manera diferente que las distancias entre el grupo B y A.

De acuerdo con la función lineal discriminante se deducen tres ecuaciones (*Tabla 24*) correspondientes a cada una de los grupos (variables dependientes), en función de las variables de clasificación (variables independientes). Finalmente, cada una de las unidades de suelos está representada por una ecuación, que depende de las variables: volumen total (VT), Índice de Sitio (IS), Banda 3 (B3), Banda 4 (B4) y Banda 5 (B5).

Variable	A	B	C
Constante	-1095,0000	-1122,0000	-1100,0000
VT	-177,8983	-202,6948	-157,0430
IS	12,0548	12,8024	11,8587
B3	7,5400	8,4935	7,4572
B4	16,8739	17,7564	16,3028
B5	7,5680	6,6390	7,9874

Tabla 24. Función Lineal Discriminante.

Al efectuar reemplazamientos de valores reales en cada una de las variables independientes de la *Tabla 24*, se obtienen los valores de los índices de grupo correspondientes al grado de diferenciación de las unidades por efecto de las plantaciones de Ceiba. Así tenemos, que al asignar los registros de cada uno de los puntos en las funciones lineales discriminantes para cada grupo de variables independientes, se obtienen los índices correspondientes al grado de diferenciación de las unidades (*Tabla 25*).

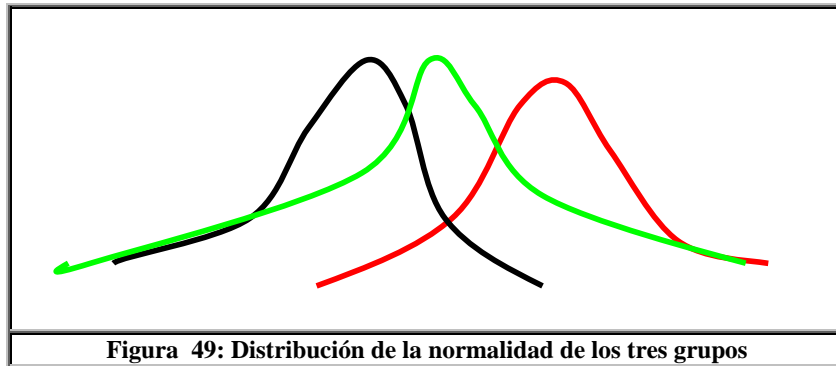
La *Tabla 25*, se construyó luego de reemplazar el valor de cada una de las variables de los 127 puntos de muestreo, dentro de la ecuación obtenida con la función lineal discriminante. Obteniéndose los estadísticos básicos a partir del valor que tomo cada punto a partir de la función lineal discriminante.

Función Lineal Discriminante – Grupo A					
GRUPO	MEDIA	DESV. EST.	COEF. VAR.	MINIMO	MAXIMO
GA	1089.02	41.3264	3.79%	1010.98	1224.049
GB	1116.71	46.3711	4.15%	1039.03	1260.262
GC	1101.96	55.0203	4.99%	994.785	1285.714
Función Lineal Discriminante – Grupo B					
GRUPO	MEDIA	DESV. EST.	COEF. VAR.	MINIMO	MAXIMO
GA	1082.75	41.7078	3.85%	999.294	1212.264
GB	1121.53	47.4745	4.23%	1046.17	1265.442
GC	1087.85	55.8118	5.13%	978.997	1279.27
Función Lineal Discriminante – Grupo C					
GRUPO	MEDIA	DESV. EST.	COEF. VAR.	MINIMO	MAXIMO
GA	1085.58	41.3791	3.81%	1004.87	1223.884
GB	1105.92	45.9065	4.15%	1027.29	1250.994
GC	1105.34	55.1792	4.99%	995.994	1285.015

Tabla 25. Función Lineal Discriminante para los grupos A, B y C

Se observa una clara diferenciación, entre los grupos A y B (Andaluz y Hachados), mientras que el grupo C (San José) es transversal a estos dos grupos. Con la función lineal discriminante GA, se observa que cada grupo tiene diferentes medias pero sus rangos se interceptan, lo que muestra la multinormalidad, donde se interpreta, una cantidad determinada de datos, donde se muestran diferentes grupos, cada uno con su media y distribución normal dentro de todo el conjunto de datos.

En la *Figura 49*, la línea negra representa al grupo A (Andaluz), la roja al grupo B (Hachados) y la verde al grupo C (San José), la multinormalidad de los datos en estudio, es interpretada, con el esquema de arriba, donde aunque hay datos similares, unos pertenecen a uno u otro grupo dependiendo de todo el conjunto en estudio. El grupo A, más numeroso pero con la media más baja, el grupo B más pequeño, pero con la media mayor, donde sus límites con el grupo anterior se interceptan, y el grupo C con una media entre los dos anteriores grupos, pero con valores multivariados entre los rangos de los grupos A y B, pero con tales características que permite diferenciar un grupo. Eso sí con un valor bajo de diferenciación entre el grupo A y C, expresado por la distancia cuadrada (*Tabla 25*). Se considera que el grupo C es transversal a los otros dos grupos por esta condición. Ya que sus datos por valores numéricos se ubica entre el rango de los grupos A y B.



Las características de las variables originales de cada uno de los grupos son resumidas en la *Tabla 26*. Se aprecia valores altos de volumen total para San José o grupo C (0.32) y los más bajos para Hachados o grupo B (0.21), siendo el comportamiento del Índice de Sitio contrario, con la media más alta para Hachados (15.00) y Andaluz y San José con valores similares (13.43 y 13.72, respectivamente).

Los valores de la media de las variables espectrales, claramente se diferencian y se agrupan las bandas 4 y 5, que son bandas adecuadas para evaluar el estado de la vegetación. Las bandas 1, 2 y 3 son diferenciables para los grupo A y B, pero el grupo C tiene un comportamiento de transversalidad. Donde su coeficiente de variación es bastante bajo, comprobando el alto grado de agrupación que mostraron las variables espectrales analizadas individualmente o con las variables dasométricas.

GA	VT	IS	B1	B2	B3	B4	B5
M	0.24	13.43	69.25	53.19	49.14	60.11	89.78
D.S.	0.07	1.77	1.43	1.07	2.20	2.27	3.22
C.V.	29%	13%	2%	2%	4%	4%	4%
MAX	0.42	17.83	73.00	55.00	53.00	66.00	100.00
MIN	0.10	8.73	66.00	50.00	42.00	54.00	84.00
GB	VT	IS	B1	B2	B3	B4	B5
M	0.21	15.00	67.12	50.91	45.27	65.94	81.27
D.S.	0.07	1.98	1.41	1.55	3.04	2.87	3.14
C.V.	32%	13%	2%	3%	7%	4%	4%
MAX	0.43	22.83	69.00	54.00	50.00	71.00	88.00
MIN	0.10	12.63	64.00	48.00	37.00	60.00	74.00
GC	VT	IS	B1	B2	B3	B4	B5
M	0.32	13.72	72.40	55.93	54.13	55.87	97.40
D.S.	0.07	1.70	1.30	1.46	3.08	2.90	3.89
C.V.	22%	12%	2%	3%	6%	5%	4%
MAX	0.47	17.80	75.00	58.00	63.00	66.00	109.00
MIN	0.19	8.30	70.00	53.00	47.00	52.00	92.00

Tabla 26. Resumen de las características de las variables Dasométricas y Espectrales.

*M= media, D.S.= desviación estándar, C.V.= coeficiente de variación, MAX= máximo, MIN= mínimo, VT= volumen total, IS= índice de sitio, B1= banda 1, B2= banda 2, B3= banda 3, B4= banda 4 y B5= banda 5.

Para identificar diferencias entre dos o más grupos a partir de medidas de características de los individuos pertenecientes a esos grupos, el análisis canónico discriminante (ACD) es una técnica estadística multivariada que permite la comprensión de las relaciones entre las variables evaluadas dentro de esos grupos. El ACD estima funciones lineales (funciones o variables canónicas) a partir de las variables cuantificadas, realizando la separación de los grupos de individuos al maximizar la varianza entre los grupos y minimizar la varianza dentro de los grupos; utilizando el PROC CANDIS en SAS.

A partir de un conjunto de datos cuantitativos separados en clases, el análisis canónico discriminante determina la correlación canónica entre el grupo de variables cuantitativas (variables dasométricas y espectrales, en este caso) y un grupo de variables codificadas que representan las diferentes clases (unidades de respuesta espectral de plantaciones de Ceiba). Las variables canónicas derivadas son combinaciones lineales de las variables cuantitativas y sintetizan la variación entre clases.

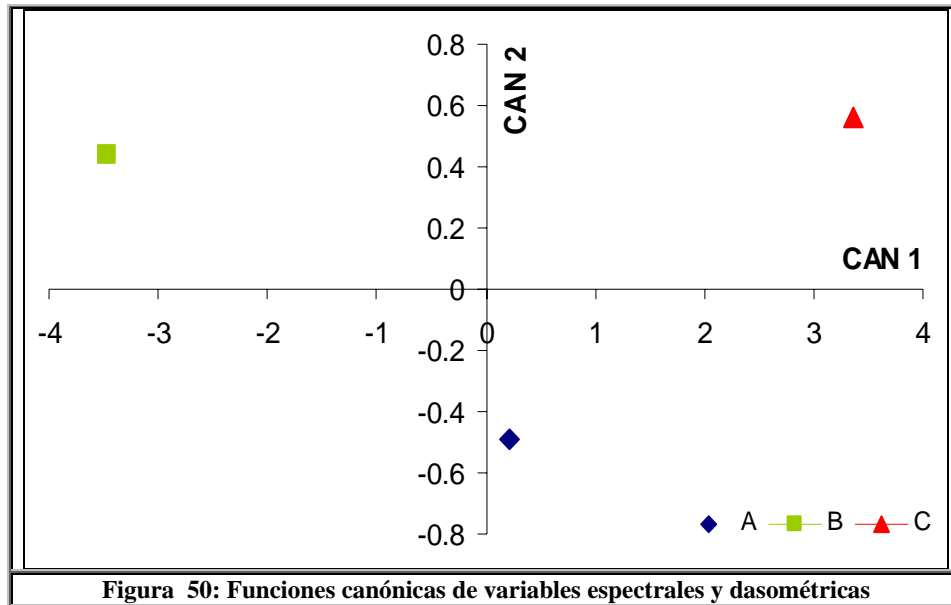
La Probabilidad $Pr > F$ determina el número de funciones canónicas seleccionadas, siendo adecuadas dos funciones canónicas, *Tabla 27*.

Ratio F	Value	Num DF	Den DF	Pr > F
0.1427	39.53	10	240	<.0001
0.8627	4.81	4	121	0.0012

Tabla 27. Prueba de hipótesis nula. Probabilidad aproximada.

La *Figura 50*, ilustra las funciones canónicas, siendo la primera función (CAN1) una representación de las variables espectrales y la segunda función canónica (CAN2) una representación de las variables dasométricas, determinando una clara diferenciación

espectral de los tres sitios de estudio y una diferenciación dasométrica entre el grupo A (Andaluz) con los grupos B (Hachados) y C (San José).



La *Figura 50*, muestra también los valores (calificaciones) de las proyecciones de todos los puntos de muestreo, sobre el espacio canónico bidimensional, en unidades estandarizadas. Note que el Grupo A se ubica en el centro del eje CAN 1, el Grupo B a la izquierda y el Grupo C a la derecha, respectivamente. El eje CAN2 no es diferenciador entre los grupos de ahí su bajo nivel explicativo del valor propio (*Tabla 28*).

CAN	Valor propio	Diferencia	Proporción	Acumulado
1	5.0453	4.8862	0.9694	0.9694
2	0.1591	0.0000	0.0306	1.0000

Tabla 28. Valores propios de las funciones canónicas.

La representación de la *Figura 51*, permite ver el grado de agrupación de los puntos en estudio, pero se puede apreciar un cambio continuo y no un cambio abrupto en las características de los grupos. De allí que la distancia cuadrada generalizada no presentara valores muy altos entre los grupos.

Para definir las dos primeras funciones canónicas en términos de datos estandarizados, se emplearon los Coeficientes canónicos en bruto. Estas dos ecuaciones son modelos de agrupación de los tres grupos diferenciados en los análisis previos.

$$\text{CAN 1} = 8.468\text{VT} - 0.257\text{IS} - 0.180\text{B3} - 0.236\text{B4} + 0.266\text{B5}$$

$$\text{CAN 2} = 3.319\text{VT} + 0.323\text{IS} + 0.380\text{B3} + 0.177\text{B4} - 0.085\text{B5}$$

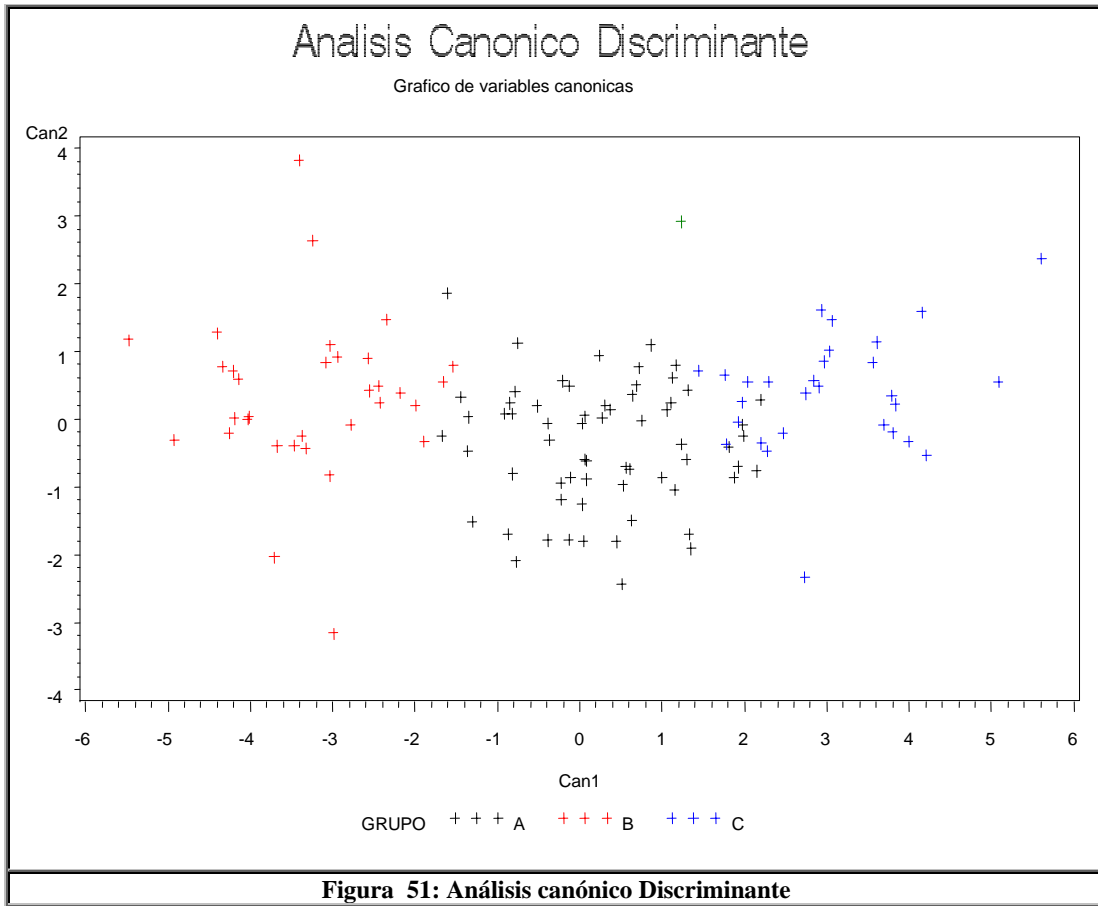


Figura 51: Análisis canónico Discriminante

Para establecer el modelo que prediga las variables dasométricas a partir de las variables espectrales se empleo el análisis de correlación canónica (ACC), ya que esta técnica es especial para estudiar la relación existente entre las variables de dos grupos de datos. El ACC se propone determinar la correlación entre una combinación lineal de las variables de un conjunto y una combinación lineal de las variables del otro conjunto (Díaz, 2007).

El objetivo del análisis es considerar un conjunto de variables que pueden ser divididas en dos grupos homogéneos y se desea estudiar la relación entre ambos conjuntos. El primero incluye p variables y el segundo q , tal que $p + q = k$. Se busca un par de variables resumen en cada conjunto que tengan correlación máxima. Un grupo de variables, y que por sus características, se pueden dividir en dos grupos de dichas variables, de las cuales se desea poder explicar las primeras de las segundas y viceversa.

Las variables canónicas son variables indicadoras de los dos conjuntos de variables que tienen la máxima correlación entre ellas. Los cocientes de las variables canónicas son los vectores propios ligados al mismo valor propio de las matrices.

El Análisis de correlación Canónica es una técnica de ordenación directa y representa además un caso especial de regresión múltiple donde la composición de especies es directamente relacionada con las variables ambientales. ACC es además una técnica eficiente cuando no se cumple el supuesto de respuesta unimodal de las especies a gradientes ambientales (Palmer, 1993). La composición de las especies para el caso en estudio, son las variables dasométricas de las plantaciones de Ceiba.

5.6. ANALISIS ESTADÍSTICOS MULTIVARIADOS DE VARIABLES DASOMÉTRICAS, EDÁFICAS, ESPECTRALES Y PRECIPITACIÓN (MUESTRA PEQUEÑA)

Los valores propios de los componentes principales (variable que resulta de la mejor combinación lineal de las variables originales, que sintetiza la máxima variabilidad de la población objeto de estudio), denotado como y_1 que posee una varianza (valor propio) λ_1 , y utiliza esta nueva variable para estratificar la población (Cadena, 2008 citado por Guauque, 2008).

Los valores propios cuentan veintiuno, el equivalente al número total de variables. Los valores propios señalaron que se requieren los seis primeros componentes principales, ya que sus valores son superiores a 1. Estos componentes explican el 83,83% de la variación, sin embargo con 4 componentes se explica el 71.91% de la variación total, por lo tanto debe ser el número de componentes empleados para realizar la agrupación de los sitios (*Tabla 29*).

A fin de comprender el grado de participación de las variables originales en cada componente, se examinaron los vectores propios y la correlación entre las variables originales y los componentes principales.

Prin	Valor	Diferencia	Proporción	Acumulada
1	6.6985	1.5864	0.3045	0.3045
2	5.1121	2.9019	0.2324	0.5368
3	2.2102	0.4117	0.1005	0.6373
4	1.7985	0.3407	0.0818	0.7191
5	1.4578	0.2912	0.0663	0.7853
6	1.1666	0.3768	0.0530	0.8383
7	0.7898	0.1901	0.0359	0.8742
8	0.5997	0.1055	0.0273	0.9015
9	0.4942	0.0933	0.0225	0.9240
10	0.4009	0.0813	0.0182	0.9422
11	0.3196	0.0985	0.0145	0.9567
12	0.2212	0.0402	0.0101	0.9668
13	0.1810	0.0451	0.0082	0.9750
14	0.1359	0.0384	0.0062	0.9812
15	0.0975	0.0156	0.0044	0.9856
16	0.0819	0.0019	0.0037	0.9893
17	0.0800	0.0163	0.0036	0.9930
18	0.0637	0.0139	0.0029	0.9959
19	0.0498	0.0168	0.0023	0.9981
20	0.0330	0.0247	0.0015	0.9996
21	0.0083	0.0000	0.0004	1.0000

Tabla 29. Valores propios y proporción de la variación explicada-ACP.

Los coeficientes del primer vector propio señalado en la *Tabla 30*, indican que esta combinación lineal es aproximadamente un promedio de las variables edáficas con ponderación relativa mayor para sodio (0.2804), conductividad hidráulica (-0.2923) y las variables espectrales, banda 1 (0.2977), banda 2 (0.3184), banda 3 (0.3046), banda 4 (-0.3278) y banda 5 (0.3493). Este vector clasifica las variables espectrales principalmente y aquellas edáficas que tiene mejor correlación con estas, mientras que, el segundo vector propio clasifica las variables edáficas del complejo de cambio; esta combinación lineal contiene una ponderación relativa mayor para la capacidad de

intercambio catiónico efectiva (0.3934), calcio intercambiable (0.3162), potasio intercambiable (0.2997), magnesio intercambiable (0.2834) y el porcentaje de arcillas (0.3858).

Las variables edáficas pH (0.4216), Magnesio (0.3291), Carbón orgánico (0.3013) y el porcentaje de limos (0.4241) revelaron la mayor ponderación relativa del tercer vector propio. El cuarto vector propio es una combinación lineal aproximadamente de las variables dasométricas volumen total (0.5206) e índice de sitio (0.5703).

Los componentes principales 5 y 6 que tienen valores propios mayores a 1, no son representativos de las variables, ya que incluyen variables que han sido explicadas en los componentes anteriores, por lo que deben ser descartadas y así representando estos componentes a una variable original así: el quinto vector propio tiene a las variables pH (0.4369), conductividad hidráulica (0.2636) y precipitación (0.3120) las cuales están incluidas en los componentes principales 1 y 4; siendo el fósforo (0.2680) y la porosidad (0.4639), las únicas variables que estarían representadas en este grupo.

VARIABLE	Prin1	Prin2	Prin3	Prin4	Prin5	Prin6
VT	0.1514	-0.0159	0.2966	0.5206	0.0349	0.1886
IS	-0.1036	0.1085	0.0591	0.5703	-0.2052	0.2536
PH	0.0690	0.0357	0.4216	-0.2416	0.4369	0.0436
CICE	-0.0794	0.3934	0.0030	-0.0153	0.2816	0.1393
CA	-0.1575	0.3162	0.1740	0.0809	0.3141	0.1751
K	-0.1960	0.2997	0.2101	0.0724	-0.0952	-0.2054
MG	-0.0041	0.2834	-0.3291	-0.2486	0.2098	0.0830
NA	0.2804	0.1742	-0.2231	-0.0360	-0.1297	-0.0631
CO	-0.1945	0.1271	0.3013	-0.0737	-0.1072	-0.3189
P	-0.1472	0.1165	0.0470	0.1722	0.2680	-0.6162
L	0.2022	-0.0042	0.4241	-0.0452	0.0667	0.1513
AR	-0.0796	0.3858	-0.1794	0.0260	0.0322	0.1782
INFIL	-0.2057	0.2257	0.0083	-0.1319	-0.1836	0.3216
CH	-0.2923	0.1372	0.0422	-0.1730	-0.2636	0.1807
DAH	0.0404	-0.2579	0.2476	-0.3023	-0.0345	0.2415
POR	0.0661	-0.2055	-0.2502	0.2637	0.4639	0.1208
B1	0.2977	0.2154	-0.0923	0.0334	0.0148	-0.0481
B2	0.3184	0.1677	-0.0426	-0.0427	-0.0329	-0.0998
B3	0.3046	0.1745	0.1921	-0.1016	-0.0086	0.0247
B4	-0.3278	-0.1085	0.0642	-0.0186	-0.0465	-0.0891
B5	0.3493	0.0697	0.0771	-0.0599	-0.0929	-0.0157
PMM	0.2463	0.2299	0.1012	0.0833	-0.3120	-0.1703

Tabla 30. Vectores propios y proporción de la variación explicada-ACP.

Este fenómeno se presenta igualmente con el componente 6, que dentro de sus vectores con mayor ponderación relativa mayor están, el carbón orgánico (0.3189) y fósforo (0.6162), siendo la infiltración la variable no incluida entre algún componente principal descrito anteriormente. Por lo tanto el componente principal 5 sería del fósforo y la porosidad y el componente 6 de la infiltración.

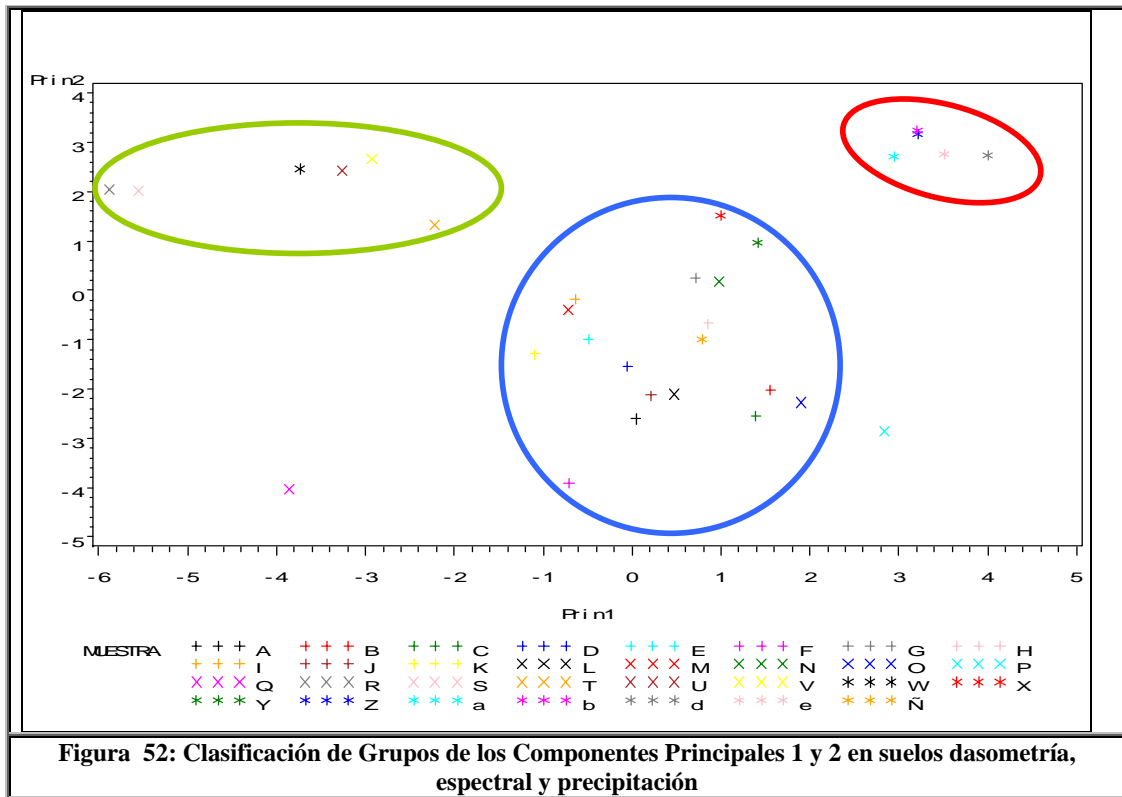
Demey et al (1994) cit. Guauque 2008, caracterizaron fincas productoras de arroz mediante el ACP, en siete componentes que explicaban el 59% de la variación total. Clasificando en cuatro estratos el grado de manejo en las fincas. Mientras que la

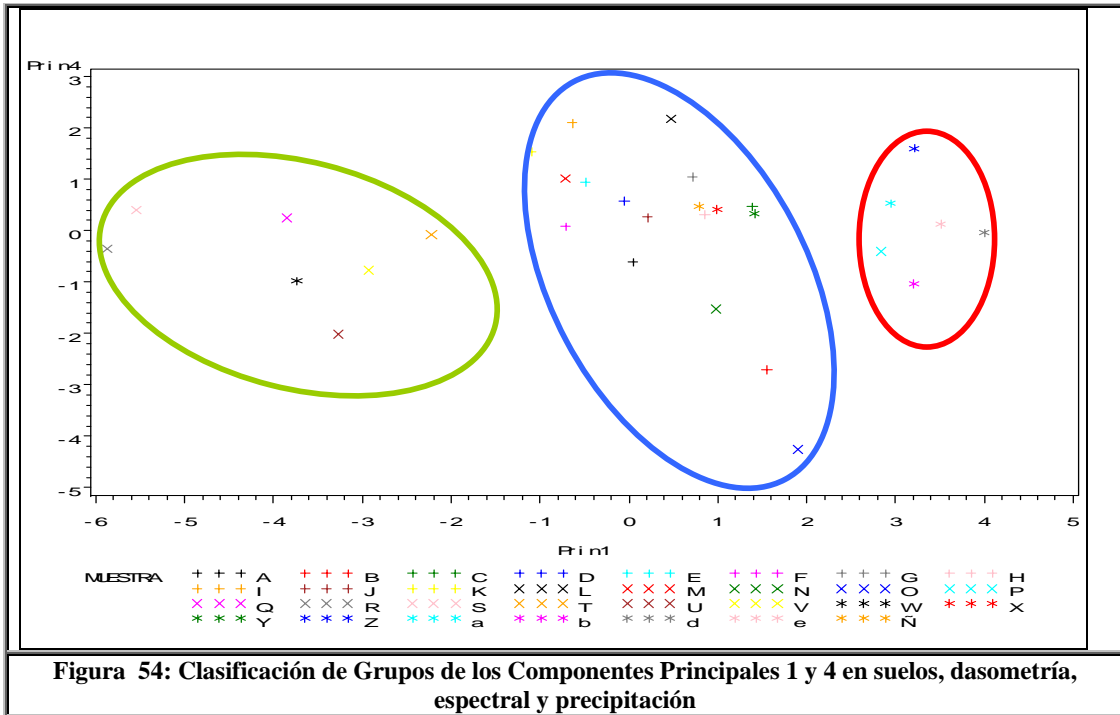
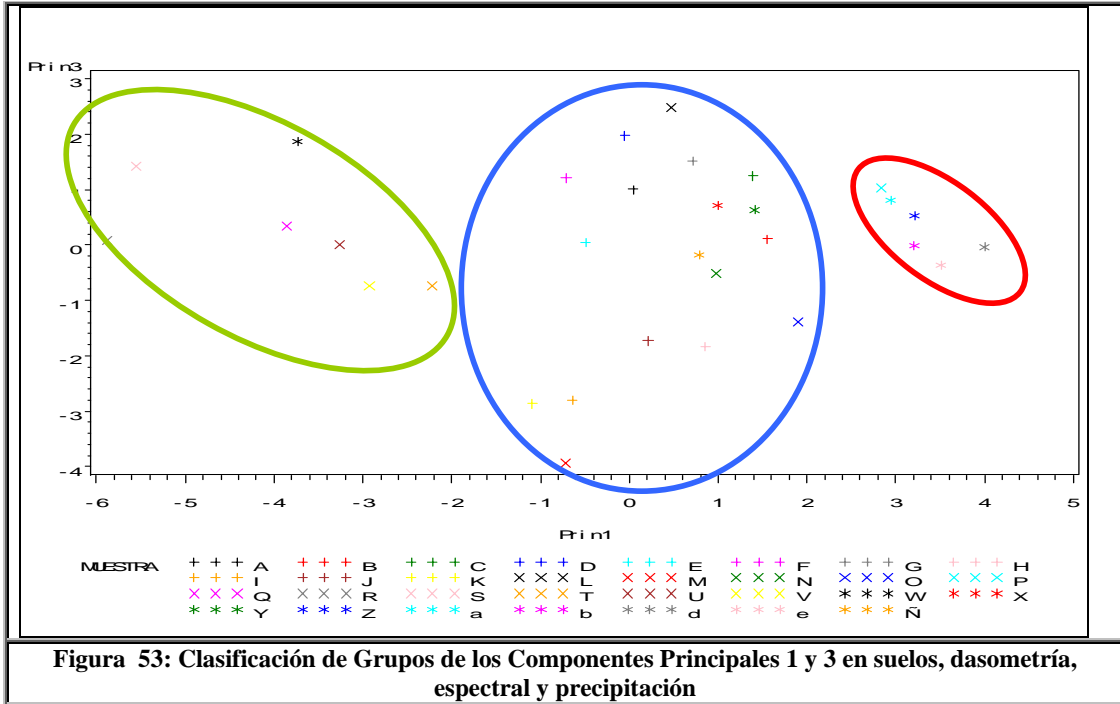
presente investigación logra explicar el comportamiento de cuatro áreas plantadas con Ceiba en seis componentes principales con un 83,83%.

Berrotéran (1998) cit. Guauque 2008, utilizó el análisis de componentes principales para seleccionar las variables con menos pérdida de información para los primeros 12 componentes. Selecciono al calcio, magnesio, bases disponibles, arena y arcilla de los horizontes superficiales y sub-superficiales y fragmentos gruesos superficiales a partir del análisis de componentes principales, para evaluar la diferenciación entre matorrales, sabanas y bosques por medio de variables edáficas.

Baquero y Vargas (2002) cit. Guauque 2008, utilizaron el análisis de componentes principales para hacer una agrupación preliminar a partir de variables vegetales y edáficas de un área del Páramo de Sumapaz; con el fin de explicar la composición florística. Aparicio y Zapata (2005), emplearon esta técnica para diferenciar entre grupos la vegetación y los suelos encontrados en la Región del Carare – Opón, para definir unidades de suelo y de Bosque Secundario.

En las Figuras 52, 53, 54, y 55, se representan de los sitios de muestreo con diferentes colores del Área Global de Estudio. Cada sector (unidades) del plano definido por estos componentes principales sintetiza una condición diferente, de manera que una vez conocida la ubicación de sitio en el plano se realizó la agrupación preliminar de condiciones.





Factor	Valor	Diferencia	Proporción	Acumulada
1	6.6985	1.5864	0.3045	0.3045
2	5.1121	2.9019	0.2324	0.5368
3	2.2102	0.4117	0.1005	0.6373
4	1.7985	0.3407	0.0818	0.7191
5	1.4578	0.2912	0.0663	0.7853
6	1.1666	0.3768	0.0530	0.8383
7	0.7898	0.1901	0.0359	0.8742
8	0.5997	0.1055	0.0273	0.9015
9	0.4942	0.0933	0.0225	0.9240
10	0.4009	0.0813	0.0182	0.9422
11	0.3196	0.0985	0.0145	0.9567
12	0.2212	0.0402	0.0101	0.9668
13	0.1810	0.0451	0.0082	0.9750
14	0.1359	0.0384	0.0062	0.9812
15	0.0975	0.0156	0.0044	0.9856
16	0.0819	0.0019	0.0037	0.9893
17	0.0800	0.0163	0.0036	0.9930
18	0.0637	0.0139	0.0029	0.9959
19	0.0498	0.0168	0.0023	0.9981
20	0.0330	0.0247	0.0015	0.9996
21	0.0083	0.0083	0.0004	1.0000
22	0.0000		0.0000	1.0000

Tabla 31. Valores propios y proporción de la variación explicada-AFP.

La *Tabla 32* muestra que el primer factor tiene coeficientes de 0.28, -0.29, 0.30, 0.32, 0.30, -0.33 y 0.35 para las variables Na, CH, B1, B2, B3, B4 y B5 (respectivamente), y coeficientes más pequeños para las variables restantes. Esto indica que la primera combinación lineal refleja el “Valor de Importancia del Espectro” (VIE), así como de dos variables edáficas que tienen una buena correlación con las variables espectrales. Cada factor puede asociarse con una variable, con aquella que posee el valor mayor en el vector. Así tenemos, que adicional a la primera correspondencia (Na, CH, B1, B2, B3, B4 y B5), existe una segunda con los coeficientes más altos entre CICE (0.39), Ca (0.32), K (0.30), Mg (0.28) y Ar (0.39); generándose la segunda combinación lineal denominada “Valor de Importancia del Complejo de Cambio” (VICC).

VARIABLE	Factor 1	Factor 2	Factor 3	Factor 4	Factor 5	Factor 6
VT	0.1514	-0.0159	0.2966	0.5206	0.0349	0.1886
IS	-0.1036	0.1085	0.0591	0.5703	-0.2052	0.2536
PH	0.0690	0.0358	0.4216	-0.2416	0.4369	0.0436
CICE	-0.0794	0.3935	0.0030	-0.0153	0.2816	0.1393
CA	-0.1575	0.3162	0.1740	0.0809	0.3141	0.1751
K	-0.1960	0.2997	0.2101	0.0725	-0.0952	-0.2054
MG	-0.0041	0.2834	-0.3291	-0.2486	0.2098	0.0830
NA	0.2804	0.1742	-0.2231	-0.0360	-0.1297	-0.0631
CO	-0.1945	0.1271	0.3013	-0.0737	-0.1072	-0.3190
P	-0.1472	0.1165	0.0470	0.1722	0.2680	-0.6162
L	0.2022	-0.0042	0.4241	-0.0452	0.0667	0.1513
AR	-0.0796	0.3858	-0.1794	0.0260	0.0322	0.1782
INFIL	-0.2057	0.2257	0.0083	-0.1319	-0.1836	0.3216
CH	-0.2924	0.1372	0.0422	-0.1730	-0.2636	0.1807
DAH	0.0404	-0.2579	0.2476	-0.3023	-0.0345	0.2415
POR	0.0661	-0.2055	-0.2502	0.2637	0.4639	0.1208
B1	0.2977	0.2154	-0.0923	0.0334	0.0148	-0.0481
B2	0.3184	0.1677	-0.0426	-0.0428	-0.0329	-0.0998
B3	0.3046	0.1745	0.1921	-0.1017	-0.0086	0.0247
B4	-0.3278	-0.1085	0.0642	-0.0186	-0.0465	-0.0891
B5	0.3493	0.0697	0.0771	-0.0599	-0.0929	-0.0157
PMM	0.2463	0.2299	0.1012	0.0833	-0.3120	-0.1703

Tabla 32. Vectores propios y proporción de la variación explicada-AFP.

El tercer factor tiene coeficientes de 0.42, 0.30 y 0.42 para las variables pH, CO, y L respectivamente, exceptuando al Mg (-0.33) que está incluido en un factor anterior; obteniendo la combinación lineal del “Valor de Importancia físico – químico – orgánico” (VIFQO). La cuarta correspondencia con coeficientes más altos para VT (0.52), y IS (0.57); generándose una combinación lineal denominada “Valor de Importancia Dasométricas” (VID).

El factor 5 es representativo de POR (0.46) y el factor 6 de P (0.62) y de INFIL (0.32), manteniendo la combinación lineal del “Valor de Importancia de la Porosidad” (VIPOR) y una segunda combinación lineal “Valor de Importancia del Fósforo - Infiltración” (VIPI).

Como la proporción de variación de cada variable explicada en los dos primeros factores, es la suma de sus correlaciones al cuadrado, las variables mejor explicadas se ubicarán cerca del círculo imaginario (centro origen de coordenadas) y las menos explicadas, cerca del origen de coordenadas. Adicionalmente, para medir la contribución relativa de la posición de la variable j al eje factorial α , es decir mediante el coseno al cuadrado del ángulo ω_j ; se miden los valores de estos cosenos al cuadrado más próximos a 1, de tal forma que entre más cercanos a 1 indica que las variables están asociadas altamente con el respectivo eje. Esto implica que un coseno cuadrado próximo a 1 corresponde a un ángulo cercano a 0° o a 180° .

Las propiedades edáficas más influyentes de acuerdo a los cuatro factores principales establecidos como los necesarios para explicar la variabilidad del conjunto de datos en estudio fueron: de las variables espectrales las bandas 5, 4, 2 y 3; la variable ambiental precipitación; las variables edáficas Capacidad de Intercambio Catiónico

Efectivo, porcentaje de Arcillas y Calcio intercambiable; y las variables dasométricas índice de sitio y volumen total (Figuras 56, 57 y 58).

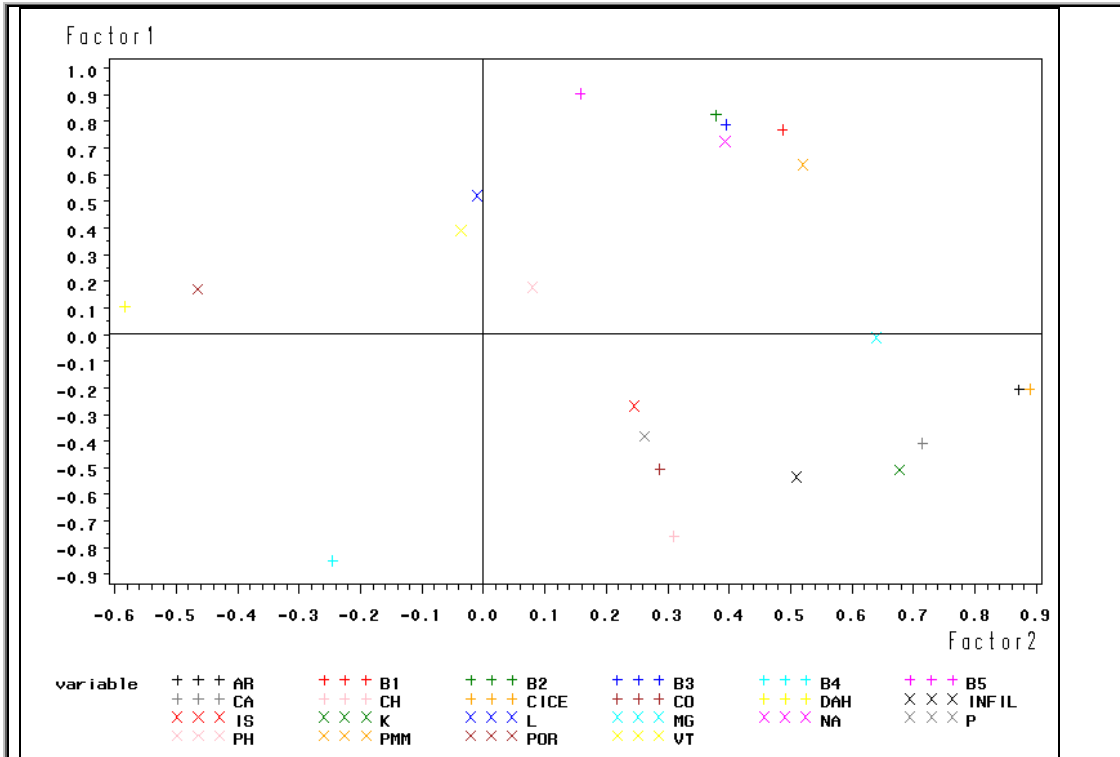


Figura 56: Clasificación de Grupos por Factor Principal 1 y 2 en suelos, dasometría, espectral y precipitación

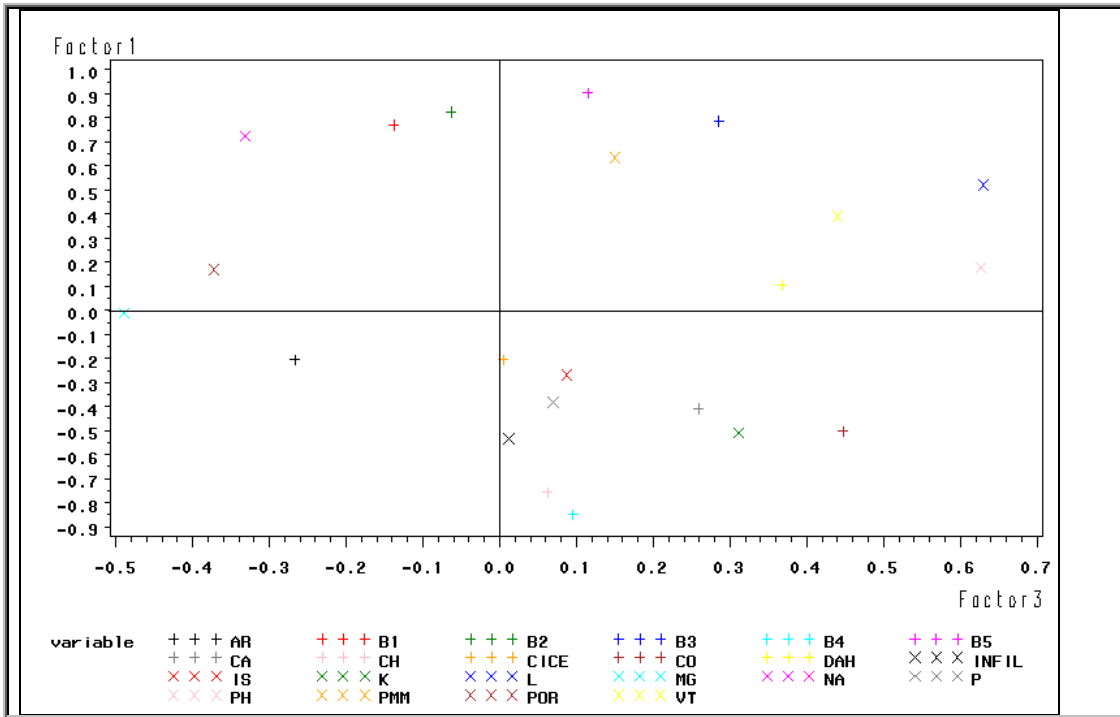
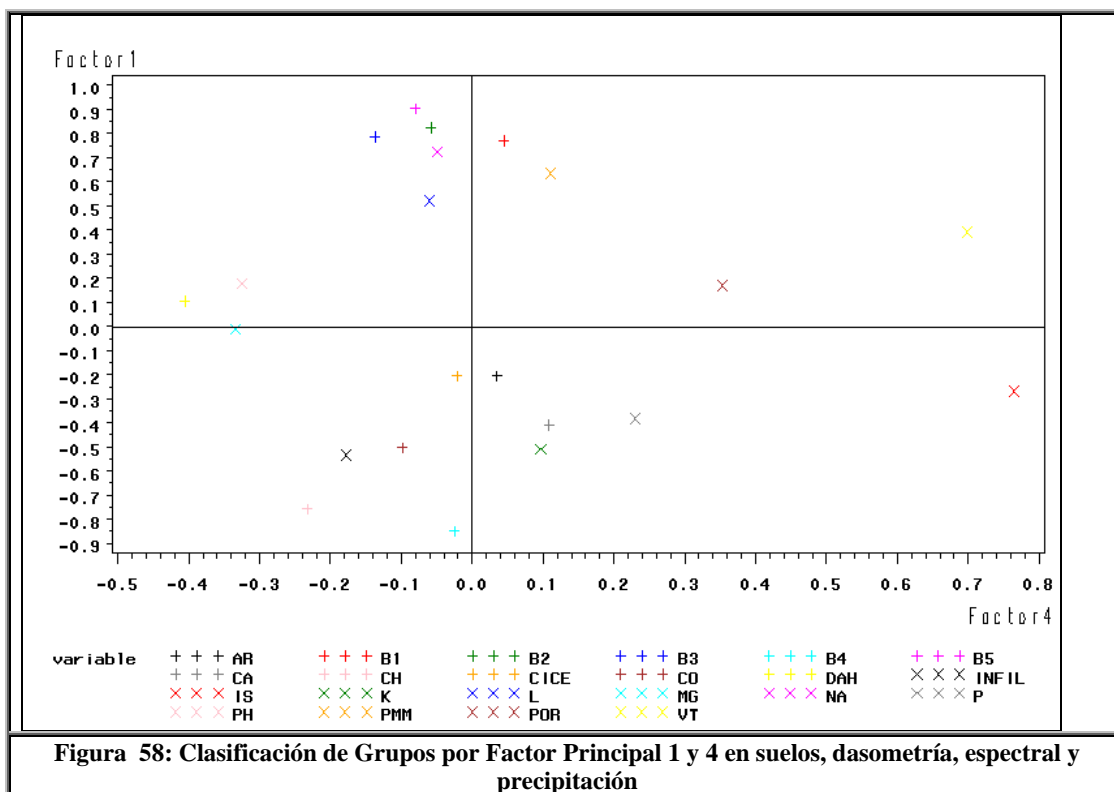


Figura 57: Clasificación de Grupos por Factor Principal 1 y 3 en suelos, dasometría, espectral y precipitación



Para evaluar la bondad del análisis de factor principal en el software SAS, se calcularon dos índices: Medida de adecuación de la muestra Kaiser's (MSA) y la comunalidad (Tablas 33 y 34).

Los valores extremos que las comunalidades pueden alcanzar son: de una parte 0.0 si las variables no tienen correlación, de otra parte, 1.0 si la varianza es perfectamente reunida por el conjunto de factores propuestos (Díaz, 2007).

VT	IS	PH	CICE	CA	K	MG	NA	CO	P	L
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
AR	INFIL	CH	DAH	POR	B1	B2	B3	B4	B5	PMM
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1

Tabla 33. Comunalidad Preliminar.

VT	IS	PH	CICE	CA	K	MG	NA	CO	P	L
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
AR	INFIL	CH	DAH	POR	B1	B2	B3	B4	B5	PMM
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1

Tabla 34. Comunalidad Final.

Como se mencionó anteriormente, el análisis de factor principal estudia la comunalidad, la cual es el proceso donde a la matriz de correlación se le cambian los elementos de la diagonal por las respectivas comunalidades, se obtiene la matriz de correlación reducida (Tabla 35). Para estimar la matriz, primero se debieron estimar las comunalidades (Díaz, 2007).

Las variables originales al superar estos índices, demuestran que estaban correlacionadas, y que al determinar los factores subyacentes, se establecieron una nuevas variables no correlacionadas, útiles para nuevos análisis (Johnson, 2000).

Para asegurar la existencia de los grupos y confirmar los individuos de cada uno de ellos se realizó el Análisis Discriminante, este procedimiento DISCRIM se desarrollo con la opción POOL=YES, en SAS con el objetivo de evaluar las matrices de varianza – covarianza combinadas y no combinadas, debido a que se producen matrices resúmenes de clasificación y con la opción PRIORS PROP por que los únicos datos de los que se dispone para probar la regla discriminante son aquellos que se están usando para formar la propia regla, y estos conjuntos de datos no tienen números iguales en cada uno de los tres grupos. Como consecuencia, para cumplir la regla discriminante, se debe dar peso a las clasificaciones a favor de aquel grupo que tuvo más observaciones (Johnson, 2000).

En la *Tabla 36*, se definen o se redefinen los puntos de muestreo en las unidades originalmente encontradas o en nuevas unidades, de acuerdo con la estimación de Probabilidades Posteriores. Los datos numéricos indican la probabilidad de pertenecer a un grupo o a otro, la suma de los tres es igual a uno, y entre más cercano a éste, mayor probabilidad de pertenecer a uno u otro grupo.

	VT	IS	PH	CICE	CA	K	MG	NA	CO	P	L	AR	INFIL	CH	DAH	POR	B1	B2	B3	B4	B5	PMM		
VT	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
IS	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
PH	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
CICE	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
CA	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
K	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
MG	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
NA	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
CO	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
P	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
L	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
AR	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
INFIL	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
CH	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
DAH	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
POR	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
B1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
B2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
B3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
B4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
B5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
PMM	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Tabla 35. Matriz de Correlación Residual en la Diagonal para suelos, dasometría, espectral y precipitación

PUNTOS	DEL GRUPO	AL GRUPO	A	B	C
A	A	A	1	0	0
B	A	A	1	0	0
C	A	A	1	0	0
D	A	A	1	0	0
E	A	A	1	0	0
F	A	A	1	0	0
G	A	A	1	0	0
H	A	A	1	0	0
I	A	A	1	0	0
J	A	A	1	0	0
K	A	A	1	0	0
L	A	A	1	0	0
M	A	A	1	0	0
N	A	A	1	0	0
Ñ	A	A	1	0	0
O	A	A	1	0	0
P	C	C	0	0	1
Q	B	B	0	1	0
R	B	B	0	1	0
S	B	B	0	1	0
T	B	B	0	1	0
U	B	B	0	1	0
V	B	B	0	1	0
W	B	B	0	1	0
X	A	A	1	0	0
Y	A	A	1	0	0
Z	C	C	0	0	1
A	C	C	0	0	1
B	C	C	0	0	1
D	C	C	0	0	1
E	C	C	0	0	1

Tabla 36. Definición y redefinición de los grupos por validación cruzada usando la Función Lineal Discriminante y la Distancia Cuadrada Generalizada de Pairwise.

Los 31 puntos inicialmente clasificados dentro de cada uno de los grupos, fueron reclasificados en sus mismos grupos, por el método de validación cruzada. El grupo A (Andaluz), el grupo B (Hachados) y el grupo C (San José). En general, tales opciones de reclasificación son porcentualmente bajas (error total = 0%), admitiendo por lo tanto que las unidades de clasificación originales son muy apropiadas.

La estimación de las probabilidades se puede realizar por cuatro métodos, el empleado es “Estimaciones por Resustitución” (Tabla 37), siendo igualmente evaluado por “estimaciones por Validad cruzada” (Tabla 38), el cual resulta ser el mejor método. A

continuación se anexan las tablas resúmenes de la clasificaciones por los dos métodos, siendo aproximadamente iguales con la diferencia que la validación cruzada clasifico una muestra del Grupo A al grupo B y del grupo C al Grupo A.

DEL GRUPO	A	B	C	Total
A	18	0	0	18
	100	0	0	100
B	0	7	0	7
	0	100	0	100
C	0	0	6	6
	0	0	100	100
Total	18	7	6	31
	58.06	22.58	19.35	100
Anterior	0.58065	0.22581	0.19355	

Tabla 37. Resumen de Clasificación por Resustitución usando la Función Lineal Discriminante.

DEL GRUPO	A	B	C	Total
A	17	1	0	18
	94.44	5.56	0	100
B	0	7	0	7
	0	100	0	100
C	1	0	5	6
	16.67	0	83.33	100
Total	18	8	5	31
	58.06	25.81	16.13	100
Anterior	0.58065	0.22581	0.19355	

Tabla 38. Resumen de Clasificación por Validación Cruzada usando la Función Lineal Discriminante.

La clasificación de los puntos de muestreo es posible realizar por medio de la distancia cuadrada de Mahalanobis entre este y cada una de las medias de las poblaciones y, a continuación, clasificar esa observación en una población a cuya media se encuentra más próxima (Johnson, 2000).

La afinidad de los grupos entre sí, se analizan mediante la distancia cuadrada generalizada de Pairwise. Al analizar la *Tabla 39*, se observa que el mejor agrupamiento de las parcelas en las mencionadas unidades de suelos, se obtiene en el grupo A (1.09), con respecto a B (2.98) y C (3.28). De otra parte, la mayor tendencia de acercamiento entre las diferentes unidades de suelos, se observa entre las unidades A y C con distancias recíprocas de 65.06 y 62.86; y el distanciamiento más acentuado es entre el grupo B y el grupo C (350.13 y 350.44).

DEL GRUPO	A	B	C
A	1.08723	186.43419	65.06133
B	184.54526	2.97615	350.43817
C	62.8641	350.12987	3.28446

Tabla 39. Distancia Cuadrada Generalizada en suelos.

Sin perjuicio alguno, la *Tabla 39*, muestra que la matriz de la distancia cuadrada de Mahalanobis no es simétrica, debido a que las matrices de varianzas – covarianzas o las

probabilidades previas son desiguales (Johnson, 2000). Se determina esta situación debido a que la distancia cuadrada entre el grupo A y B es ponderada de manera diferente que las distancias entre el grupo B y A.

De acuerdo con la función lineal discriminante se deducen tres ecuaciones (*Tabla 40*) correspondientes a cada una de los grupos (variables dependientes), en función de las variables de clasificación (variables independientes). Finalmente, cada una de las unidades de está representada por una ecuación.

Al efectuar reemplazamientos de valores reales en cada una de las variables independientes de la *Tabla 40*, se obtienen los valores de los índices de grupo correspondientes al grado de diferenciación de las diferentes unidades por efecto de las plantaciones de Ceiba. Así tenemos, que al asignar los registros de cada uno de los puntos en las funciones lineales discriminantes para cada grupo de variables independientes, se obtienen los índices correspondientes al grado de diferenciación de las unidades.

Variable	A	B	C
Constante	-16609.0000	-15845.0000	-17045.0000
VT	-3049.0000	-3006.0000	-3130.0000
IS	149.1987	147.4525	156.6619
PH	46.4398	69.1066	45.9777
CICE	10.4228	8.8973	10.7443
CA	13.9292	12.6674	13.7377
K	-256.0626	-269.1784	-250.1881
MG	54.3843	48.2535	54.3280
NA	-59.3331	-61.5789	-49.6839
CO	110.3036	116.5808	111.6614
P	-1.4362	-1.1749	-1.5482
L	31.1750	29.0412	32.1015
AR	-35.4504	-31.2775	-36.7054
INFIL	1.7143	1.2969	2.0554
CH	239.3936	272.9527	215.0369
DAH	1471.0000	1433.0000	1380.0000
POR	86.6051	79.2924	87.0054
B1	99.4113	103.2947	97.6925
B2	206.4304	195.6374	210.6815
B3	-34.0766	-29.9272	-31.3491
B4	85.7711	87.1354	87.2737
B5	4.2963	0.8123	6.0183
PMM	4.7470	4.3564	4.7690

Tabla 40. Función Lineal Discriminante con suelos.

Se observa una clara diferenciación, entre los grupos A y B (Andaluz y Hachados), mientras que el grupo C (San José) es transversal a estos dos grupos.

La *Tabla 41*, se construyó luego de reemplazar el valor de cada una de las variables de los 31 puntos de muestreo, dentro de la ecuación obtenida con la función lineal discriminante. Posteriormente obteniendo los estadísticos básicos a partir del valor que tomo cada punto a partir de la función lineal discriminante.

F.L.D. - GA					
GRUPO	MEDIA	DESV. EST.	COEF. VAR.	MINIMO	MAXIMO
GA	14405.53	253.78	0.02	14040.35	14925.70
GB	12932.30	303.05	0.02	12629.32	13577.45
GC	14721.62	371.05	0.03	14300.02	15136.01
F.L.D. - GB					
GRUPO	MEDIA	DESV. EST.	COEF. VAR.	MINIMO	MAXIMO
GA	14261.83	233.62	0.02	13903.31	14733.66
GB	12999.83	281.11	0.02	12683.03	13586.76
GC	14533.68	360.93	0.02	14120.38	14931.58
F.L.D. - GC					
GRUPO	MEDIA	DESV. EST.	COEF. VAR.	MINIMO	MAXIMO
GA	14288.90	263.36	0.02	13907.41	14822.12
GB	12748.06	305.12	0.02	12441.95	13393.99
GC	14662.27	377.45	0.03	14221.40	15082.77

Tabla 41. Función Lineal Discriminante para los grupos A, B y C con suelos.

Para identificar diferencias entre dos o más grupos a partir de medidas de características de los individuos pertenecientes a esos grupos, el análisis canónico discriminante (ACD) es una técnica estadística multivariada que permite la comprensión de las relaciones entre las variables evaluadas dentro de esos grupos. El ACD estima funciones lineales (funciones o variables canónicas) a partir de las variables cuantificadas, realizando la separación de los grupos de individuos al maximizar la varianza entre los grupos y minimizar la varianza dentro de los grupos; utilizando el PROC CANDIS en SAS.

A partir de un conjunto de datos cuantitativos separados en clases, el análisis canónico discriminante determina la correlación canónica entre el grupo de variables cuantitativas (variables dasométricas, espectrales, edáficas, en este caso) y un grupo de variables codificadas que representan las diferentes clases (unidades de respuesta espectral de plantaciones de Ceiba). Las variables canónicas derivadas son combinaciones lineales de las variables cuantitativas y sintetizan la variación entre clases.

La Probabilidad $Pr > F$ determina el número de funciones canónicas seleccionadas, siendo adecuadas dos funciones canónicas, *Tabla 42*.

CAN	Ratio F	Value	Num DF	Den DF	Pr > F
1	0.0031	6.47	42	16	0.0001
2	0.1423	2.71	20	9	0.0631

Tabla 42. Prueba de hipótesis nula. Probabilidad aproximada.

La *Figura 59*, ilustra las medias de las funciones canónicas, siendo la primera función (CAN1) la que determina una clara diferenciación entre los grupos y la segunda función canónica (CAN2) está determinando a menor escala una diferenciación entre el grupo A con los grupos B y C. El eje CAN2 es diferenciador entre los grupos, pero su bajo nivel explicativo es demostrado por el valor propio del mismo, frente al valor propio de la primera variable canónica (*Tabla 43*).

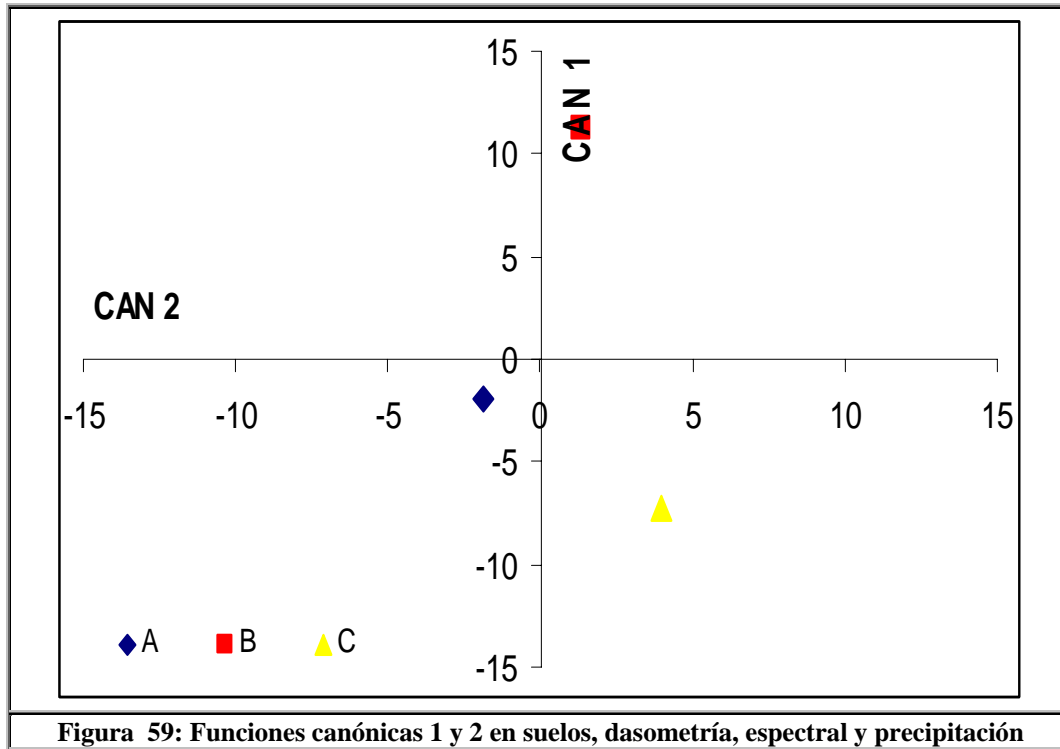


Figura 59: Funciones canónicas 1 y 2 en suelos, dasometría, espectral y precipitación

CAN	Valor propio	Diferencia	Proporción	Acumulado
1	45.0879	39.0606	0.8821	0.8821
2	6.0273		0.1179	1.0000

Tabla 43. Valores propios de las funciones canónicas.

La Figura 60, muestra los valores (calificaciones) de las proyecciones de todos los puntos de muestreo, sobre el espacio canónico bidimensional, en unidades estandarizadas. Note que el Grupo A se ubica en tercer cuadrante del eje CAN 1 y CAN 2, el Grupo B en el primer cuadrante y el Grupo C en el cuarto cuadrante.

La representación grafica permite ver el grado de agrupación de los puntos en estudio, pero se puede apreciar un cambio abrupto en las características de los grupos. De allí que la distancia cuadrada generalizada presente valores altos entre los grupos (Tabla 44).

DEL GRUPO	A	B	C
A	0.0000	183.4580	61.7769
B	183.4580	0.0000	347.1537
C	61.7769	347.1537	0.0000

Tabla 44. Distancia cuadrada generalizada.

Para definir las dos primeras funciones canónicas en términos de datos estandarizados, se emplearon los Coeficientes canónicos en bruto (Tabla 45). Estas dos ecuaciones son modelos de agrupación de los tres grupos diferenciados en los análisis previos. La ecuación se genera para cada función canónica, el tomar cada uno de sus coeficientes y relacionarlo con la variable respectiva.

Variable	Can1	Can2
VT	5.4729	-9.0333
IS	-0.3653	0.9517
PH	1.4249	1.2186
CICE	-0.5775	1.1900
CA	0.3998	-1.3295
K	-0.5458	-1.1469
MG	0.0925	-1.5862
NA	0.0000	0.0000
CO	0.3435	0.5466
P	0.0201	-0.0010
L	-0.1645	0.0096
AR	0.3026	0.0597
INFIL	-0.0377	0.0244
CH	2.9241	-1.5281
DAH	0.7832	-14.7847
POR	-0.4683	-0.3578
B1	0.3005	-0.0220
B2	-0.8172	-0.0128
B3	0.1641	0.6189
B4	0.0331	0.2888
B5	-0.2758	0.0451
PMM	-0.0250	-0.0190

Tabla 45. Coeficientes canónicos en bruto

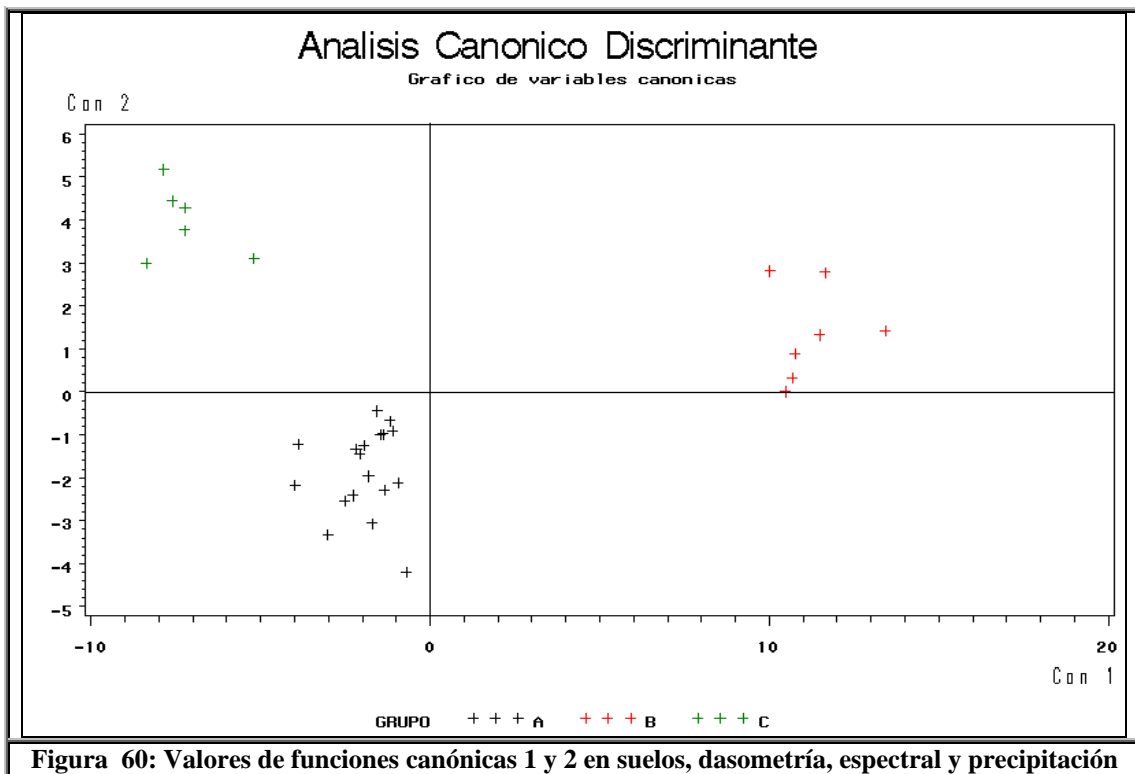


Figura 60: Valores de funciones canónicas 1 y 2 en suelos, dasometría, espectral y precipitación

5.7. INTERPRETACIÓN DE DATOS ESTADÍSTICOS MULTIVARIADOS Y TOMA DE DECISIONES

El número de variables observadas y medidas por gestión de inventarios varía, pero las intensidades de muestreo son generalmente mucho mayores que para los inventarios estratégicos, a menudo con múltiples parcelas por hectárea. Los costos asociados con estas intensidades de muestreo son cada vez más prohibitivos (McRoberts, 2008). Por lo anterior es importante buscar alternativas con menor costo como variables alternas que ayuden a mejorar las intensidades de muestra obtenidas para la dasometría y algunas propiedades de los suelos.

Por otro lado, al término del estudio se observa que el ajuste de los modelos matemáticos de la biomasa forestal viva y carbono por encima del suelo, utilizando datos de dos satélites LANDSAT e IKONOS II, de una unidad fitoecológica bosque umbrófilo de tierra firme, en Manaos (Amazonas Central, Brasil) y cuantificando, se ha logrado por medio del análisis de vegetación y el ajuste de ecuaciones matemáticas (Matos, 2006). Lo que demuestra que cada vez más los autores coinciden con que es posible determinar con modelos matemáticos los volúmenes a partir de imágenes de media y alta resolución.

Analizando los resultados de la dasometría con las bandas, en la muestra grande (127 puntos) se observa en resumen que los tres grupos (Andaluz, Hachados y san José) se separan estadísticamente muy bien, con errores aceptables para analizarse con solo dos grupos de variables (dasometría y espectro), lo que demostró mayores posibilidades de utilización de las variables correlacionadas con diferente significancia; los componentes principales se explicaron con estos dos grupos, un componente principal explicando principalmente el espectro y el segundo la dasometría; los vectores y factores propios mostraron respuestas similares que lo anteriormente explicado, sin embargo la comunalidad respondió adecuadamente para el volumen total, pero no alcanza a ser tan adecuado para índice de sitio; al reclasificar los grupos se comportan bien y se obtuvo un claro comportamiento de los mismos explicado con la multinormalidad; y finalmente se observó que el análisis canónico discriminante se explicó casi en su totalidad con función canónica discriminante uno (Can1), aunque con Can2, se complementó bien.

Por lo anterior como resultado de la interpretación estadística de la muestra grande, se recomienda utilizar datos del espectro especialmente de las bandas B3, B4 y B5 puesto que su correlación fue significativa y la separación de grupos y demás análisis estadísticos adecuados. Por otro lado no se recomienda utilizar las bandas electromagnéticas para mejorar la muestra del *índice de sitio*. Al observar la variable precipitación con las bandas las correlaciones fueron mayores comparadas con dasometría, lo que permite interpretar que la precipitación aporta de manera significativa al modelo buscado.

En la muestra pequeña, en cuanto a las propiedades químicas de los suelos presentó buena correlación con las bandas y la *precipitación*, la variable *sodio* (Na) y con menor correlación *contenido orgánico*, *pH*, *fósforo* y *potasio* y en cuanto a las propiedades físicas del suelos las variables *limo* y *conductividad hidráulica*, presentaron una buena correlación y con menor correlación se tuvo *infiltración*, la variable *porosidad* presentó correlación sólo con *precipitación*. Es importante aclarar que los resultados estadísticos de las propiedades de los suelos trabajados tomaron mayor valor al analizarlos de manera integral, en el caso de componentes y factores principales donde se explicaron las 22 variables (2 dasométricas, 14 de suelos, 5 espectrales y 1 climática), solo en 6 componentes principales, pero además donde la comunalidad fue igual a uno (1,0), lo que significó que si

la varianza fue perfectamente reunida como se presentó en el caso de estudio, así como la correlación residual en todos los casos presentó cero, la separación de los tres grupos fue casi perfecta con error del 0%, lo cual permitió separar los grupos excelentemente con la definición y redefinición de los grupos por validación cruzada usando la Función Lineal Discriminante y la Distancia Cuadrada Generalizada de Pairwise, y con las funciones canónicas discriminantes y el análisis canónico discriminante.

Lo que permitió interpretar que fue acertado los resultados de suelos que se estimaron de manera integral, a partir de la definición del mejor juego de variables, seleccionadas y modeladas hasta obtener la mejor separación, lógicamente fue de mayor utilidad para las variables con alta o media correlación. Sin embargo, las variables con baja correlación, eventualmente podrían apoyarse con datos espectrales y de precipitación, aunque de manera indicativa, para estudios de planificación de inventarios y toma de muestras, ver ítem 5.4.4.

Para el ejercicio de mejorar las muestras con variables como las bandas y la precipitación, los índices de vegetación a partir de las mismas bandas electromagnéticas al parecer éstos últimos no presentan aportes adicionales significativos y los cuatro índices respondieron de manera similar en la zona de estudio, posiblemente afectados por la época seca de la toma de muestra.

5.8. VARIABILIDAD ESPACIAL

Basados en los resultados estadísticos, se hicieron cuatro ejercicios prácticos de aplicación de la estimación de cuatro variables con el método Kriging como el mejor estimador lineal insesgado¹⁵, por ser además en origen, una técnica no paramétrica coincidiendo con Chirici, 2008 y con Sales 2007, que para esta clase de estudios comentan que es lo más adecuado.

Por otro lado Las aplicaciones que han recibido una mayor atención en la geoestadística de minas son los casos donde dos o más variables están muestreadas, pero una está menos muestreada que las otras o existe la presencia de errores de muestreo (Díaz, 2002). Lo que también es muy usual encontrar en casos forestales. Donde, existe un número de dificultades prácticas, la más importante de todas es la ausencia de modelos estándar para las covarianzas cruzadas o covariogramas. Uno de los modelos más simples, el modelo lineal "estricto", no produce una varianza de estimación menor que el Kriging separado excepto en los dos casos mencionados anteriormente. Además existen dos métodos de estimación de combinaciones lineales de variables regionalizadas, la estimación directa y la estimación conjunta, donde, el método directo tiene un número de ventajas obvias: 1) Sólo un variograma debe ser modelado, 2) Requiere menor tiempo de cómputo debido a que las componentes de la matriz de coeficientes son escalares en lugar de matrices (Díaz, 2002).

Con los anteriores cuatro ejercicios realizados con kriging, permitieron ser comparados con el método cokriging, donde se utilizó como covariables las bandas, la precipitación y ambas. Estas variables fueron: 1) *volumen total*, dado que como variable dasométrica presentó mejores resultados de correlación y demás análisis que su compañera, 2) *sodio*

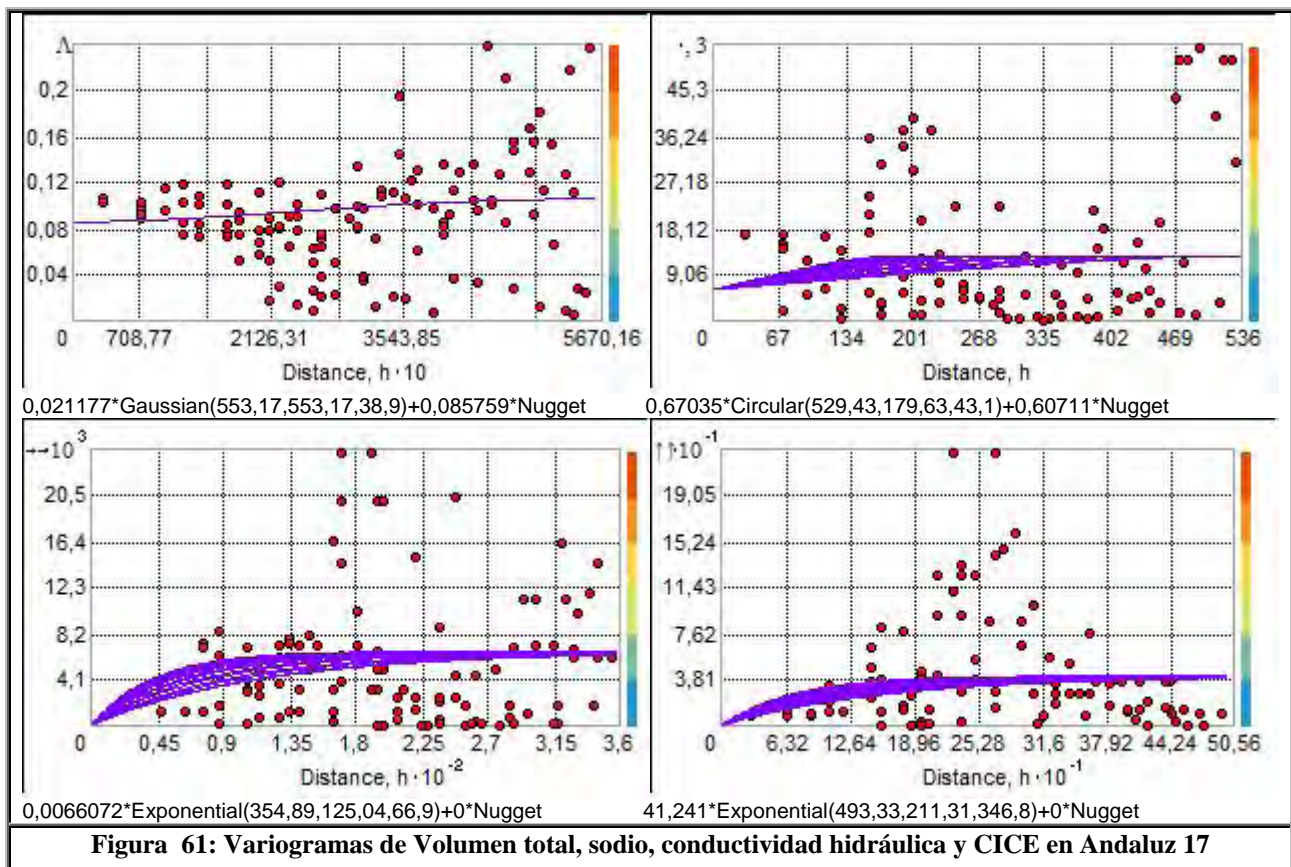
¹⁵ "Lineal" porque es una combinación lineal de los datos, "insesgado" porque el error de estimación tendrá una media igual a cero, y "mejor" en el sentido del error de varianza mínima para un modelo dado de covarianza/variograma.

(Na), como propiedad química del suelo que presentó la mejores correlaciones con el espectro y la precipitación, 3) *conductividad hidráulica*, aunque la variable *limo* presento también buenas correlaciones, ésta variable tiene mayor funcionalidad desde lo forestal y explica mejor algunas propiedades importantes de física de suelos como la disponibilidad del agua, y 4) *capacidad de intercambio catiónico efectiva* CICE, la cual aunque no tiene mayor correlación con el espectro ni la precipitación, se obtuvieron algunos resultados para su análisis, especialmente para medir su alcance como modelo integrado de suelos.

En la *Tabla 46*, se presentan los datos de los variogramas para las cuatro variables seleccionadas para determinar la variabilidad espacial y en la *Figura 61*, se observan los variogramas, arriba a la izquierda *volumen total*, arriba a la derecha *sodio*, abajo a la izquierda *conductividad hidráulica* y abajo a la derecha *CICE*.

Variable	Estimación	Variograma	Dirección	Pepita (Co)	Meseta Parcial (C)	Rango
VOLUMEN TOTAL	Kriging	Gaussiano	39	0,086	0,021	553
SODIO	Kriging	Circular	43	0,61	0,67	529
CONDUCTIVIDAD HIDRAULICA	Kriging	Exponencial	67	0,000	0,007	355
CICE	Kriging	Exponencial	347	0	41	493

Tabla 46. Parámetros de variogramas de kriging para volumen total, sodio, conductividad hidráulica y CICE



Los variogramas de *sodio*, *conductividad hidráulica* y *CICE*, presentaron características adecuadas dado que pepita es menor que la meseta parcial y por tanto su error medio

cuadrático es más adecuado y el modelo en general. El *volumen total* aunque no ocurre lo mismo de manera ideal resulta no tan desfavorable dado que la diferencia es menor y no igual que la suma de las dos, presentando un error medio cuadrático aceptable.

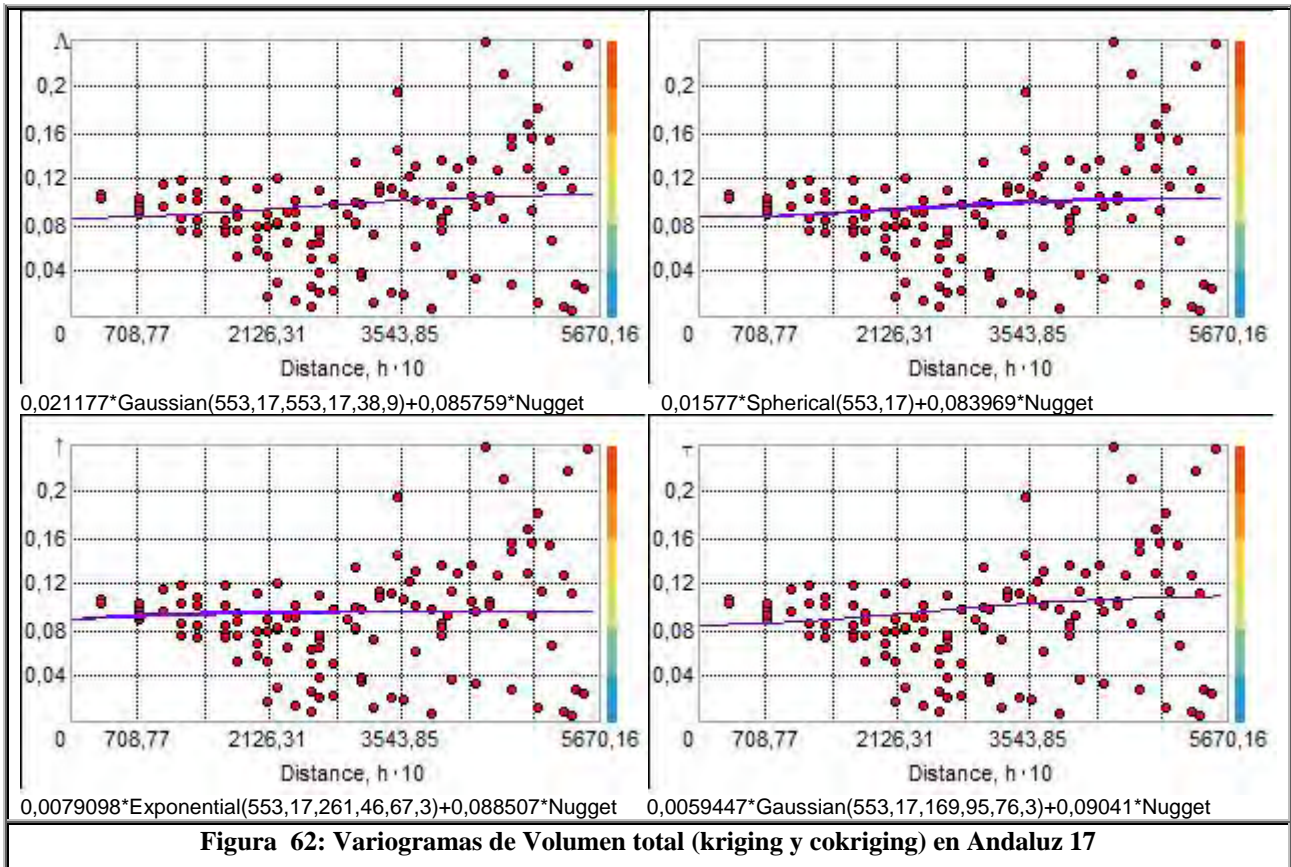
5.8.1. VOLUMEN TOTAL

Los variogramas usados para el cálculo de la estimación en *volumen total* con kriging y cokriging, seleccionados por tener menor error y con las adecuadas proporciones, se observan en la *Tabla 47*. En el *Anexo 8*, se observa los datos de los 50 variogramas calculados para seleccionar el más adecuado, el cual se presenta como ejemplo para seleccionar el último cokriging de la misma *Tabla 47*.

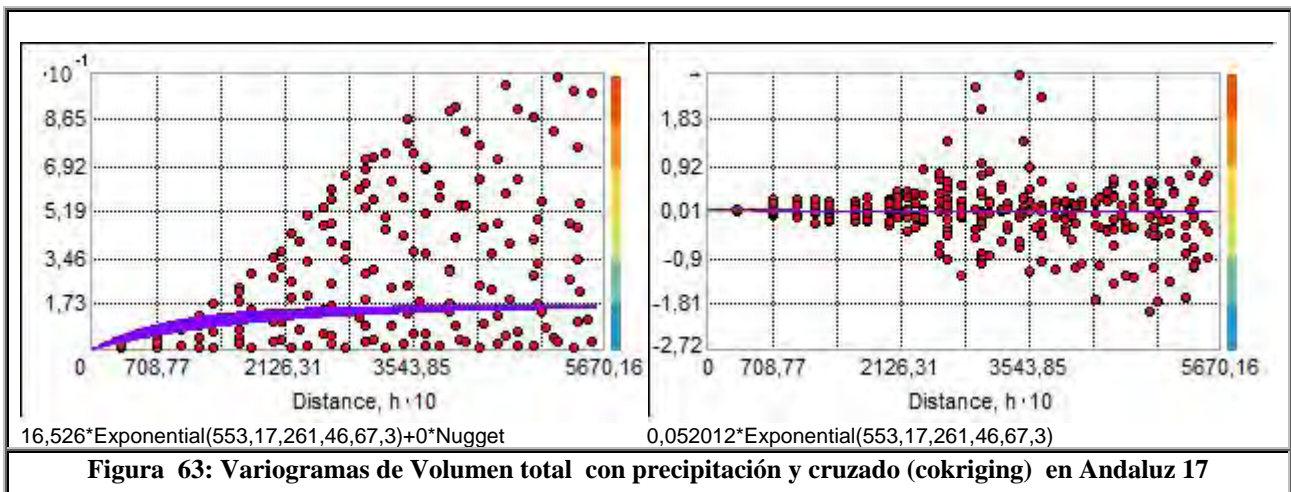
Variable	Estimación	Covariables	Variograma	Dirección	Pepita (Co)	Meseta Parcial (C)	Rango
Volumen total	Kriging		Gaussiano	39	0,086	0,021	553
Volumen total	Cokriging	B3,B4,B5	Gaussiano	324	0,086	0,017	553
Volumen total	Cokriging	PMM	Exponencial	67	0,089	0,008	553
Volumen total	Cokriging	B3, B4, PMM	Gaussiano	76	0,090	0,005	553

Tabla 47. Parámetros de variogramas de kriging y cokriging para el volumen total

En la *Figura 62* se presentan los variogramas de *volumen total* con kriging arriba a la izquierda, con cokriging con bandas arriba a la derecha, con cokriging con *precipitación* abajo a la izquierda y cokriging con bandas y *precipitación* abajo a la derecha.

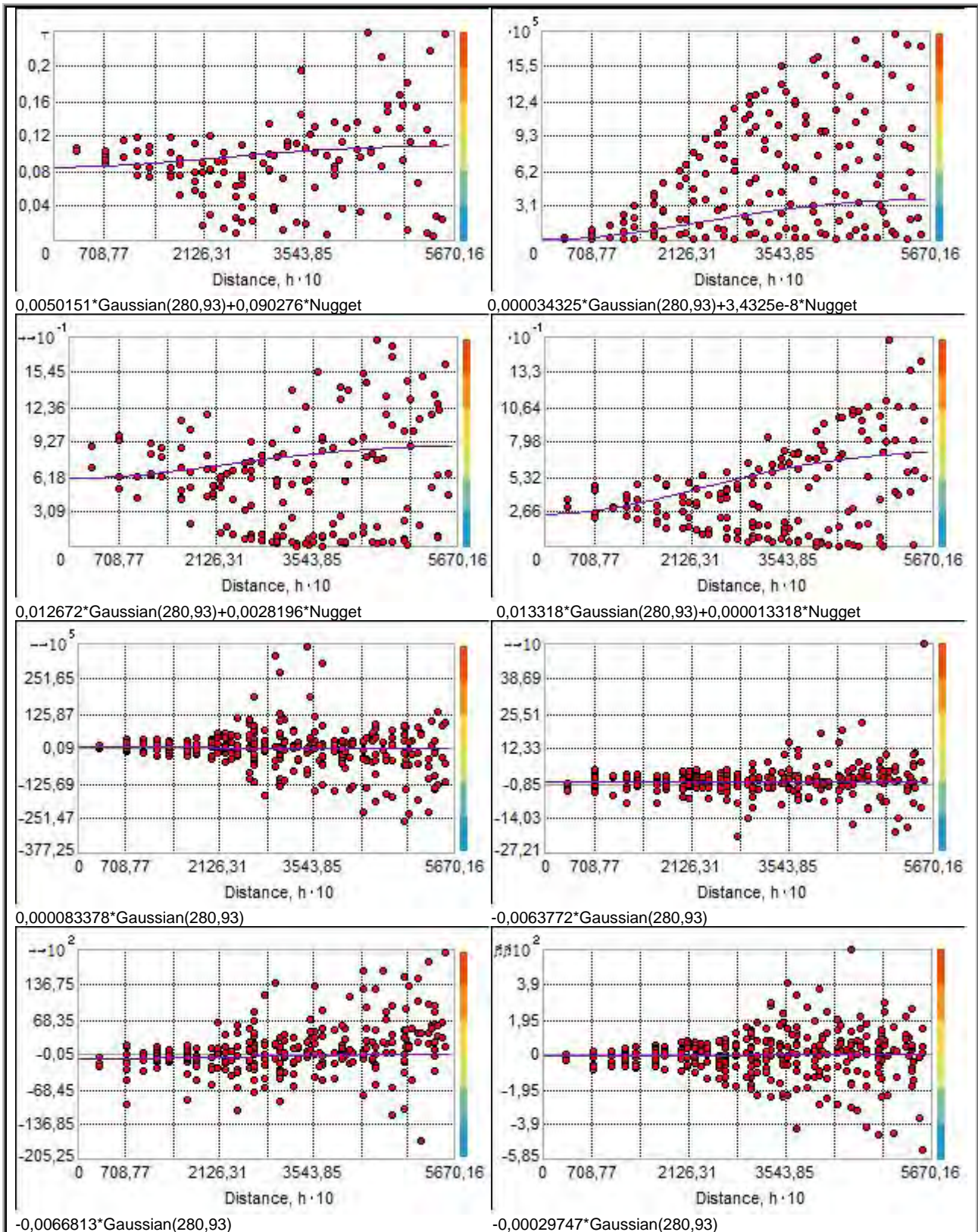


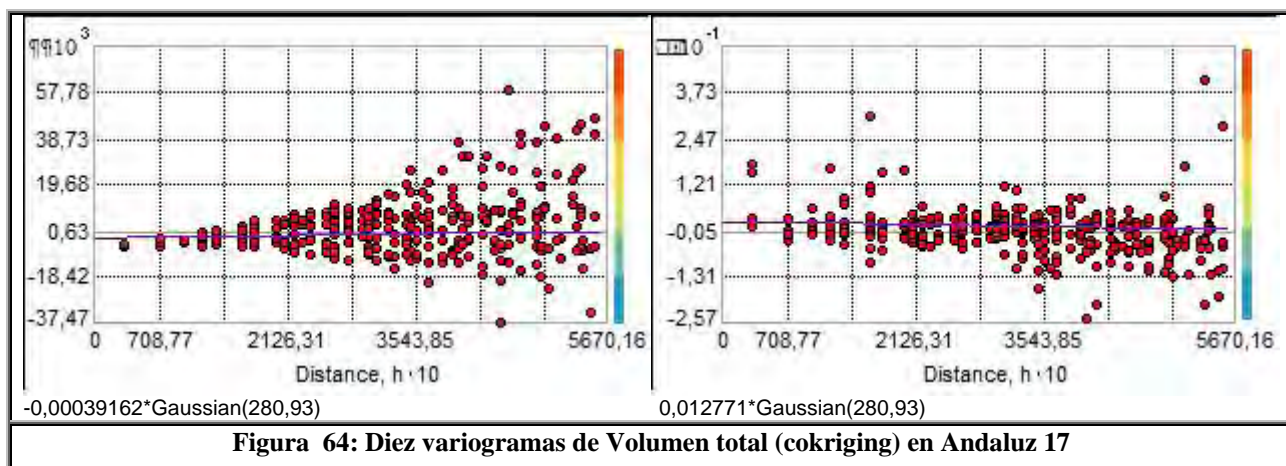
En la *Figura 63*, se presentan el variograma cruzado de *volumen total* en cokriging con *precipitación* a la derecha y el individual de *precipitación* a la izquierda.



En la *Figura 64*, se presentan los 10 variogramas que se calcularon para *volumen total* en cokriging el primero arriba a la izquierda se encuentra el variograma individual de la misma variable, el segundo el individual de *precipitación* (arriba a la derecha), el tercero (segunda línea a la izquierda) de la *banda 4* y a la derecha de la *banda 3*. Del quinto al séptimo variograma se presentan los variogramas cruzados de *volumen total* con

precipitación, banda 4 y banda 3 respectivamente. Y los varigramas del ocho a diez se presentan los varigramas de precipitación con banda 4, precipitación con banda 3 y banda 3 con banda 4.





En la *Figura 65*, se observó que cuatro (4) categorías de *volumen total*, mediante la estimación con la utilización de Kriging con 40 sitios, donde se presentó un incremento del mismo, de la esquina suroccidental hacia la esquina nororiental, pasando de 0,15 a 0,30 m³ mostrando una alta variabilidad del *volumen total* que produce la plantación.

Para mejorar la intensidad de muestra del presente ejercicio y basados en la interpretación de los resultados estadísticos, se obtuvo la *Figura 64*, un resultado mediante la utilización de cokriging a partir de los 40 sitios con la medición del volumen total y como covariables las 3 bandas electromagnéticas (B3, B4 y B5), cada una con más de 100 puntos. Como una segunda alternativa se utilizó como covariable la precipitación con más de 200 puntos (*Figura 65*). Como una tercera alternativa para mejorar la muestra, además de las bandas electromagnéticas, se utilizó como covariable los valores de precipitación (*Figura 66*).

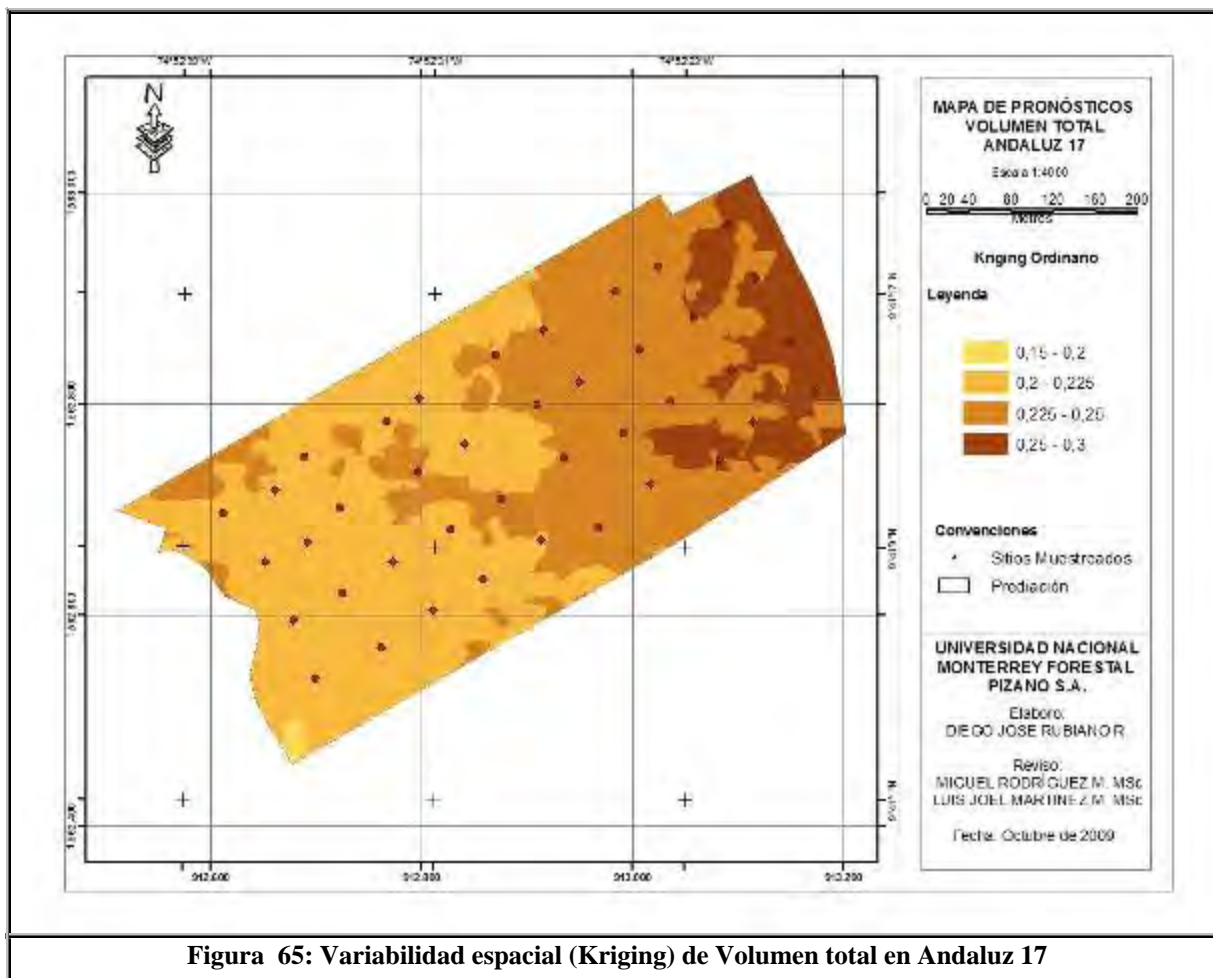


Figura 65: Variabilidad espacial (Kriging) de Volumen total en Andaluz 17

En la *Figura 66*, se utilizó un mejoramiento de la muestra del *volumen total* a partir del espectro de las bandas B3, B4 y B5, con más de 100 puntos cada una, donde se observa que aunque la tendencia general es la misma de aumentar de 0,15 a 0,30 m³, de suroccidente a nororiente, su forma de distribución cambia sutilmente con respecto al Kriging.

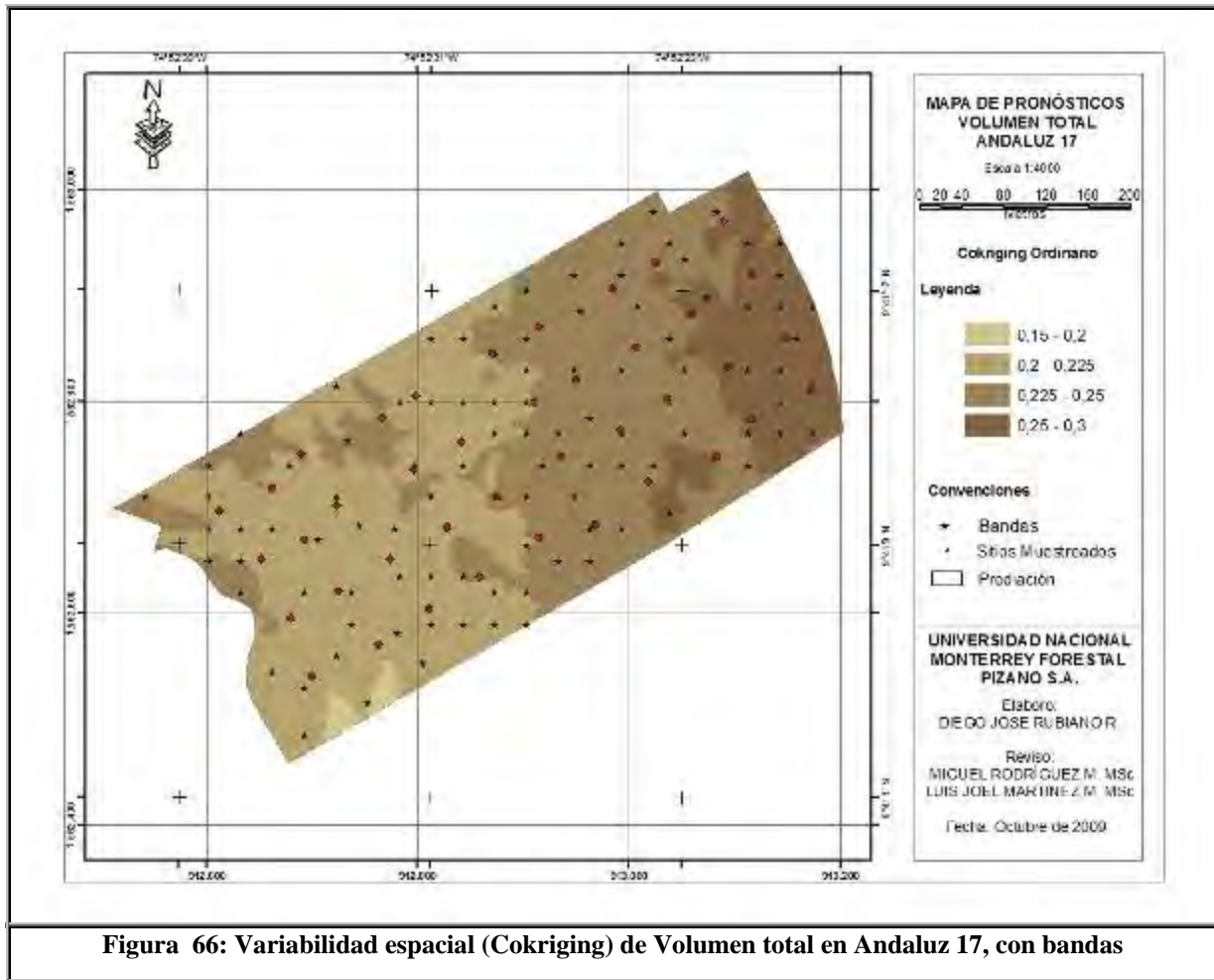


Figura 66: Variabilidad espacial (Cokringing) de Volumen total en Andaluz 17, con bandas

En la *Figura 67*, mostró un comportamiento diferente al mejorar la muestra del *volumen total*, a partir de la *precipitación* (PMM) con más de 200 puntos. En este ejercicio la distribución espacial cambia aunque no su tendencia y valores. Sin embargo presenta cambio de apariencia que se debe a los datos de precipitación que influyen a un comportamiento diferente. Esta distribución parece estar más concordante con las formas naturales del terreno dado que es una zona plana inundable en forma de cubeta.

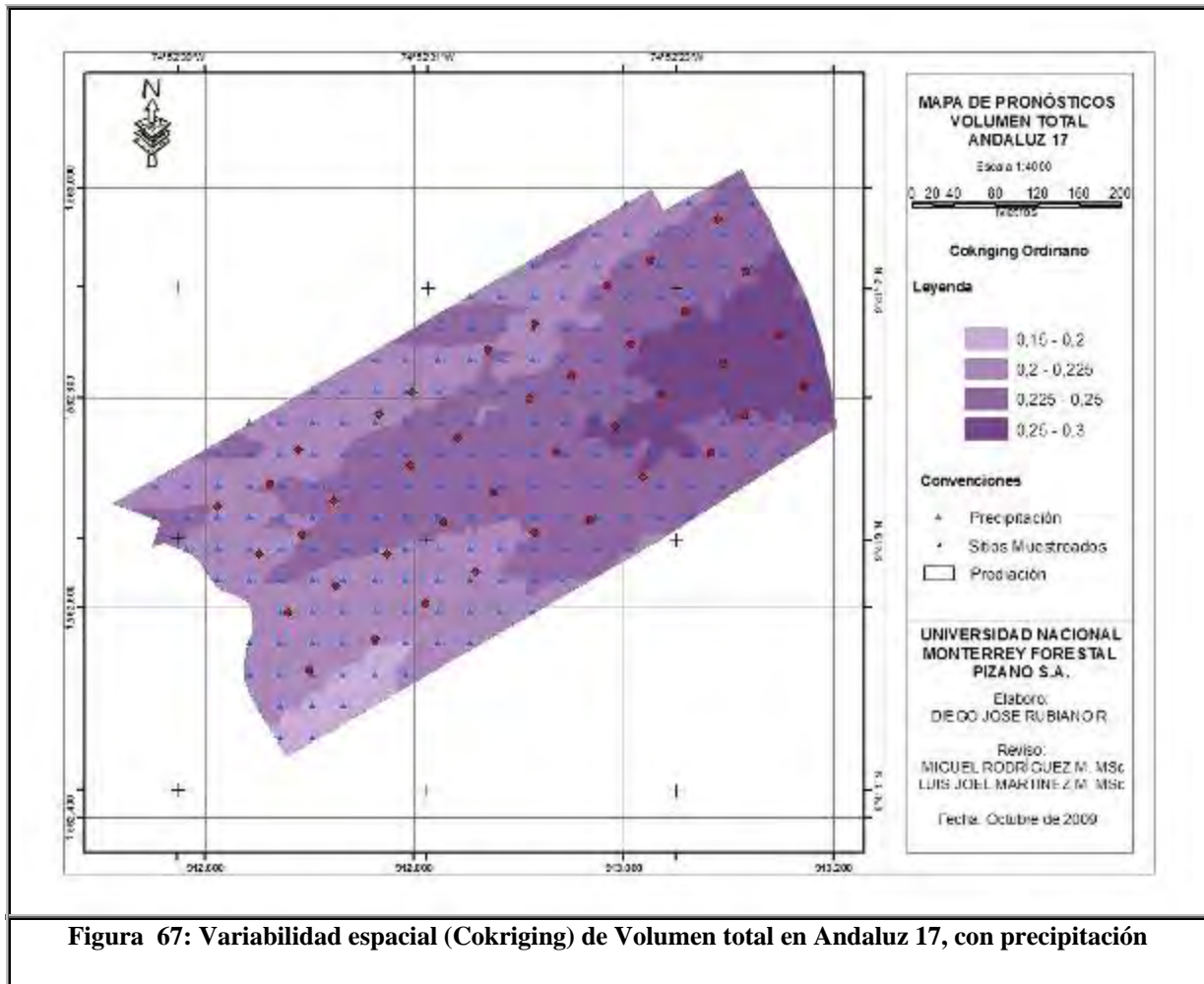


Figura 67: Variabilidad espacial (Cokringing) de Volumen total en Andaluz 17, con precipitación

En la *Figura 68*, se mostró un comportamiento también diferente al mejorar la muestra del volumen total, a partir de las bandas B3 y B4¹⁶ con más de 100 puntos cada una y de la *precipitación* (PMM) con más de 200 puntos. En este ejercicio la distribución espacial cambia con respecto a las tres anteriores aunque no su tendencia y valores. Se detecta que las variables espectrales por si solas como covariables utilizadas para mejorar la muestra del *volumen total*, no genera mayor impacto, y la precipitación lo hace hacia formas más naturales, lo que traduce en cambio de forma, pero en el momento de combinarse el espectro con la precipitación (PMM), su impacto en el resultado fue bastante concordante, dado que la información del espectro se complementa bastante bien con la precipitación, lo que se demostró con la excelente separación de grupos en suelos al incluir la *precipitación*, en el análisis estadístico, lo que no ocurría de igual manera antes de incluirla.

Este resultado permite afirmar que las bandas electromagnéticas o el espectro apoyado de la precipitación, cada vez más, se convierte en una alternativa costo efectiva de mejorar los datos de *volumen total*, bajo un ambiente controlado de plantación, de una especie

¹⁶ Se dejó la B3 ya que tiene mayor correlación y se eliminó la B5 ya que correlaciona en 89% con banda 3.

plantada en suelos de similares condiciones, en ecorregiones o zonas de vida similares como el bosque seco tropical.

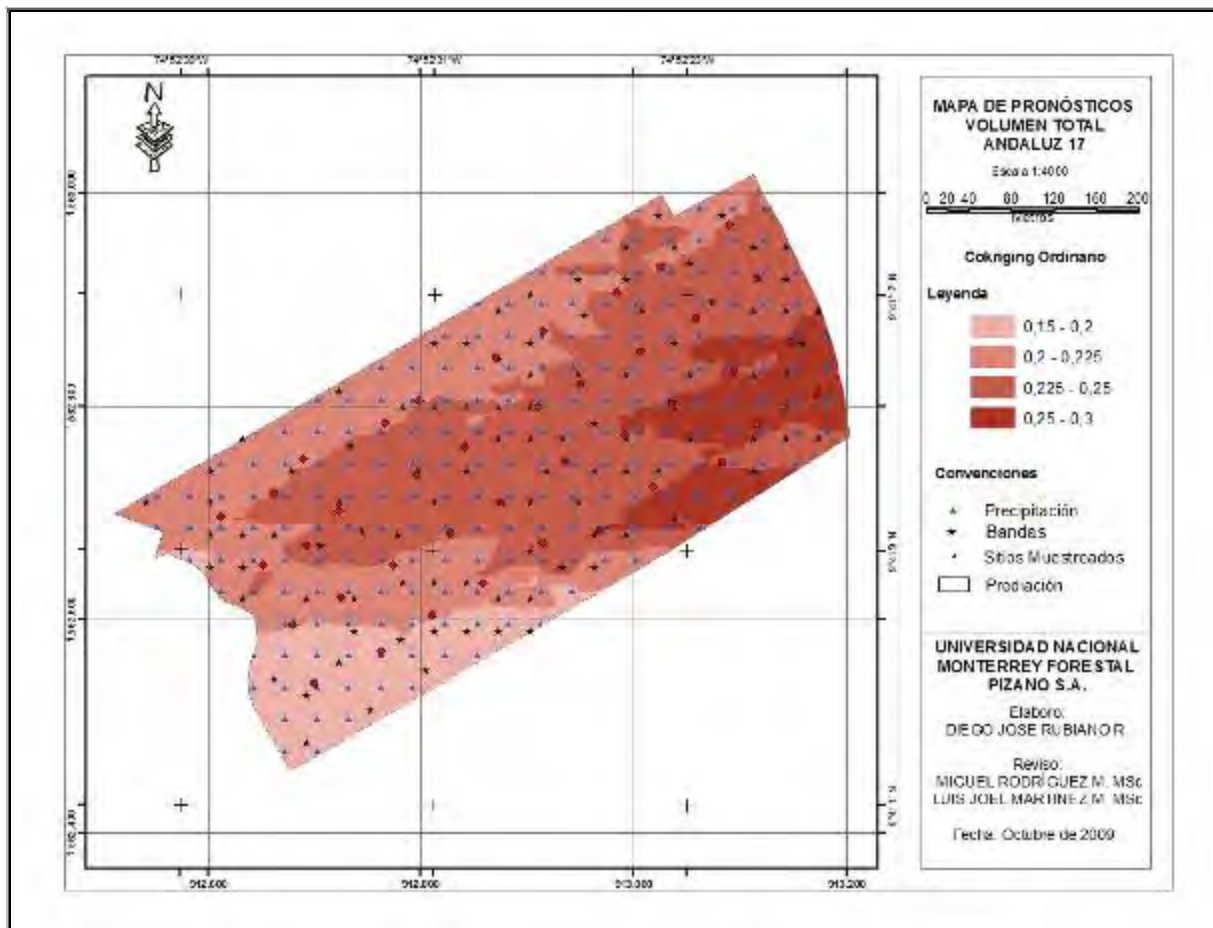


Figura 68: Variabilidad espacial (Cokriging) de Volumen total en Andaluz 17, con bandas y precipitación

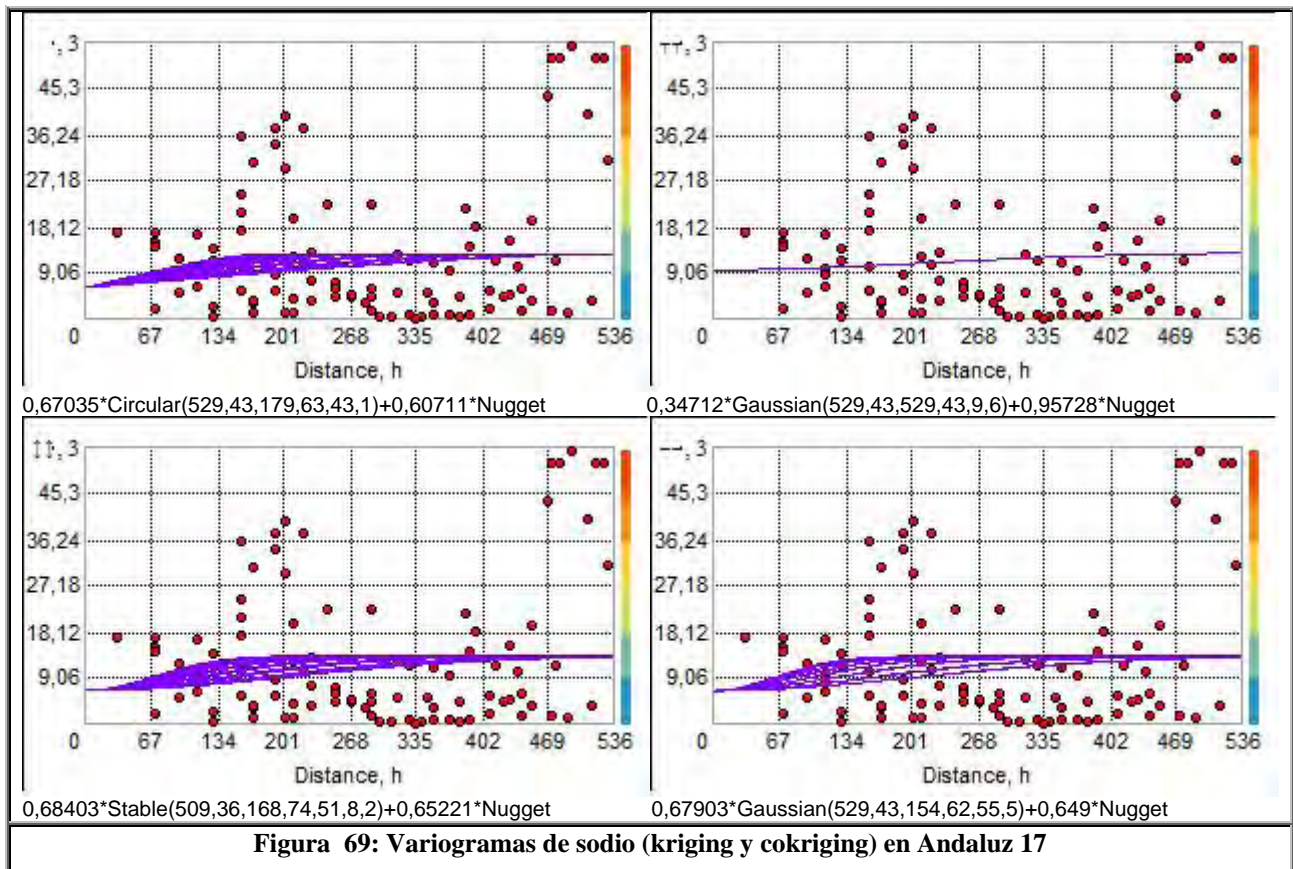
5.8.2. SODIO DEL SUELO

Los variogramas usados para el cálculo de la estimación con kriging y cokriging, seleccionados por tener menor error con las más adecuadas proporciones, se observan en la *Tabla 48*.

Variable	Estimación	Covariables	Variograma	Dirección	Pepita (Co)	Meseta Parcial (C)	Rango
SODIO	Kriging		Circular	43	0,61	0,67	529
SODIO	Cokriging	B1,B2,B5	Gaussiano	10	0,96	0,35	529
SODIO	Cokriging	PMM	Lineal	52	0,65	0,68	509
SODIO	Cokriging	B1, B2, PMM	Gaussiano	56	0,65	0,68	529

Tabla 48. Parámetros de variogramas de kriging y cokriging para el sodio Na

En la *Figura 69* se presentan los variogramas de *sodio* con kriging arriba a la izquierda, con cokriging con bandas arriba a la derecha, con cokriging con *precipitación* abajo a la izquierda y cokriging con bandas y *precipitación* abajo a la derecha.



En la *Figura 70*, se observaron cinco (5) categorías de *sodio*, mediante la estimación con la utilización de Kriging con 12 sitios, donde se presenta un incremento de ésta variable de oriente a occidente, pasando de 0,15 a 0,30 Meq/100 gr, mostrando una alta variabilidad del *sodio* disponible en los suelos muestreados.

Para mejorar intensidad de muestra del presente ejercicio y basados en la interpretación de los resultados estadísticos se obtiene en la *Figura 71*, un resultado mediante la utilización de cokriging a partir de las 3 bandas electromagnéticas (B3, B4 y B5). Como una segunda alternativa se utiliza para mejorar la muestra, los valores de precipitación (*Figura 72*). Finalmente se hizo cokriging con las bandas y la precipitación (*Figura 73*).

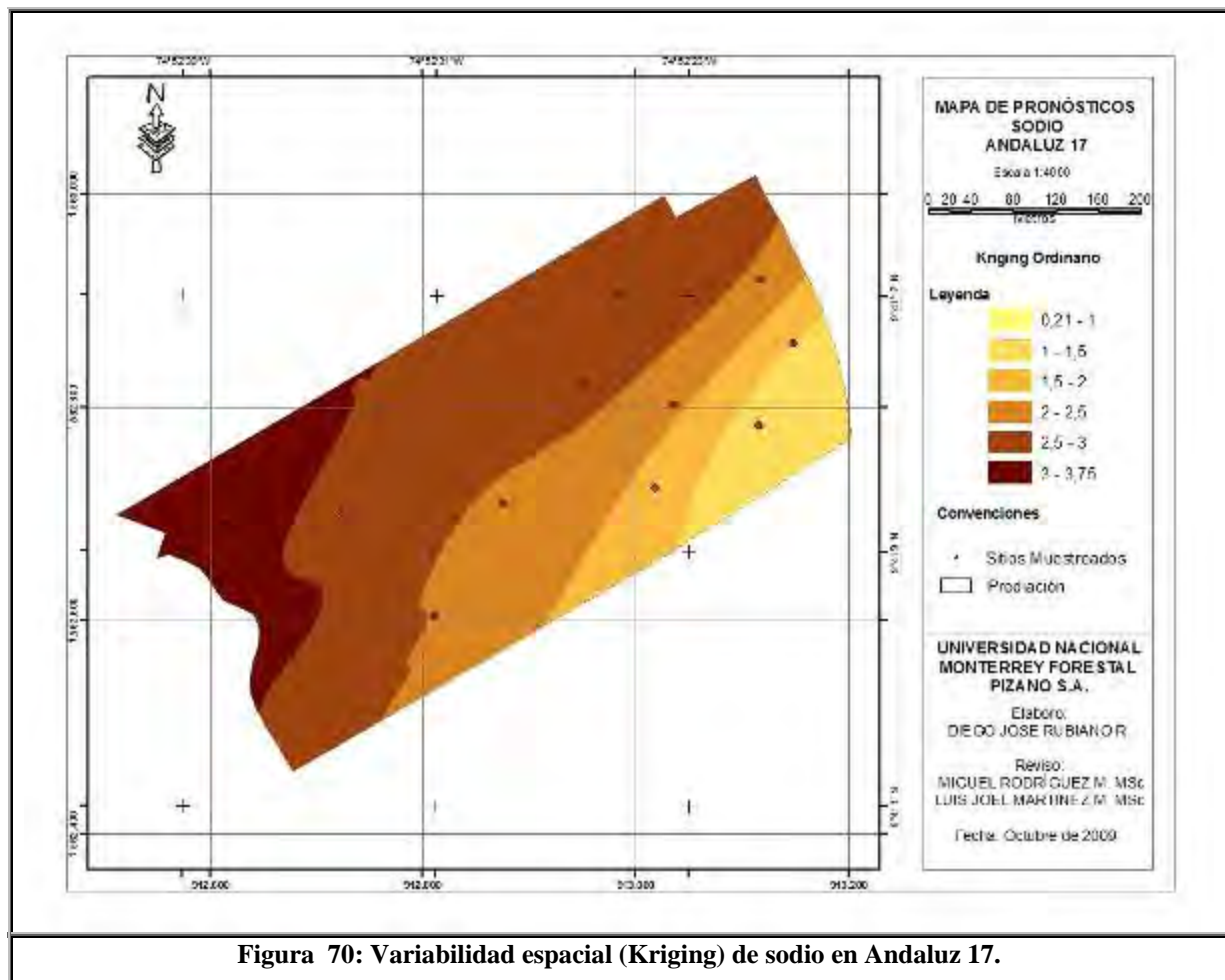
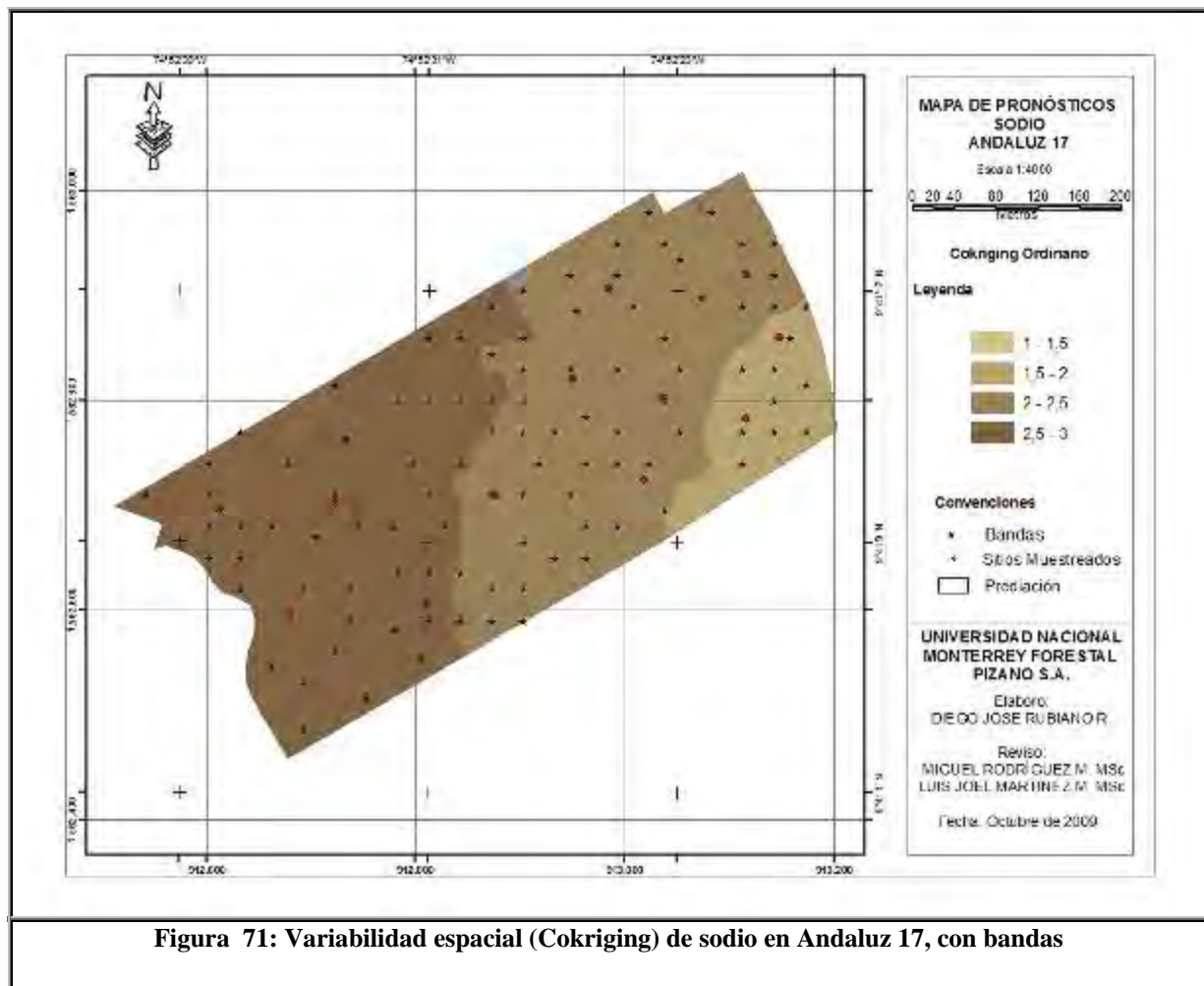


Figura 70: Variabilidad espacial (Kriging) de sodio en Andaluz 17.

En la *Figura 71*, se mantuvieron una menos de las 5 categorías, presentadas en la *Figura 70*, además su distribución cambia por la contribución de las bandas B1, B2 y B5, que presentaron mejores correlaciones.



La *Figura 72*, muestra un comportamiento similar a la *Figura 68*, sin embargo el bandeo de las categorías se hace más acentuado, por el aporte de la precipitación. La *Figura 72*, es un poco antagónica con respecto a la *Figura 71*, puesto ésta última es de casi de orientación vertical refiriéndose a los cambios de categoría, mientras que las *Figuras 70 y 72* la orientación de los cambios es diagonal.

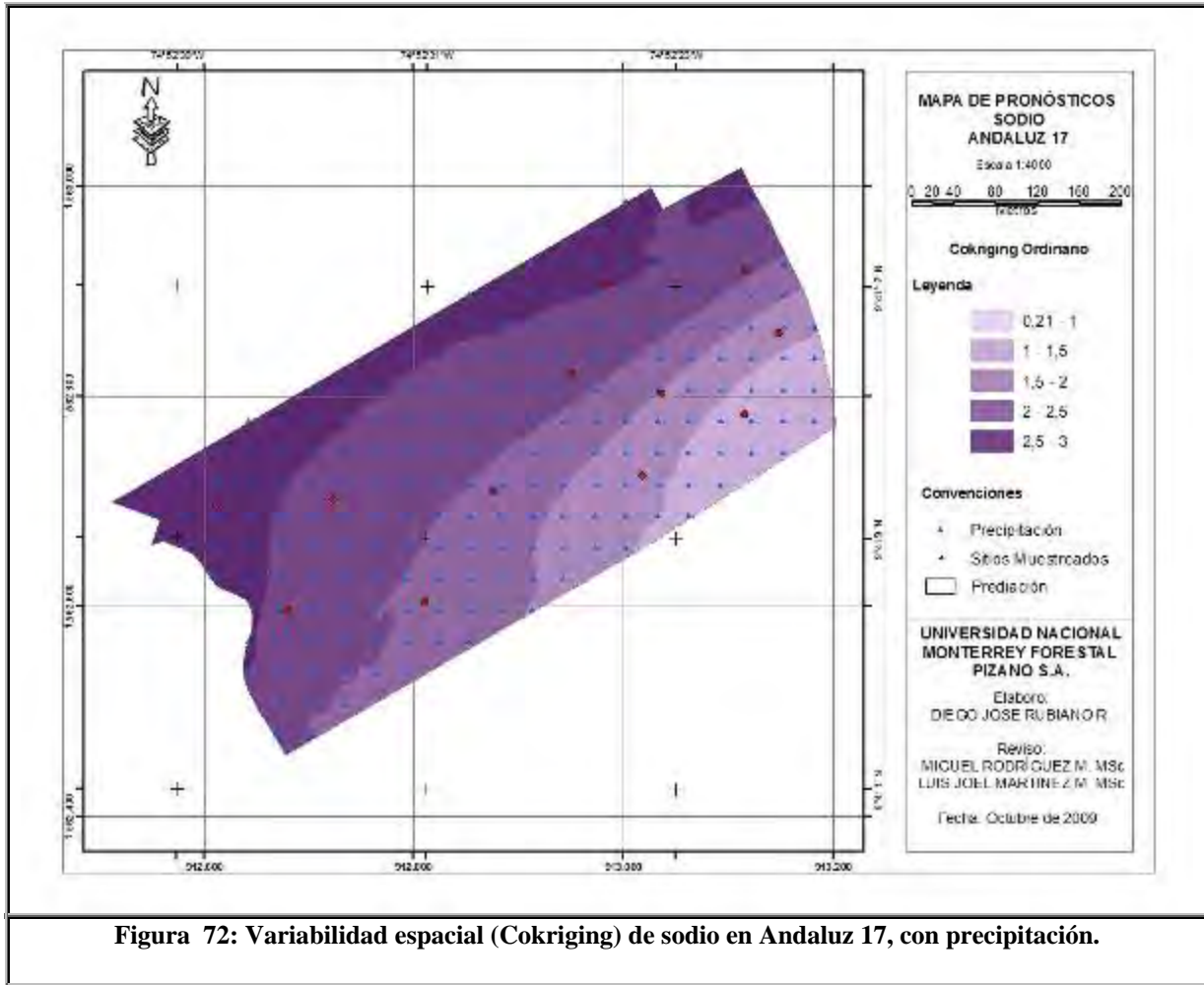


Figura 72: Variabilidad espacial (Cokringing) de sodio en Andaluz 17, con precipitación.

La Figura 73, presenta el aporte de las bandas y de la precipitación, presentando un resultado más completo y confiable, por la complementariedad de las covariables. Cabe anotar que pareciera que el aporte de las bandas en el resultado final es menor que el de la precipitación, sin embargo hay que tener en cuenta que la variable *sodio* sin aporte de las covariables, también tiene una tendencia diagonal. Por tanto, éste resultado es adecuado, más cuando el modelo aplicado con las covariables cumple con los requisitos mínimos de aceptación de proporción y error, lo que no ocurre en su totalidad con el modelo aplicado con solo las bandas (ver *Tabla 48*). Lo que en cierta forma ratifica la complementariedad de las bandas con la *precipitación*.

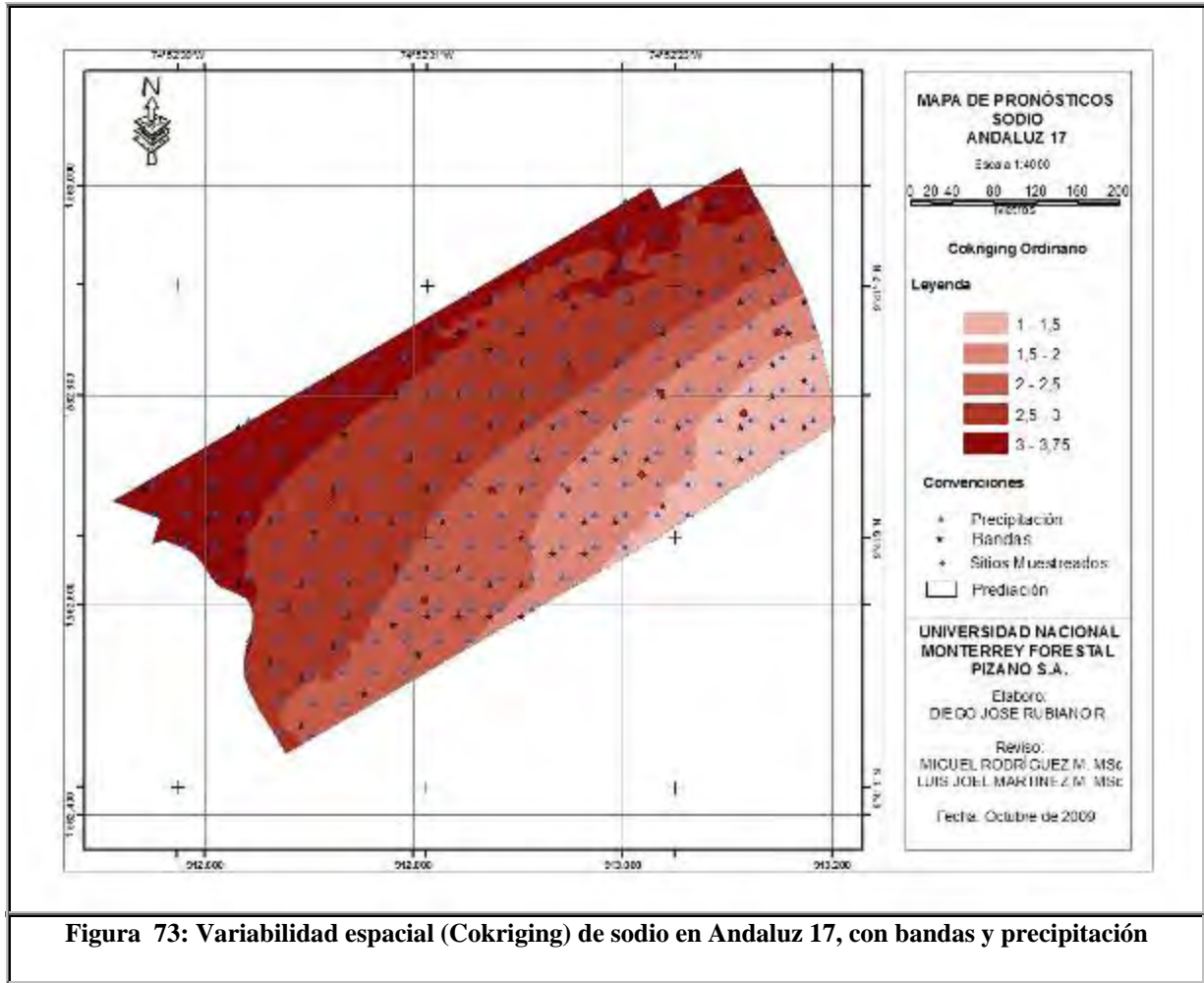


Figura 73: Variabilidad espacial (Cokriging) de sodio en Andaluz 17, con bandas y precipitación

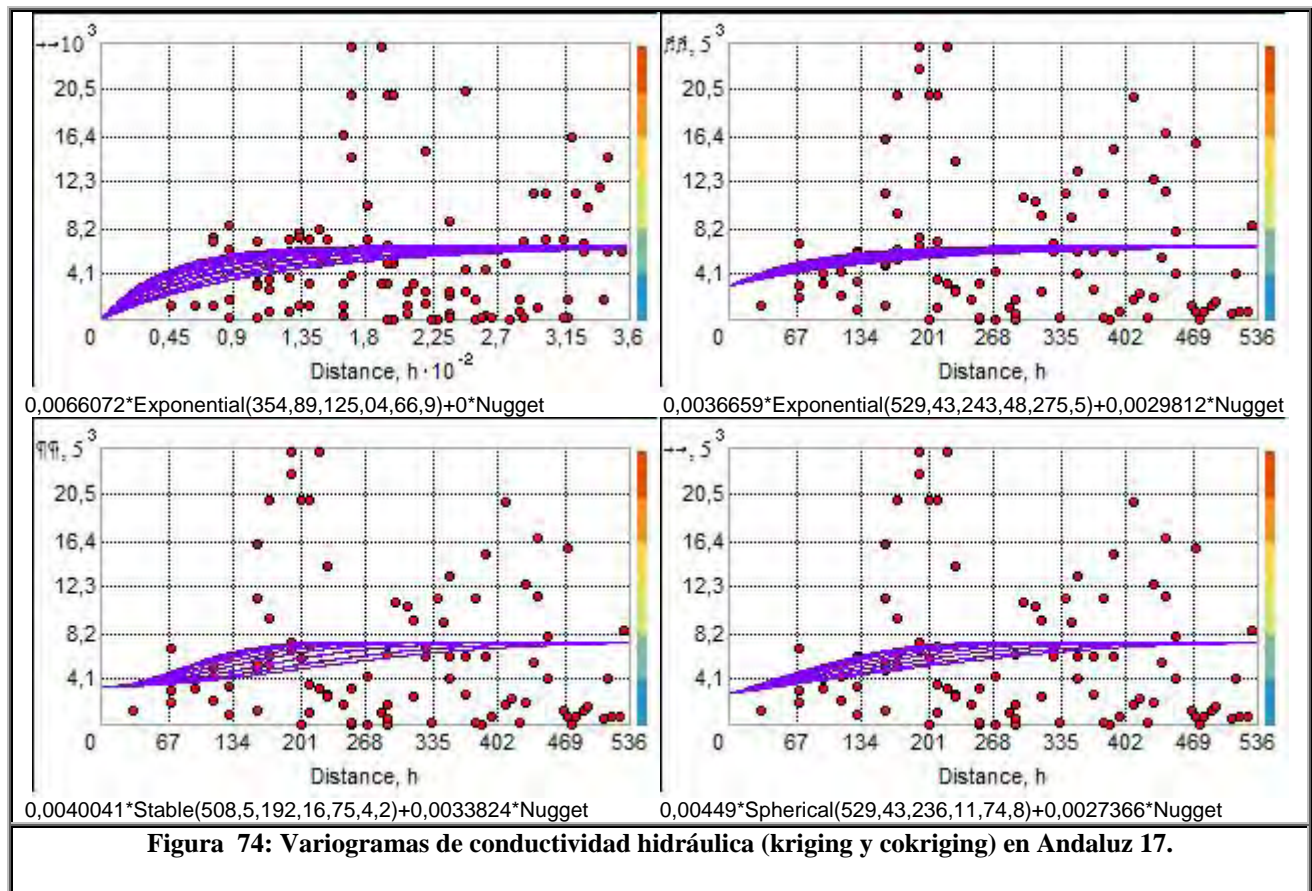
5.8.3. CONDUCTIVIDAD HIDRÁULICA

Los variogramas usados para el cálculo de la estimación con kriging y cokriging, seleccionados por tener menor error con las adecuadas proporciones, se observan en la *Tabla 49*.

Variable	Estimación	Covariables	Variograma	Dirección	Pepita (Co)	Meseta Parcial (C)	Rango
CONDUCTIVIDAD HIDRAULICA	Kriging		Exponencial	67	0,000	0,007	355
CONDUCTIVIDAD HIDRAULICA	Cokriging	B2,B4, B5	Exponencial	276	0,003	0,004	529
CONDUCTIVIDAD HIDRAULICA	Cokriging	PMM	Lineal	52	0,003	0,004	509
CONDUCTIVIDAD HIDRAULICA	Cokriging	B4, B5, PMM	Esférico	75	0,003	0,005	529

Tabla 49. Parámetros de variogramas de kriging y cokriging para la conductividad hidráulica

En la *Figura 74* se presentan los variogramas de *conductividad hidráulica* con kriging arriba a la izquierda, con cokriging con bandas arriba a la derecha, con cokriging con *precipitación* abajo a la izquierda y cokriging con bandas y *precipitación* abajo a la derecha.



En la *Figura 75*, se observan cinco (5) categorías de *conductividad hidráulica*, mediante la estimación con la utilización de kriging con 12 sitios, donde se presenta un valle al suroccidente y un pico al norte del predio Andaluz 17, pasando de 0,0 a 0,26 cm/hora, mostrando una alta variabilidad de la *conductividad hidráulica* que caracteriza una propiedad física del suelo de gran importancia para la fisiología de las plantaciones y por ende repercute en hacer o no, unas adecuadas prácticas forestales o silviculturales.

Para mejorar intensidad de muestra del presente ejercicio y basados en la interpretación de los resultados estadísticos se obtiene en la *Figura 76*, un resultado mediante la utilización de cokriging a partir de las 3 bandas electromagnéticas (B2, B4 y B5). En segunda instancia se utiliza para mejorar la muestra la covariable de *precipitación* (*Figura 77*). En tercera instancia, las bandas electromagnéticas y los valores de precipitación (*Figura 78*).

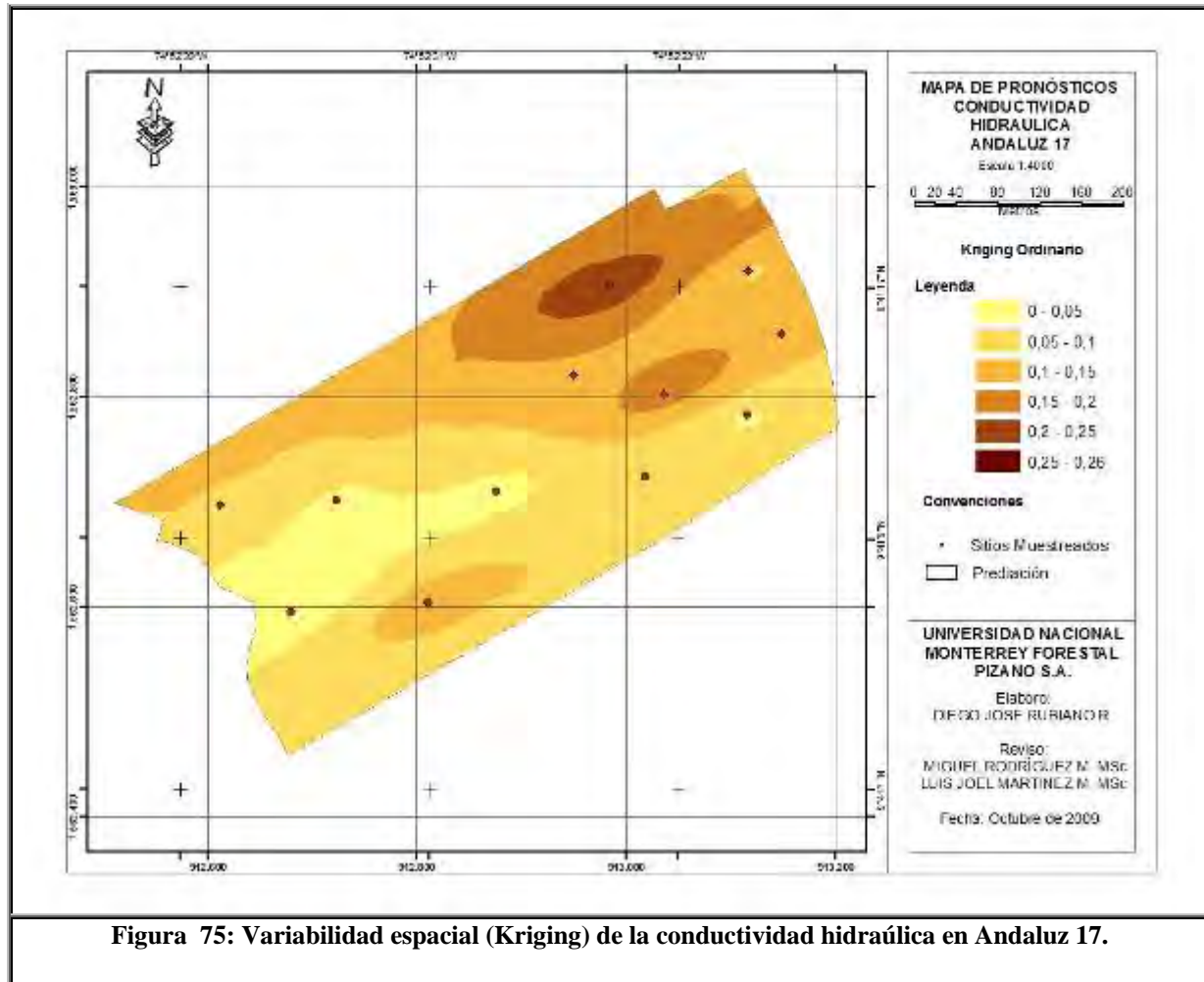
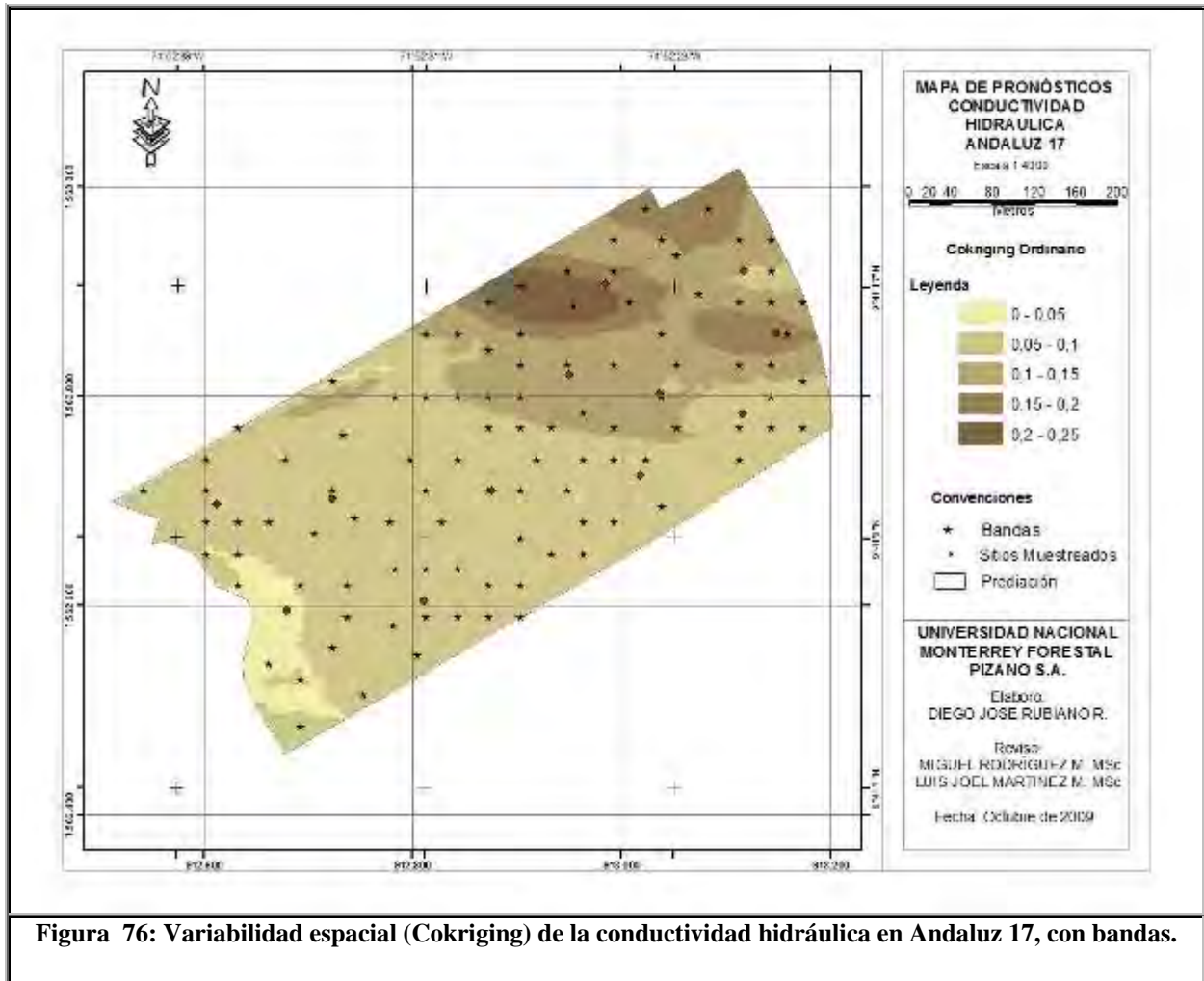
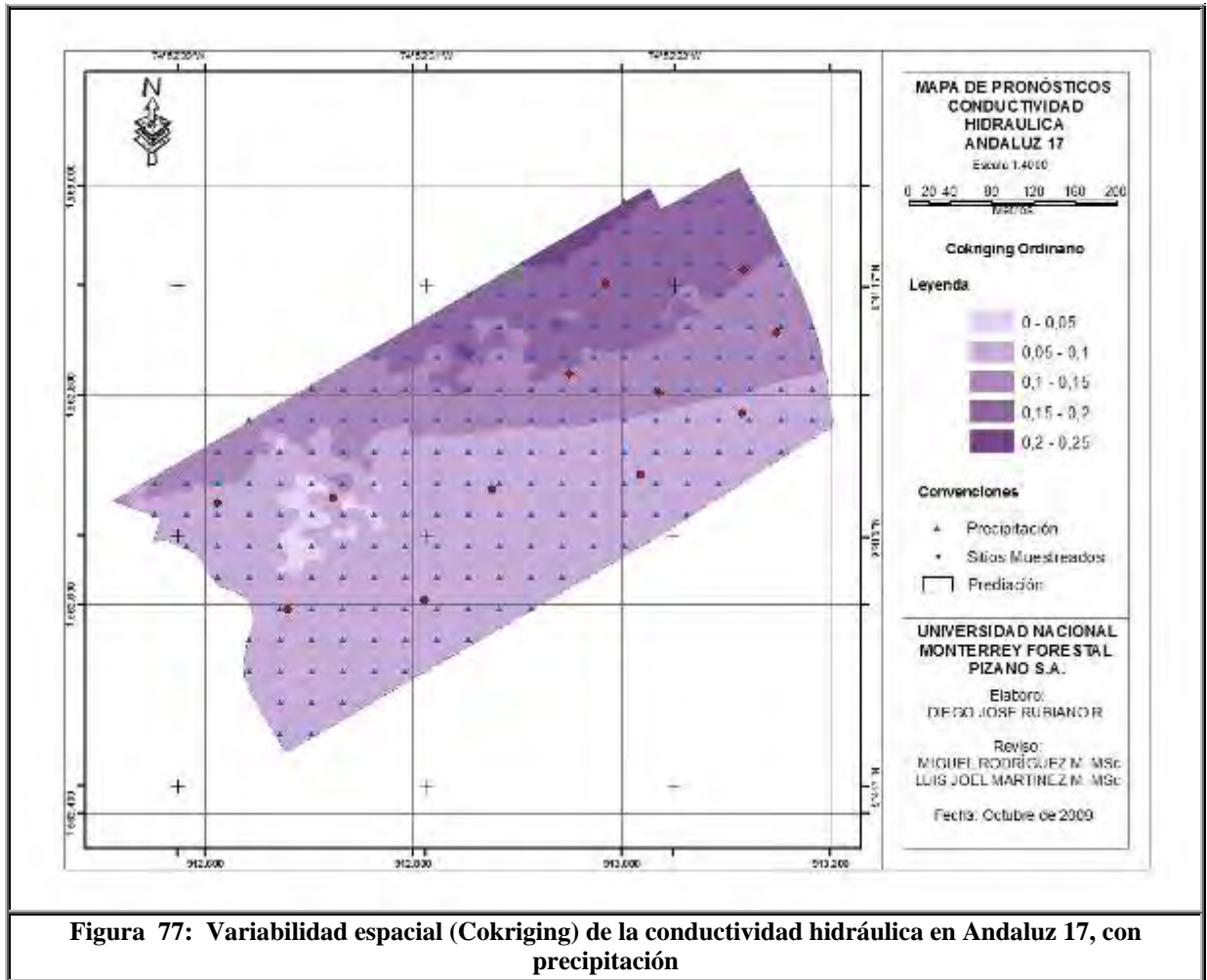


Figura 75: Variabilidad espacial (Kriging) de la conductividad hidráulica en Andaluz 17.

La *Figura 76*, con el aporte de las bandas tres bandas mencionadas, genera una distorsión en la forma original sin el apoyo de covariables, sin embargo se mantuvieron los mismos valores y proporciones, manteniendo los valles y picos.



En la *Figura 77*, con la contribución de la covariable *precipitación* se pierde el pico del norte y el valle queda casi disuelto, aunque se mantiene la tendencia de bandeado de oriente a occidente del cambio de categoría.



La *Figura 78*, muestra el resultado final con el aporte de las bandas y de la precipitación mostrando que se complementan, ajustando el resultado hacia uno más con menor incertidumbre que el primero sin covariables (*Figura 76*). Es importante destacar, que en este lote Andaluz 17, a nivel práctico se requiere identificar máximo 2 ó 3 unidades de manejo silvicultural, por ejemplo, actividad que se hace más práctica con el resultado actual y no con el inicial.

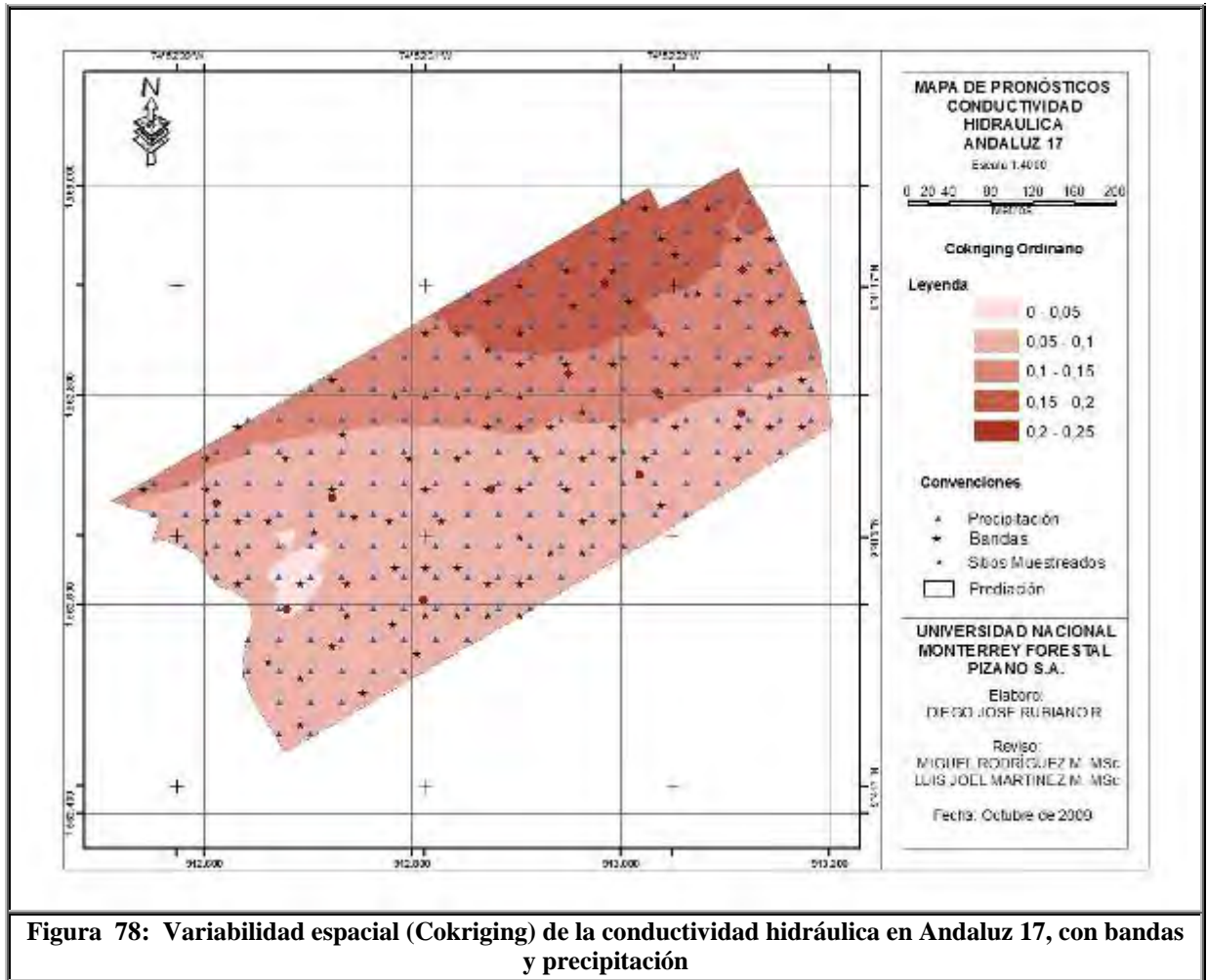


Figura 78: Variabilidad espacial (Cokriging) de la conductividad hidráulica en Andaluz 17, con bandas y precipitación

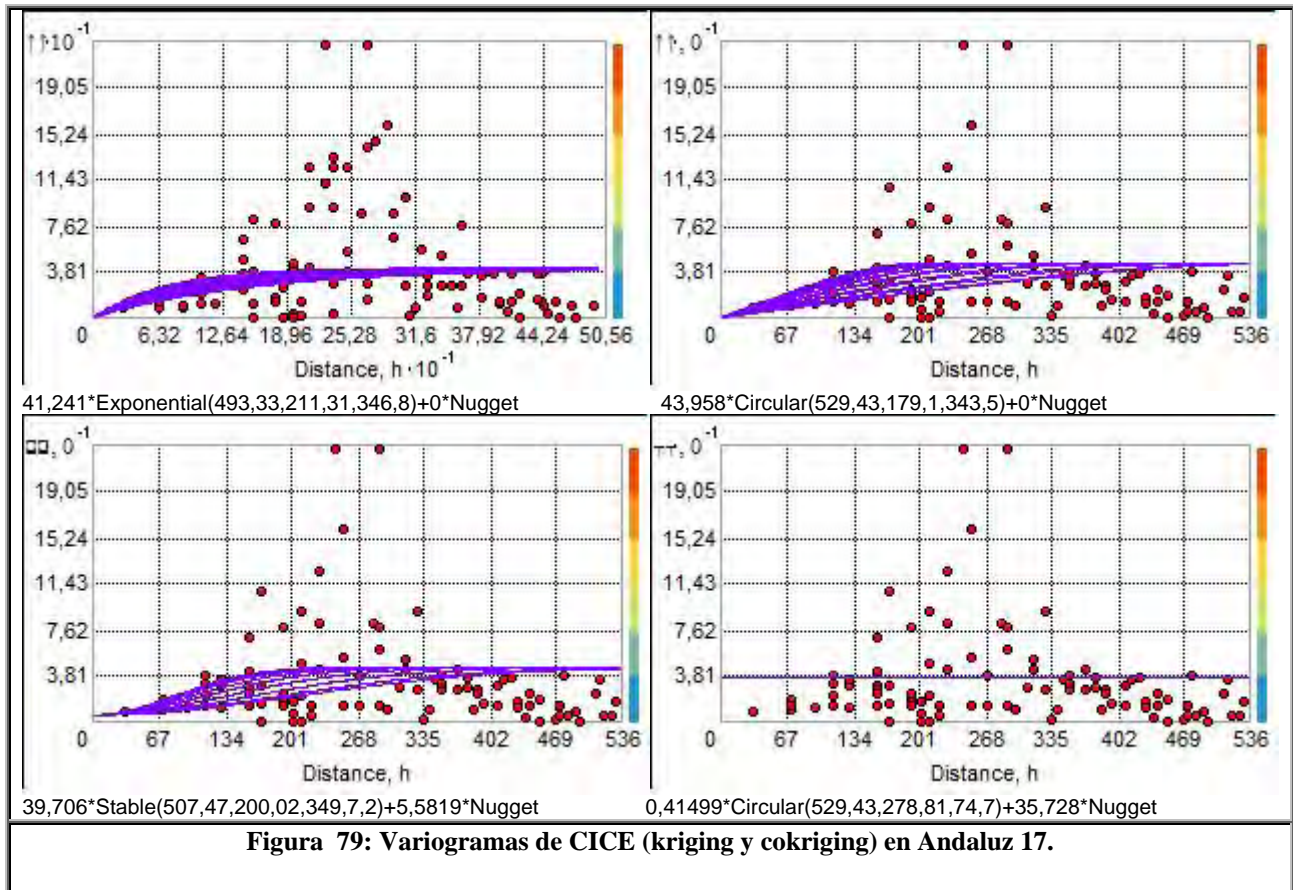
5.8.4. CAPACIDAD DE INTERCAMBIO CATIONICO EFECTIVA CICE

Los variogramas usados para el cálculo de la estimación con kriging y cokriging, seleccionados por tener menor error con las adecuadas proporciones, se observan en la *Tabla 50*.

Variable	Estimación	Covariables	Variograma	Dirección	Pepita (Co)	Meseta Parcial (C)	Rango
CICE	Kriging		Exponencial	347	0	41	493
CICE	Cokriging	B1,B2,B3	Circular	343	0	44	529
CICE	Cokriging	PMM	Lineal	350	6	40	508
CICE	Cokriging	B1, B3, PMM	Circular	75	36	0,42	529

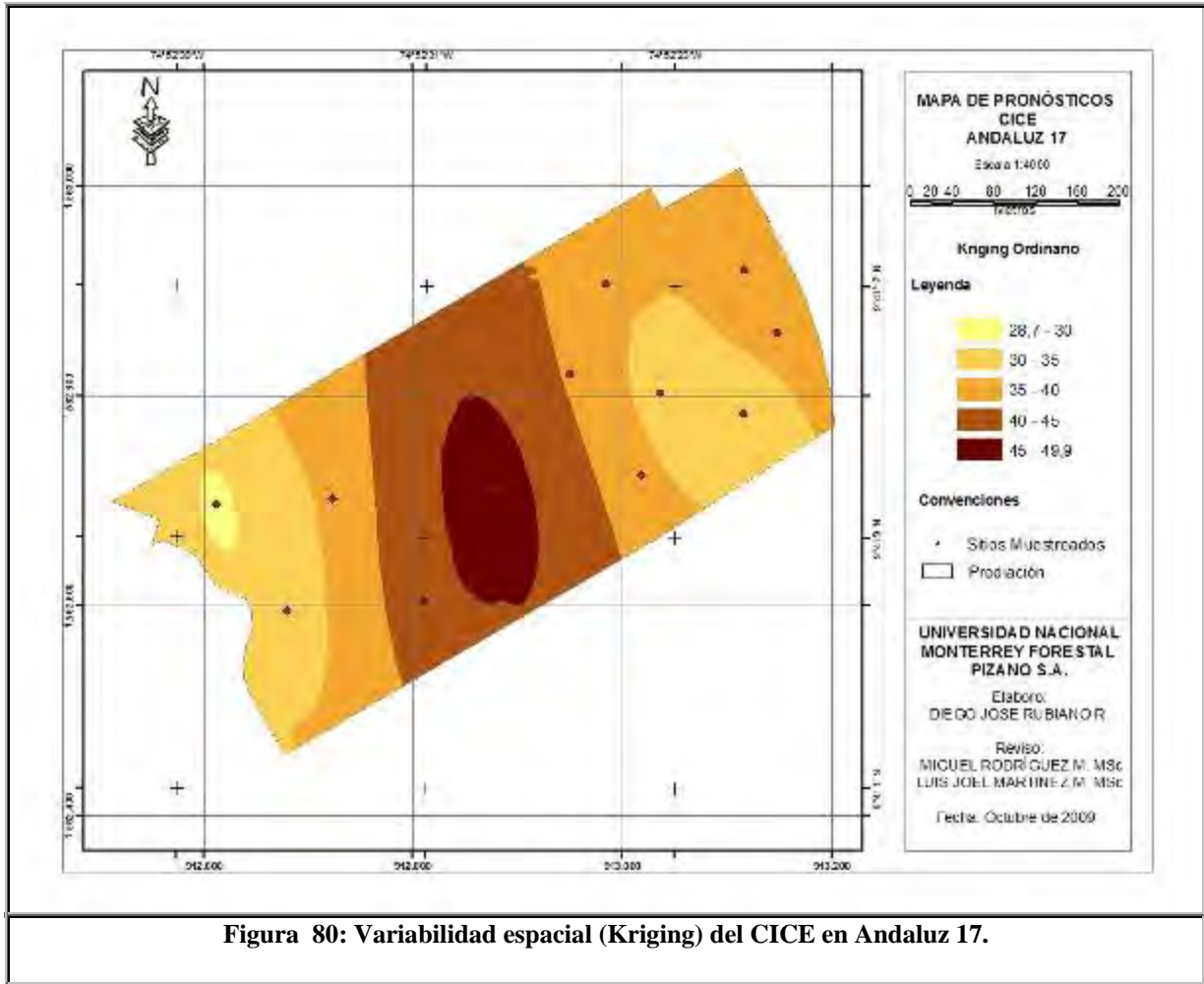
Tabla 50. Parámetros de variogramas de kriging y cokriging para la capacidad de intercambio catiónico efectiva CICE

En la *Figura 79* se presentan los variogramas de *CICE* con kriging arriba a la izquierda, con cokriging con bandas arriba a la derecha, con cokriging con *precipitación* abajo a la izquierda y cokriging con bandas y *precipitación* abajo a la derecha.



En la *Figura 80*, se presenta un ejercicio que aunque la variable *CICE* no presenta correlaciones significativas, se planteó buscar hasta donde el modelo integrado de suelos podía ser utilizado, donde se observan cinco (5) categorías de *CICE*, mediante la estimación de la variabilidad espacial con la utilización de kriging con 12 sitios, donde se presenta una cima en el centro y unos valles a los extremos del predio con valores de 28,7 a 49,9 Meq/100 gr.

Para mejorar intensidad de muestra del presente ejercicio y basados en la interpretación de los resultados estadísticos se obtiene en la *Figura 81*, un resultado mediante la utilización de cokriging a partir de los 12 sitios con la medición de la *capacidad de intercambio catiónico efectiva* y de las 3 bandas electromagnéticas (B1, B2 y B3). Como una segunda opción se utilizó para mejorar la muestra la precipitación (*Figura 82*). La tercera opción además de las bandas electromagnéticas como covarianza, están los valores de la *precipitación* (*Figura 83*).



La *Figura 81*, presenta una forma muy similar a la original (*Figura 80*), que aunque las bandas presentaron una correlación poco significativa, aportaron levemente como covariables, algunos datos que mejoraron ciertos detalles de la variabilidad espacial obtenida, como por ejemplo, se amplió la cima en el centro.

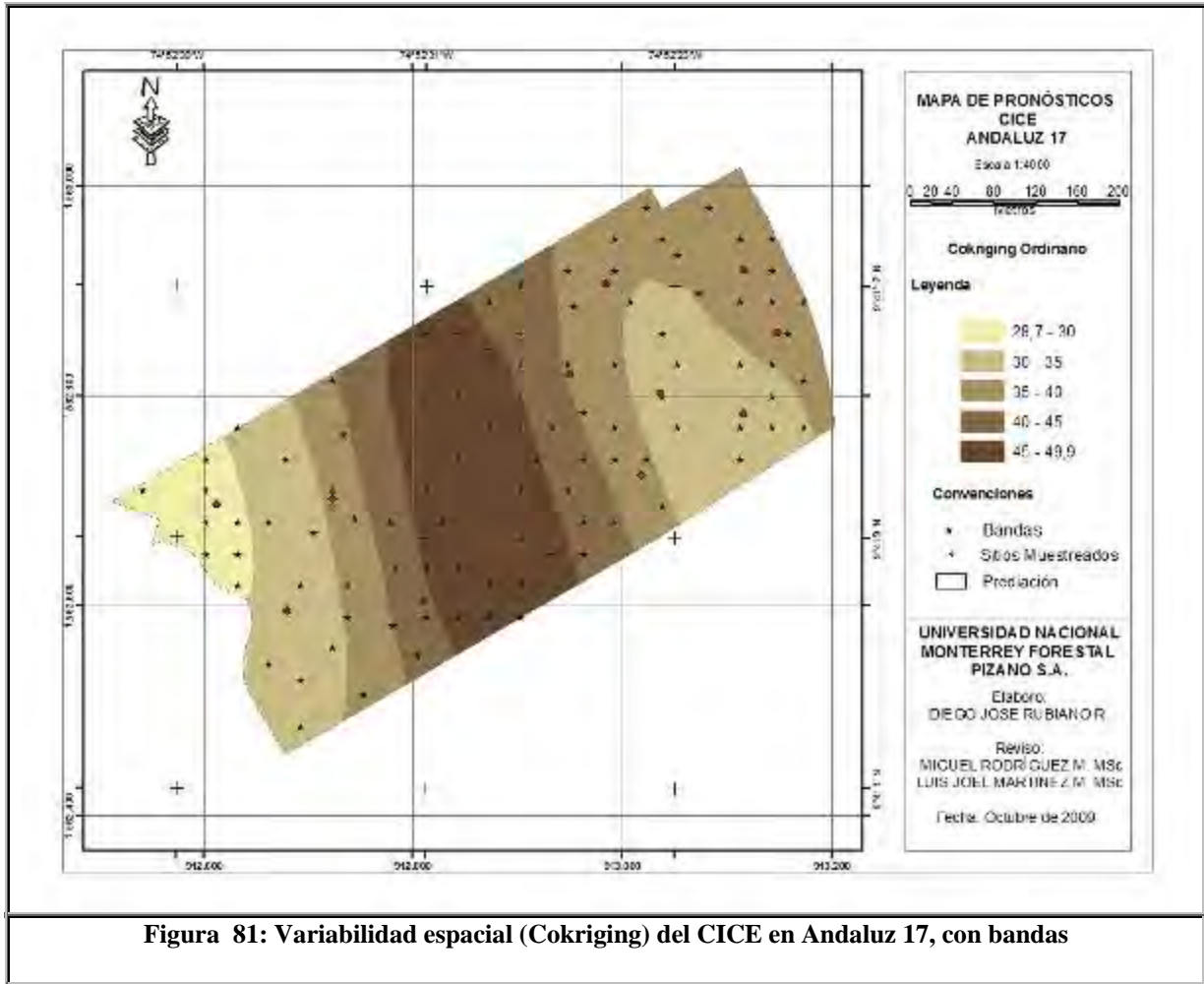


Figura 81: Variabilidad espacial (Cokriging) del CICE en Andaluz 17, con bandas

Con la *Figura 82*, ocurre casi lo mismo que en el caso anterior, donde la precipitación aportó de manera leve, con algunos cambios muy similares que como ocurrió con las bandas, sin embargo en este caso la cima es menos acentuada. Tanto en el caso anterior como con la precipitación los variogramas aplicados con el cokriging resultaron ser de proporciones adecuadas, es decir, menor la pepita que la meseta parcial, condición para seleccionar el modelo con otro parámetro como es el menor error cuadrático. Lo anterior significa que este apoyo para intensificar la muestra independiente del espectro (bandas) o de la precipitación, siempre y cuando el variograma seleccionado sea adecuado, pueden ser utilizados de manera indicativa.

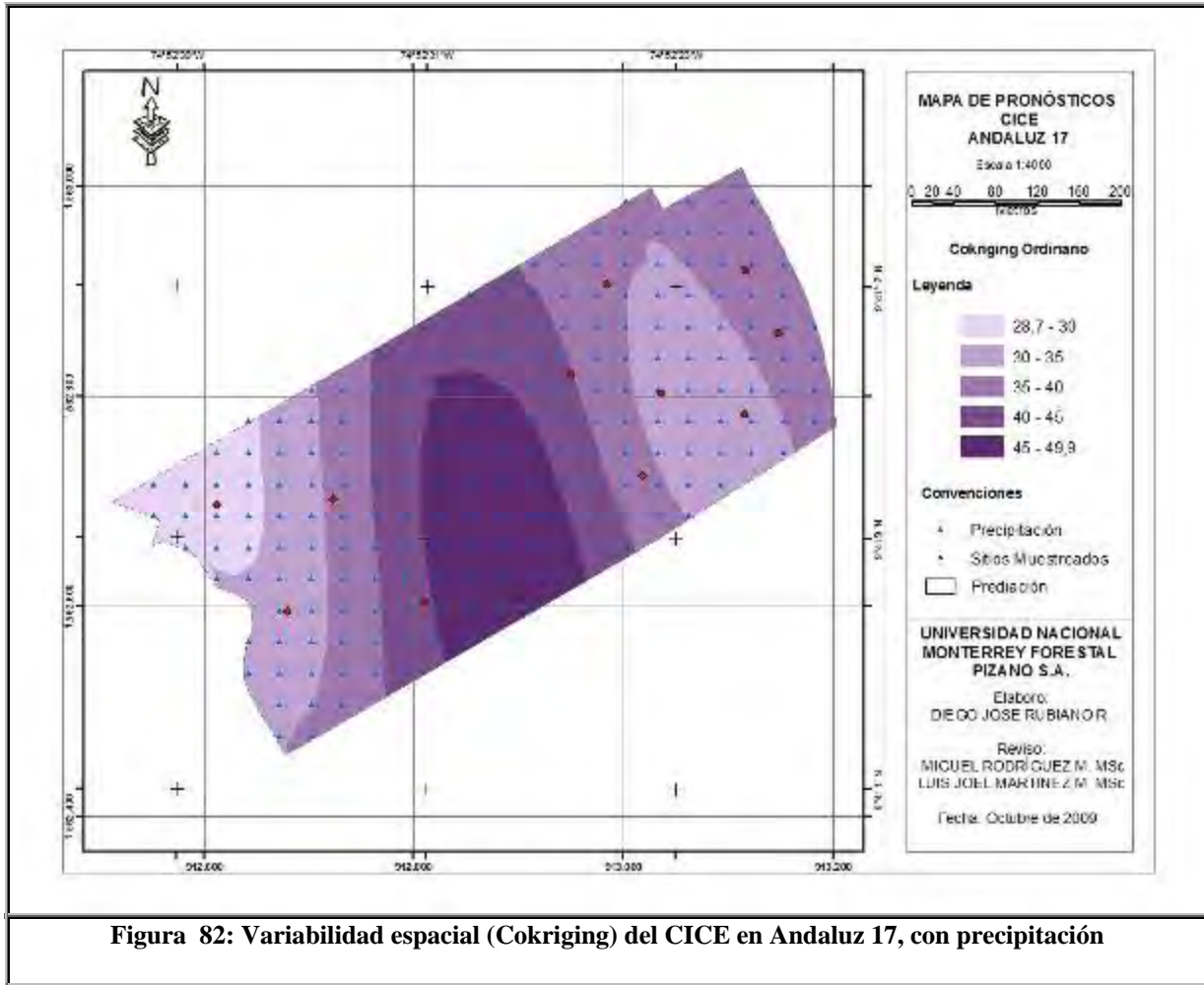


Figura 82: Variabilidad espacial (Cokriging) del CICE en Andaluz 17, con precipitación

La *Figura 83*, presenta un resultado en apariencia poco coherente, debido a que el variograma obtenido con las bandas y la precipitación no resultó adecuado en proporciones, lo que evidencia una limitación cuando las correlaciones son poco significativas, en el momento de obtener un adecuado variograma. De todos modos esta situación sirvió como control para definir hasta donde se puede utilizar un variograma y hasta donde no es aconsejable, como en este caso. Para esta variable es recomendable utilizar apoyo del espectro o de la precipitación pero no de los dos al tiempo, dado que el modelo obtenido limitó el resultado, a una casi total homogenización en una categoría y al norte una pequeña porción de otra. En otras palabras esta aparente dificultad se convirtió en una herramienta para determinar hasta donde se puede utilizar determinadas covariables con poca o baja significancia de correlación.

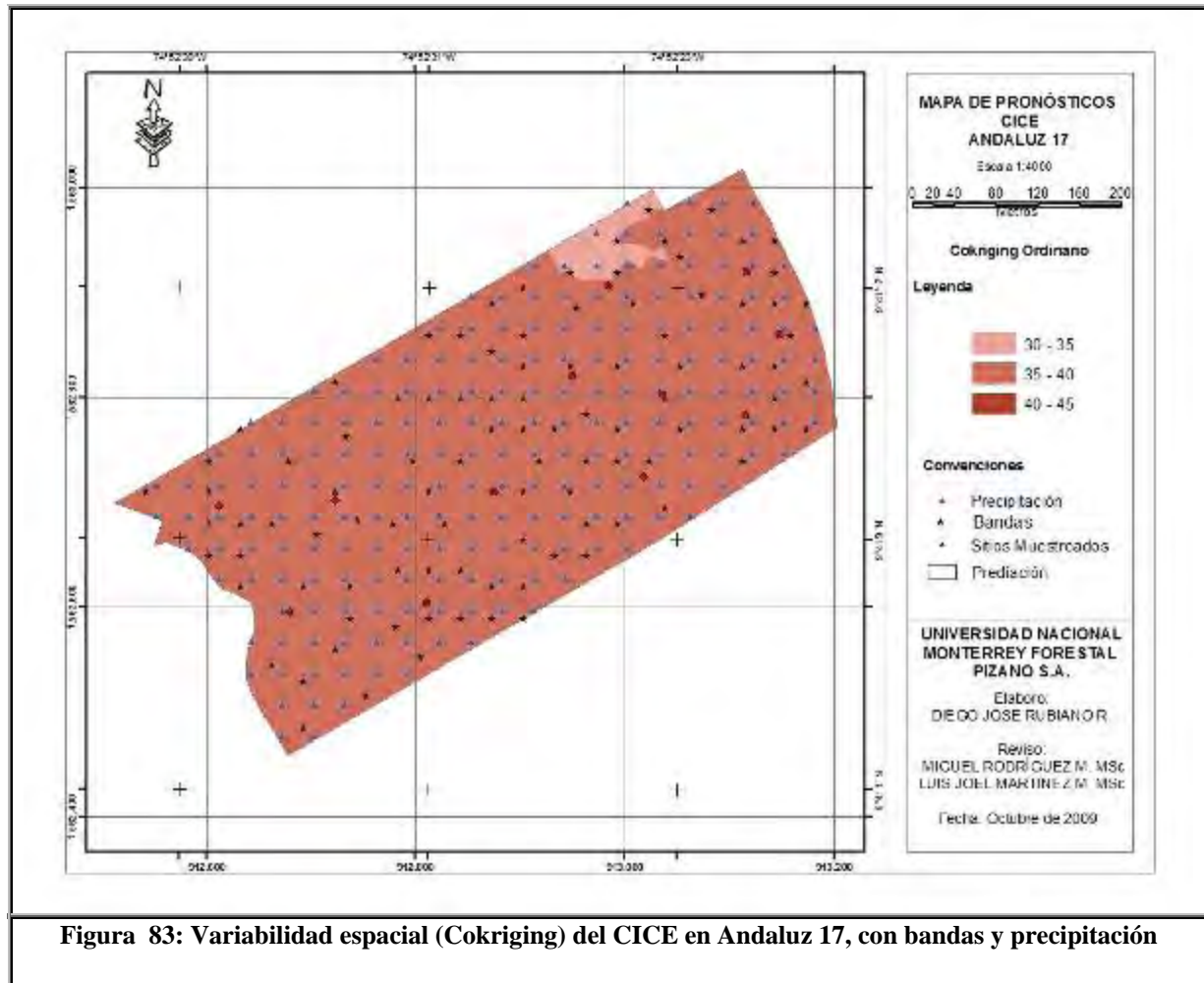


Figura 83: Variabilidad espacial (Cokringing) del CICE en Andaluz 17, con bandas y precipitación

5.9. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Es importante dimensionar los resultados dado que las muestras tomadas (muestra grande con 127 puntos y muestra pequeña con 31 puntos), fueron tomadas en los tres tipos de suelo que sostienen el 89,42% de las 4.567 hectáreas plantadas con la Ceiba roja, y el 95,26% contando con un cuarto tipo de suelo muy similar a uno de los tres primeros y el resto similar o los otros dos (*Tablas 5 y 6*). Lo que podría interpretarse como una estrategia para que a partir del espectro y la precipitación mejorar la muestra de dasometría y algunas propiedades de suelos, para una especie en un ambiente controlado (o conocido) del suelo. Por tanto más que un modelo empírico, lo anterior ha permitido formar una estructura integral de datos de manera costo efectiva que permiten entender mejor una dinámica forestal específica, basados en los últimos avances en este tipo de investigación ya expuestos.

Específicamente, los datos dasométricos en cuanto a *volumen total*, aunque las correlaciones son bajas o medianamente significativas con las bandas electromagnéticas, la estrategia de apoyarse con datos de precipitación mejora de manera importante los resultados, dado que se complementan bastante bien, donde permitieron una excelente separación de grupos, especialmente en la muestra pequeña cuando se trabajaron las 22 variables que incluían la dasometría (2 variables), suelos (14 variables), bandas (5

variables) y precipitación. Esta última permitió sustancialmente mejorar los resultados de separación de grupos dado que la varianza fue perfectamente reunida por el conjunto de factores o variables propuestas, las cuales se tuvieron al inicio con otro juego de variables que fueron estudiadas y ajustadas, en el sentido de agrupar o eliminar las que hacían ruido, como el caso de las densidades (aparente y real), que se reemplazaron por la porosidad una variable más útil y acorde con la respuesta forestal de la ceiba, y por otro lado se adicionó la precipitación, como variable de gran importancia en el modelo. Es decir que inicialmente las variables obtenidas en bruto los resultados de separación de grupos nos fue tan adecuado en la medida que se fueron ajustando cada una de las variables ajustadas o adicionada como el caso de la precipitación, estadísticamente los grupos se fueron separando cada vez mejor, hasta obtener el resultado presentado.

La variable *índice de sitio* no generó una adecuada respuesta de correlación y aunque se podía utilizar con los variogramas con proporciones y errores adecuados, conceptualmente sirvió para fortalecer el modelo general con las propiedades del suelo de las 22 variables, pero por sus bajas correlaciones no se considera un resultado apropiado y práctico de utilizarse, dado que éste índice se obtiene permanentemente por la compañía en sus plantaciones (*Anexo 1*).

Las áreas obtenidas del *volumen total*, mediante el método cokriging con covariables como bandas y precipitación permiten obtener una ponderación de la producción de ceiba en volumen en la actualidad y poder proyectar la futura de manera más controlada y precisa, de igual manera si se calcula de manera ponderada de acuerdo a la sectorización obtenida a partir de la variabilidad espacial, con otras variables se puede obtener otros resultados combinando resultados, que pueden orientar el manejo de la plantación.

De los resultados obtenidos tanto de algunas propiedades físicas como conductividad hidráulica y químicas como sodio y CICE estudiadas, se puede definir una sectorización práctica y funcional para la aplicación de tratamientos silviculturales a la plantación de Ceiba roja, lo cual está permitiendo obtener un modelo tecnológico con elementos de silvicultura de precisión¹⁷.

Dicho lo anterior, los resultados de esta investigación ya están siendo usados por Pizano S.A y Monterrey Forestal Ltda. como metodologías o modelos empíricos de predicción de la producción, los cuales han demostrado estar más cercanos a la realidad comparados con los anteriores metodologías usados hasta el momento. Caso específico de comprobación con el lote de San José 1 que fue aprovechado a finales del 2009, con 47.7 has, con un volumen de 53,5 m³ por ha, con un error de lo estimado con la presente metodología con respecto a lo aprovechado menor del 5%. Además pueden ofrecer un manejo silvicultural más preciso de la especie Ceiba roja. De igual forma con esta metodología se está haciendo para Gmelina arbórea, esta última especie de rápido crecimiento y gran potencial industrial, situación que de algún modo coloca a prueba los resultados prácticos de esta investigación, garantizando en poco tiempo conclusiones y recomendaciones muy útiles para el afinamiento de la misma.

Los índices correlacionan de manera muy similar a las bandas electromagnéticas por tanto para mejorar la muestra dasométrica o la muestra de algunas propiedades del suelo, por

¹⁷ Término que el autor quiere mencionar bajo las condiciones del estudio únicamente.

tanto es indiferente usar las bandas o los índices, para realizar el cokriging como estrategia ya explicada.

Las bandas electromagnéticas B1, B2 y B3, en general responden mejor para las variables que explican algunas propiedades químicas del suelo, y las bandas B3, B4 y B5 responde más adecuadamente a las propiedades físicas del suelo, apoyadas en ambos casos con la precipitación, aunque no en todos los casos presentaron correlaciones significativas, sin embargo, siempre y cuando los variogramas calculados y seleccionados, sean adecuados en proporciones y error, pueden ser utilizados los resultados de variabilidad espacial para mejorar las muestras con apoyo de la precipitación, evaluando el resultado, para una más apropiada utilización de los mismos a nivel indicativo. Lo que en términos prácticos estos resultados ha permitido tomar datos de suelos con menor intensidad pero con excelente distribución, buscando los periodos del año con que se pueda contar con imágenes coetáneas hasta donde sea posible, así como los datos actualizados de precipitación media anual con la red de estaciones con que cuenta la compañía.

El aporte de las bandas electromagnéticas y la precipitación para algunas variables de propiedades químicas y físicas de suelos estudiadas, donde presentaron correlaciones significativas permite de manera confiable extrapolar información en zonas cercanas con plantaciones de Ceiba roja donde no se ha hecho muestras de suelos, para tener datos bastante aproximados y útiles para sondeos rápidos o para disminuir la densidad de los mismos y mejorar la distribución de los muestreos. Ejemplos contundentes sodio, potasio, carbono orgánico oxidable y total, materia orgánica, fósforo, porcentaje de arcillas, humedad gravimétrica y densidad real (*Anexo 7*).

Un aspecto importante para analizar es el hecho de que el trabajo de campo se realizó entre septiembre y noviembre de 2005 y la imagen Landsat 9-53 es del 10 de Enero de 2006, aspecto temporal muy acorde, presentando mínimos o nulos cambios de cobertura en las plantaciones. Sin embargo el hecho de que en Enero la Ceiba por ser una especie caducifolia, ha desprendido gran parte de su follaje, las respuestas electromagnéticas fueron bastante positivas en la respuesta de las bandas, aunque de los índices no se obtuvo mayor valor agregado. Sin embargo sería conveniente trabajar con imágenes en período húmedo no con tanto tiempo de diferencia con respecto al muestreo de campo, que sirva de comparación y análisis.

6. CONCLUSIONES

Se estableció un modelo empírico adecuado a partir de resultados estadísticos y de variabilidad espacial, para la Ceiba roja en condiciones de bosque seco tropical, para un grupo específico de suelos de planicie aluvial y lomerío bajo, donde se relacionan datos de producción con datos de suelos que incluyen propiedades físicas y químicas, con apoyo de los valores espectrales y la precipitación, permitiendo mejorar la predicción de la producción y una sectorización para unas prácticas de manejo más efectivas.

Las correlaciones de la variable dasométrica *volumen total* y de las variables edáficas, con las cinco bandas electromagnéticas de la subescena Landsat 9-53 del 10 de Enero de 2006, apoyados con datos puntuales de la precipitación, resultaron ser significativas para una buena parte de ellas, pero como resultado integral fue útil para todas las variables (a excepción de *índice de sitio*), en las plantaciones de Ceiba roja de la Hacienda Monterrey forestal en bosque seco tropical. Permitiendo obtener una mejor predicción de la variabilidad espacial de las mismas de manera confiable y costo efectiva, lo que en otras palabras significa que la hipótesis planteada se validó.

Las correlaciones de las variables dasométricas con el espectro (bandas) y la precipitación fueron aceptables en *volumen total*, e inaceptables en *índice de sitio*. Sin embargo en el caso de *volumen total* la complementariedad de las bandas con la precipitación, mejoró notablemente los resultados.

Las correlaciones de las variables que describen algunas propiedades importantes del suelo con las bandas, la precipitación y la dasometría, en general medianas y bajas pero significativas. Aún así, como grupo de variables estudiadas, ajustadas y seleccionadas, permitieron obtener un resultado integral adecuado y explicativo de los tres grupos medidos y observados para las condiciones del área de estudio, por tanto, con lo anterior se considera que se mejoró la confiabilidad de sus resultados como un modelo integral y no de variables aisladas.

Los modelos de predicción de variabilidad espacial kriging y cokriging, trabajados con variogramas adecuados, respondieron de manera pertinente a los requerimientos de Pizano S.A. y de la investigación, para la Ceiba roja en la zona de estudio.

Los datos dasométricos pueden llegar a utilizarse para mejorar las muestras de algunas propiedades de los suelos, donde presentó mejor correlación como conductividad hidráulica, limos y magnesio, los cuales pueden ser complementados con datos de sensores remotos o precipitación.

Las plantaciones de Ceiba roja estudiadas en la Hacienda Monterrey con 4.567 has resultan ser el 53% de las plantaciones de ésta especie en el país y dado que se estudiaron muestras que se encuentran en el 89,42% de los suelos donde se encuentra la Ceiba roja, se puede decir que el impacto de los resultados del estudio favorece o pueden ser aplicables directamente al 47,38% de la Ceiba roja del país.

Los resultados obtenidos no solamente sirvieron para predecir la producción futura de madera de Ceiba roja en la zona y condiciones de estudio, sino además aportan

sectorizaciones en los mismos lotes muy apropiadas para el manejo específico de la plantación ya sea de tipo físico o químico, buscando avances en la silvicultura de precisión, con materiales y métodos al alcance de la industria forestal colombiana.

La geomática en general que se apoya en la geoestadística, Sistema global de posicionamiento GPS, sensores remotos, Sistemas de Información Geográfica y cartografía digital, se convierten en una gran aliada en la búsqueda de una silvicultura de precisión, para estar a la altura de la exigente competitividad mundial.

Como conclusiones específicas se establecen las siguientes:

La precipitación resultó ser una variable significativamente sensible de acuerdo a los siguientes chequeos: 1) tener una red de 15 estaciones pluviométricas dentro de los predios de la Hacienda Monterrey, 2) arrojar diferencias entre los tres grupos muestreados entre 1022 1048 mm en San José, entre 741 y 798 mm en Andaluz, y entre 726 y 742 mm en San José, 3) mejorar la diferenciación de los tres grupos, con cero error en la muestra pequeña, y 4) por tener correlaciones altas con las bandas electromagnéticas tanto en la muestra grande como en la pequeña.

Las bandas electromagnéticas B1, B2 y B3, en general responden mejor para las variables que explican algunas propiedades químicas del suelo, y las bandas B3, B4 y B5 responde más adecuadamente a las propiedades físicas del suelo, apoyadas en ambos casos con la precipitación.

El índice de sitio por ser una variable indirecta que se deriva de los árboles más altos, por su misma condición puede estar generando sesgo y por tanto sus resultados no son adecuados y por tanto no se recomienda el uso de los mismos.

Como resultado de la interpretación estadística de la muestra grande, se recomienda utilizar datos del espectro especialmente de las bandas B3, B4 y B5 puesto que su correlación fue significativa y la separación de grupos y demás análisis estadísticos adecuados. Por otro lado no se recomienda utilizar las bandas electromagnéticas para mejorar la muestra del *índice de sitio*. Al observar la variable precipitación con las bandas las correlaciones fueron mayores comparadas con dasometría, lo que permite interpretar que la precipitación aporta de manera significativa al modelo buscado.

Se interpretó que fue acertado los resultados de suelos que se estimaron de manera integral, a partir de la definición del mejor juego de variables, seleccionadas y modeladas hasta obtener la mejor separación, lógicamente fue de mayor utilidad para las variables con alta o media correlación. Sin embargo, las variables con baja correlación, eventualmente podrían apoyarse con datos espectrales y de precipitación, aunque de manera indicativa, para estudios de planificación de inventarios y toma de muestras.

7. RECOMENDACIONES

Es importante avanzar en este tipo de estudios en las plantaciones nuevas e incluso antes de sembrarlas, para así determinar una silvicultura más sectorizada y oportuna, como en el caso de Pizano S.A y Monterrey Forestal Ltda., donde ya empezó dicha labor en sitios y plantaciones nuevas, apoyado en los presentes resultados.

Sería importante a futuro tomar mediciones en los sitios específicos de los predios estudiados, donde se correlacionó la imagen satelital para corroborar y ajustar los presentes resultados.

Estos resultados no pueden ser asumidos como una generalidad, solamente como un resultado de una especie determinada, en unos suelos determinados, con unas respuestas electromagnéticas determinadas, en un tiempo determinado, obteniéndose unos resultados muy positivos pero específicos a estas condiciones. En otras condiciones de humedad, plantación o temporalidad, debe hacerse un nuevo ejercicio, lógicamente aprovechando algunas estrategias y conclusiones de la presente investigación.

Los resultados de una plantación son el producto de la combinación de muchas variables de suelos tanto de tipo físico como químico, clima, material genético plantado, condiciones ecológicas vecinas y prácticas silviculturales. Por tanto continuar con estudios que complementen esta investigación, permitirán obtener un paquete tecnológico de las diferentes especies forestales promisorias y del sector forestal industrial, más acorde con los nuevos requerimientos del mercado actual y de las exigencias ambientales asociadas.

Fortalecer iniciativas como la del laboratorio de suelos con énfasis forestal de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas, actual proveedor de análisis de suelos de Pizano S. A., permitirá hacer estos procesos mucho más efectivos.

Continuar con la presente investigación con la misma metodología comparando con datos más actualizados y retroalimentando las bases de datos del sistema con los datos de aprovechamiento de algunos lotes que se iniciaron a finales del 2009.

Se deberían plantear estudios complementarios con otras imágenes más y menos actuales y establecer además de lo estudiado un análisis multitemporal que arroje resultados de la dinámica de la plantación, inclusive con otros sensores y de épocas del año diferentes en la medida que encuentren despejadas, para contrastar períodos secos y húmedos.

Igual manera establecer estudios similares con énfasis en las propiedades del suelo como sodio, conductividad hidráulica, limos o en general la textura, con la Ceiba e imágenes satelitales y la precipitación.

8. BIBLIOGRAFÍA

Andrade L. 1999. Spatial variability of the splash erosion in soils of the Petaquire river basin. En *Agronomía Tropical* 49 (1):5-17.

Baquero F. y Vargas W. 2003. Variabilidad espacial y caracterización de los suelos de la Cuenca Alta del Río Blanco, parámetros físicos, químicos y vegetales. Tesis Universidad Distrital, Facultad del Medio Ambiente. 157 p.

Burrough P.A., McDonnell .1998. Principles of geographical information systems. Oxford University Press. 333 p.

Cadena M, F. Baquero y W. Vargas. 2002. Informe Final del componente suelos. En: Caracterización Fisonómica, Estructural y Florística de las unidades de vegetación presente en las áreas rurales del Distrito Capital, Fase I. Universidad Distrital. Informe presentado al Jardín Botánico de Bogotá.

Ceballos, G. 1995. Vertebrate diversity, ecology, and conservation in neotropical dry forest. En *Tropical deciduous Forest Ecosystem*. S. Bullock, E. Medina & H. A. Mooney (eds). Cambridge Univ. Press, Cambridge. pp. 195-222.

Chirici et al. 2008. Non-parametric and parametric methods using satellite images for estimating growing stock volume in alpine and Mediterranean forest ecosystems. *Remote Sensing of Environment* 112 (2008) 2686–2700.

Chuvieco, E.; Javier Salas y Enrique Meza. 2002. Empleo de la teledetección en el análisis de la deforestación tropical: el caso de la reserva forestal de Ticoporo (Venezuela). *Serie Geográfica* Nº. 10 - 2002: 55 – 76.

Chuvieco, E. 2002. Teledetección ambiental. La observación de la Tierra desde el espacio. Barcelona: Ariel Ciencia. 586 p.

Cortés A. 2004. Suelos colombianos, una mirada desde la academia. Universidad de Bogotá Jorge Tadeo Lozano. Bogotá 192 p.

Cortés, A. y Malagón D. 1984. Levantamientos agrológicos y sus aplicaciones múltiples. Universidad de Bogotá Jorge Tadeo Lozano. Bogotá.

Cressie, N. 1993. Statistics for spatial data. New York: John Wiley & Sons, 1993. 900p.

CVC. 1994. Informe 90-7. Comparación de la cobertura de bosques y humedales entre 1957 y 1986 con delimitación de las comunidades naturales críticas del valle geográfico del Río Cauca. Cali. Documento interno.

Díaz, L. G. 2007. Estadística multivariada: Inferencia y métodos. Universidad Nacional de Colombia. Departamento de Estadística. Bogotá. Colombia.

Díaz Viera, M. 2002. Geoestadística aplicada. Instituto de Geofísica, UNAM. Instituto de Geofísica y Astronomía, CITMA, Cuba.

- Díaz y Presutti. 2009. Evaluación de la aptitud del NDVI y SR derivado de imágenes Landsat 5 TM para estimar parámetros biofísicos de plantaciones de pino con raleo sistemático. Anais XIV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Natal, Brasil, 25-30 abril 2009, INPE, p. 2681-2688.
- Donoso C. 1997. Ecología Forestal. El bosque y su Ambiente. Universidad Austral de Chile. Ed Universitaria. Santiago de Chile, Chile.368 p.
- Espinal, L. S. 1985. Geografía ecológica del departamento de Antioquia. Revista de la Facultad Nacional de Agronomía, 38 (1) : 24-39.
- Espinal, L.S. y E. Montenegro. 1977. Formaciones vegetales de Colombia. Instituto Geográfico Agustín Codazzi, Bogotá, pp 201.
- Evans, Huw. 1997. "The Bretton Woods Institutions: A View from the Boards." Global Economic Institutions Working Paper No. 32.
- FAO. 2001. Situación de los bosques del mundo 2001. Parte II problemas clave del sector forestal.
- Feldpausch et al. 2006. Biomass, harvestable area, and forest structure estimated from commercial timber inventories and remotely sensed imagery in southern Amazonia. Forest Ecology and Management 233 (2006) 121–132.
- Gentry, A. H. 1995. Diversity and floristic composition of neotropical dry forest. En Tropical deciduous Forest Ecosystem. S. BULLOCK, E. MEDINA & H. A. MOONEY (eds). Cambridge Univ. Press, Cambridge. pp. 116-194.
- Giraldo, R. 2002. Introducción a la geoestadística, teoría y aplicación. Universidad Nacional de Colombia. Bogotá. D. C.
- Groot, R. 1989. Meeting educational requirements in Geomatics. ITC-Journal. 1989-1:1-4
- Guauque, D. G. 2008. Modelación de la disponibilidad de nutrientes y respuesta a la fertilidad N-P-K en plantaciones de dos años de edad de Gmelina arborea (Fundación, Magdalena). Universidad Distrital. Bogotá Colombia.
- Hagner y Reese. 2007. A method for calibrated maximum likelihood classification of forest types. Remote Sensing of Environment 110 (2007) 438–444.
- Hall et al. 2006. Modeling forest stand structure attributes using Landsat ETM+ data: Application to mapping of aboveground biomass and stand volume. Forest Ecology and Management 225 (2006) 378–390.
- Hernández, C. 1990. La selva en Colombia. En Selva y Futuro, Eds. C. Hernandez, J. Carrizosa. Sello Editorial, Bogotá. pp. 13-40.
- Hernandez, C., G. Hurtado, Q. Ortiz y C. Walschbulger, 1992. Unidades biogeográficas de Colombia. En Diversidad biológica de iberoamérica, Compilado por. G. Halffter. Mexico. pp. 100-151.

Holdridge, L.R., W.C. Grenke, W.H. Hatheway, T. Liang & J.A. Tosi. 1971. Forest environments in tropical life zones, a pilot study. Pergamon Press, Oxford. P. 747.

Huete, A.R. 1988. "A Soil Adjusted Vegetation Index (SAVI)". Remote Sensing of Environment, 25: 295-309.

Huete, A.R., Hua, G., Qi, J., Chehbouni, A., Van Leeuwem, W.J. 1992. "Normalization of Multidirectional Red and Near-Infrared Reflectances with the SAVI". Remote Sensing of Environment, 40: 1-20.

IGAC. 1990. Métodos analíticos del laboratorio de suelos. V edición. Bogotá. 499 p.

IGAC. 1975. Estudio general de suelos de los municipios de Carmen de Bolívar, San Jacinto, San Juan de Nepomuceno, Zambrano, El Guamo y Córdoba (departamento de Bolívar). 274 p.

Instituto Alexander von Humboldt, IAVH. 1995. exploración ecológica a los Fragmentos de bosque seco en el Valle del Río Magdalena (Norte del Departamento del Tolima). Grupo de Exploraciones Ecologicas Rapidas, IAVH, Villa de Leyva. pag. 56.

Instituto Alexander von Humboldt, IAVH. 1997. Caracterización ecológica de cuatro remanentes de Bosque seco Tropical de la región Caribe colombiana. Grupo de Exploraciones Ecologicas Rapidas, IAVH, Villa de Leyva. pag. 76.

Instituto Alexander von Humboldt, IAVH. 1998. El Bosque seco Tropical en Colombia. Programa de Inventario de la Biodiversidad Grupo de Exploraciones y Monitoreo Ambiental GEMA. 24 p.

Jensen, J.R. 2000. Remote Sensing of the Environment: An Earth Resource Perspective. Prentice Hall: Upper Saddle River (NJ), USA.

Johnson, D. E. 2000. Métodos multivariados aplicados al análisis de datos. Internacional Thomson Editores. México.

Johnston K., Ver Hoef J.M., Krivoruchko K., Lucas N. 2001. Using ArcGis Geostatistical Analyst. ESRI. 300 p.

Johnston M.K. 1992. Soil-vegetation relationships in a tabonuco forest community in the Luquillo Mountains of Puerto Rico. En: Journal of Tropical Ecology 8:253-263.

Koukal et al. 2007. The impact of relative radiometric calibration on the accuracy of kNN-predictions of forest attributes. Remote Sensing of Environment 110 (2007) 431–437.

Lefsky et al. 2005. Combining lidar estimates of aboveground biomass and Landsat estimates of stand age for spatially extensive validation of modeled forest productivity Remote Sensing of Environment 95 (2005) 549–558.

Lutz, H y Chandler, R. 1959. Forest soils. Jhon Wiley and Sons, Inc New York. 653 p.

Martínez L. J. 2004. Analisis y modelamiento espacial. Maestría en Geomática. Universidad Nacional de Colombia.

- Matos, A. 2006. Estimativa de biomassa e carbon em floresta ombrófila densa de terra firme na amazônia Central, Manaus- AM, Brasil, por meio de dados de satélites de média e alta resolucao espacial. Curitiba. 91 p.
- McRoberts, R. 2008. Using satellite imagery and the k-nearest neighbors technique as a bridge between strategic and management forest inventories. *Remote Sensing of Environment* 112 (2008) 2212–2221.
- Meng et al. 2007. A linear mixed-effects model of biomass and volume of trees using Landsat ETM+ images. *Forest Ecology and Management* 244 (2007) 93–101.
- Murphy, P.G. y A.E. Lugo, 1986. Ecology of tropical dry forest. *Annals Review of Ecology and Systematics* 17 : 67-68.
- Nanos M. y Montero G. 2002. Spatial predictor of diameter distribution models. *Forest Ecology and Management* 161 (2002) 147-158.
- National Aeronautics and Space Administration. 2004. Landsat Tutorial, (On-line). <http://www.nasa.gov/home/index.html>.
- Navarro et al. 2006. Segmentación de imágenes mediante el empleo de índices de vegetación para la estimación de parámetros edáficos. El acceso a la información espacial y las nuevas tecnologías geográficas, pág. 1093-1105.
- Pandey, Kiran D. and David Wheeler. 2001. "Structural Adjustment and Forest Resources: The Impact of World Bank Operations." World Bank Working Paper No. 2584.
- Paruelo, J.M. 2008. La caracterización funcional de ecosistemas mediante sensores remotos. *Ecosistemas* 17(3):4-22.
- Palmer, W. M. 1993. Putting things in even better order: the advantages of canonical correspondence analysis. *Ecology* 74: 2215 – 2230.
- Pérez, R et al. 2007. Árboles, arbustos y palmas de Panamá. Panamá.
- Pizano. 2007. Sistema de Información Geográfico corporativo de Pizano S. A.
- Pizano. 2009. www.Pizano.com.co. Actividad forestal.
- Prasolova et al. 2000. Spatial-temporal variability of soil moisture, nitrogen availability indices and other chemical properties in hoop pine (*Araucaria cunninghamii*) plantations of subtropical Australia. *Forest Ecology and Management* 136 (2000) 1-10.
- Rodríguez, M. A. 1998. Desarrollo sostenible a través del establecimiento de bosques plantados y de sistemas agroforestales caso de estudio: Pizano S.A. Colombia. Santiago, Chile 18-20 Nov. de 1998.
- Rondeaux, G., Steven, M., Baret, F. 1996. "Optimization of Soil-Adjusted Vegetation Indices". *Remote Sensing of Environment*, 55:95-107.
- Rouse, J.W., Haas, R.H., Schell, J.A., Deering, D.W. 1974. Monitoring Vegetation Systems in the Great Plains with ERTS. *Proceeding, Third Earth Resources Technology Satellite-1*

Symposium, NASA SP-351 (pp. 309-317).Goddard Space Flight Center, Greenbelt (MD), USA.

Ruiz A. y León R. 2009. Estadísticas de plantaciones forestales productoras o comerciales periodo 1975-2007. IDEAM. Bogotá. 35 p.

Sánchez, M & Reyes, T. 1998. Estudio de la variabilidad espacial del contenido de humedad, densidad aparente, salinidad y pH de un suelo a lo largo de un transecto. En: Revista Venesuelos Deposito Legal DLPP92-0468 4(1y 2):2-8.

Sales et al. 2007. Improving spatial distribution estimation of forest biomass with geostatistics: A case study for Rondonia, Brazil. ecological modelling 205 (2007) 221–230.

Sader y Legaard. 2008. Inclusion of forest harvest legacies, forest type, and regeneration spatial patterns in updated forest maps: A comparison of mapping results. Forest Ecology and Management 255 (2008) 3846–3856.

Schroeder et al. 2007. Patterns of forest regrowth following clearcutting in western Oregon as determined from a Landsat time-series. Forest Ecology and Management 243 (2007) 259–273.

Soil Survey Staff. 2003. Keys to Soils Taxonomy. 9th edition. United States Department of Agriculture – Natural Resources Conservations service. Washington U.S.A. 332 p.

Steven, M.D. 1998. “The sensitivity of the OSAVI vegetation index to observational parameters”. Remote Sensing of Environment, 63: 49-60.

Toro, J. 1975. Continuum suelo-planta-atmósfera en cuatro especies nativas forestales chilenas. Seminario cátedra relación agua-suelo-planta. Apuntes. Facultad de Ciencias Forestales. Universidad de Chile. Santiago. Chile .81 p.

Trujillo, E. 2003. Manual de árboles. Segunda edición. Bogotá. 250 pp.

Ureña, H. 1999. Ceiba Roja *Bombacopsis quinata* (Jacq) Dugand, Establecimiento y Manejo de una especie tropical. Monterrey forestal - Ibague. Litoimagen.

Valbuena et al, 2008. Variabilidad espacial del suelo y su relacion con el rendimiento de mango (*Mangifera indica* L.). Rev. Bras. Frutic., Jaboticabal - SP, v. 30, n. 4, p. 1146-1151, Dezembro 2008.

Villatoro et al. 2008. Comparación de los interpoladores idw y kriging en la variación espacial de pH, Ca, CICE y P DEL SUELO. Agronomía Costarricense 32(1): 95-105. ISSN:0377-9424 / 2008.

Waterworth et al. 2007. A generalised hybrid process-empirical model for predicting plantation forest growth. Forest Ecology and Management 238 (2007) 231–243.

Walker L, D. Zarin, N Fetcher, R Myster y A Johnsosn. 1996. Ecosystem development and plant succession on landslides in the Caribbean. Biotropica 28:566-576.

Yebra, M., Chuvieco, E. 2008. Modelos de Simulación de Reflectividad en ecología: potencialidades y problemas. Ecosistemas 17(3):23-38.

ANEXOS

ANEXO 1

TIPOS DE VARIABILIDAD ESPACIAL EN LA PRODUCCIÓN EN PLANTACIONES FORESTALES INDUSTRIALES

INTRODUCCION

La variabilidad espacial de la producción de madera de las plantaciones forestales industriales, se puede analizar desde diferentes puntos de vista, los cuales han trabajado diferentes autores; tres de estos puntos de vista, considera el autor son importantes abordar para el entendimiento de la variabilidad espacial de las plantaciones forestales industriales. El primero se basa en la calidad de sitio, a través del índice de sitio, el cual lo que busca es que de manera localizada (lote, parcela o rodal) se defina una producción esperada (volumen de madera) para una especie forestal plantada. El segundo se plantea, con modelos de simulación de producción de plantaciones forestales, los cuales aplican para un área determinada. El tercero se basa en modelos de variabilidad espacial de plantaciones forestales (productividad) y de aspectos biofísicos (en áreas forestales).

Los dos primeros básicamente hacen análisis de resultados de las diferentes áreas o zonas y se comparan entre sí, claro está si el modelo de simulación no incluye variabilidad espacial, si es así haría parte del tercer grupo. El tercero, parte de un análisis de datos puntuales para llegar a explicarse el comportamiento de una variable o grupo de variables a través del espacio en un área de interés o de estudio.

Lo que se busca con esta revisión de literatura, sobre el tema es conocer las diferentes propuestas metodológicas de estos tres enfoques y con esto poder definir la manera más idónea de abordar el tema a nivel metodológico en la tesis de investigación¹, apoyado en la geomática.

La calidad del sitio (índice de sitio)

La calidad de sitio forestal, según Rojo-Martínez y otros (2005), se entiende como la capacidad productiva de dicho lugar y habitualmente se refiere al volumen de madera producido por una masa forestal cuando llega a la edad del turno. La calidad del sitio tiene entonces una doble utilidad práctica: como herramienta para estimar la producción y como base para construir instrumentos prácticos de gestión de plantaciones forestales comerciales.

De acuerdo con Zeide (1993), el crecimiento resulta de la interacción de dos fuerzas opositoras: un componente positivo manifestado por la expansión de un organismo que tiende hacia la multiplicación exponencial, este componente está asociado con el metabolismo constructivo o anabolismo. Un componente opositor que representa las restricciones impuestas por factores externos como la competencia por recursos, respiración, estrés, es decir el catabolismo.

En el ámbito forestal, el crecimiento es considerado como una función que depende directamente de los factores del sitio que se encuentran interactuando en el rodal,

¹ Rubiano R. D. 2009. Variabilidad espacial de las propiedades del suelo, la producción y la respuesta espectral de plantaciones industriales de Ceiba roja. UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA.

formulado en términos de tasa de crecimiento e integrado en el tiempo. La forma general de dicha función en un tiempo dado es:

Crecimiento = $f(\text{especie, edad, densidad, calidad de sitio})$

Alder (1980), considera que el crecimiento es un proceso biológico que involucra dos procesos: uno que impulsa al organismo a aumentar de tamaño mediante la acumulación de la energía bioquímica y, el otro, que frena el crecimiento mediante el gasto de energía para realizar sus funciones fisiológicas. Estos dos procesos son conocidos como los procesos anabólicos y catabólicos respectivamente.

La altura de los árboles dominantes y la edad son las variables que están más correlacionadas con la producción forestal y son las que definen la capacidad productiva de un sitio. Por tanto, el índice de sitio, definido como la altura promedio de los árboles dominantes a una edad determinada, es la medida de calidad de sitio más ampliamente utilizada (Wang 1998).

Sin embargo, según Clutter et al. (1983 citado por Elfving y Kiviste 1997) la mayoría de los métodos para la construcción de índices de sitio tienen demasiados supuestos lo que los hace poco precisos. Por su parte, Elfving y Kiviste (1997) señalan que existen al menos 100 funciones matemáticas usadas para evaluar la relación entre la edad y la altura de los árboles, aunque no todas pueden ser consideradas como verdaderas funciones de crecimiento. Los autores señalan además, que prácticamente existe un método modificado para cada especie estudiada.

Según Romero, D. L. 2002, Dadas estas circunstancias, la pregunta que surge es ¿el concepto reduccionista de índice de sitio es válido para analizar el éxito en el crecimiento de las especies forestales y su adaptabilidad?. Con base en lo analizado hasta el momento podría pensarse que no, ya que los resultados apuntan a señalar que deberían incluirse dentro del concepto otras variables de calidad de sitio y no solamente la altura de dominantes y la edad.

Wang (1998) señala que la ecuación altura-edad que define el índice de sitio de árboles (site trees) se ha desarrollado con base en datos de altura y edad de árboles de sitios maduros, coetáneos, de libre crecimiento, no perturbados y puros o uniespecíficos (e.g. Carmean y Lenthall 1989). Señala además, que el índice de sitio ha sido menos útil como concepto en bosques de diferentes edades y/o multiespecíficos (e.g. Monserud 1988; Wykoff 1990).

Por tal motivo, se han desarrollado otros tipos de índices que pueden emplearse en bosques mixtos y/o disetaneos; índices como el de productividad del sitio cuya única diferencia es que la altura es referida a un diámetro a la altura del pecho específica y no a la edad (Vanclay y Henry 1988; Huang y Titus 1993). La mayoría de estos intentos ha sido insatisfactorio por varias razones, por ejemplo, el índice de productividad asume que la densidad de siembra no afecta la relación altura-diámetro, lo que es falso, ya que el diámetro está correlacionado con la densidad; por lo tanto, el autor encontró que el índice de productividad no es un buen indicador de la calidad del sitio y que la densidad si ejerce un efecto sobre el diámetro (Romero, D. L. 2002).

No obstante, Daniel et al. (1982) señalan que el índice de productividad del sitio o índice de terreno como lo llama Daniel, es útil cuando los árboles han sufrido largos períodos de supresión. Esto confirma la idea planteada por Clutter et al. (1983 citado por Elfving y

Kiviste 1997) que sugiere que cada método debe ser modificado para cada especie o grupo de individuos.

Retomando la idea de Wang (1998) que señala que la ecuación altura-edad se adapta mejor a masas boscosas coetáneas, monoespecíficas y que la relación entre la altura dominante y la producción es independiente de la edad, del sitio, de la densidad, de la población y del tipo de aclareos practicados (ley de EICHHORN²), se podría esperar que el índice de sitio fuese un buen estimativo de la calidad de sitio de plantaciones forestales monoespecíficas de *Pachira quinata* (Ceiba Roja). Sin embargo, lo que se encontró es que puede ser un buen estimativo de crecimiento pero no muestra claramente su relación con las variables de calidad de sitio.

Por otro lado, Teshome y Petty (2000) señalan que el desarrollo de la altura dominante y la validez del índice de sitio como modelo es difícil sobre la base de parcelas temporales y que la mejor vía para validar el modelo es utilizar datos provenientes de parcelas permanentes, lo que permitiría observar si la altura dominante se desarrolla como se indicó en el modelo, como ocurrió en el caso de *Pachira quinata*.

La situación aquí es discutir cual podría ser la razón por la cual los resultados de este estudio indican que el índice de sitio no es un buen estimativo de la calidad de sitio, ya que no se correlaciona satisfactoriamente con los demás factores de la calidad de sitio (Romero, D. L. 2002).

Si la calidad de sitio se define como:

- Los factores climáticos, bióticos, topográficos y edáficos que caracterizan determinado hábitat mediante su interacción (Romero, D. L. 2002).
- Además, en regiones con características climáticas homogéneas, las variaciones locales de la calidad de sitio deben ser atribuidas específicamente a los factores edáficos (Romero, D. L. 2002).
- La suma de factores ambientales tales como la profundidad del suelo, su textura, las características de sus perfiles, su composición mineral, sus pendientes, la exposición, el microclima, las especies que soporta, su historia geológica, su fisiografía, el macroclima y el estado sucesional de la vegetación que posee y que finalmente definen la productividad de los terrenos forestales, Daniel et al. (1982).

Surgen entonces dos interrogantes;

1. ¿Es suficiente incluir solo dos variables de crecimiento para definir el índice y desestimar los demás factores que condicionan la calidad de sitio?

La literatura en general señala que la potencialidad productiva de una plantación o de un bosque hace referencia a la capacidad de la misma para sintetizar biomasa, lo que hace que dependa tanto de los recursos del medio, como de la capacidad que tiene para aprovechar esos recursos. Por tal motivo, es necesario tener en cuenta en la valoración de la calidad de sitio las ofertas medioambientales que tiene para la producción (Romero, D. L. 2002).

² La ley señala que la producción total en volumen de masas homogéneas de una especie dada dentro de una región climáticamente homogénea, es esencialmente función de la altura.

No obstante, es interesante señalar que la revisión de literatura sobre calidad de sitio (Carmean 1989; Fernández et al. 1988; Proctor 1992) destaca las escasas y débiles correlaciones obtenidas entre crecimiento y las variables edáficas, principalmente el tipo de suelo. Lo que sugiere que el crecimiento puede variar ampliamente dentro de un mismo tipo de suelo o unidad de mapeo.

Por ejemplo Fernández y Pahr (1988) encontraron relaciones débiles entre tipo de suelo y la clase de sitio, dado que una misma unidad se correspondió con varias clases de sitio, así como plantaciones realizadas en diferentes tipos de suelo presentaron una misma clase de crecimiento. Los autores indican la necesidad de identificar y evaluar los atributos edáficos condicionantes del crecimiento, los cuales, posiblemente, presenten mayor dependencia respecto a determinadas características funcionales que del tipo de suelo definido como unidad taxonómica.

Sin embargo, es importante señalar que dado el análisis anteriormente planteado sobre la eficacia del índice de sitio como estimativo de la calidad de sitio, es posible que los autores no hayan encontrado relaciones debidas a las incongruencias entre la definición de calidad de sitio y su método de valoración. Aunque es clara la necesidad de encontrar los atributos edáficos condicionantes del crecimiento, que puedan ser incorporados a nuevos análisis de calidad de sitio.

Otro aspecto importante es que al contrario de los métodos dendrométricos para la evaluación de la calidad de sitio, los métodos que se basan en factores extrínsecos no necesitan de una masa forestal en estado vegetativo aceptable, sino que se basan en la incidencia de los factores ecológicos abióticos. No obstante, se corre el riesgo de cometer el mismo error y es estimar la calidad del sitio sólo por las variables condicionantes y no sumado a las características de crecimiento de los individuos que soporta (Romero, D. L. 2002).

2. ¿Si el índice de sitio no es la aproximación metodológica apropiada, cuál podría serlo?

Se puede decir que aunque todos los investigadores señalan al índice de sitio como la forma más adecuada de valorar la calidad de sitio y de predecir el crecimiento, en el momento de relacionar éste con las variables ambientales el concepto no parece explicar la calidad de sitio. Surge entonces un interrogante ¿El problema de asociación subyace en el carácter determinista y reduccionista del concepto de índice de sitio y/o en la búsqueda de relaciones causa-efecto? (Romero, D. L. 2002).

Ipar (2000) señala “de algún modo, se cumpliría cierta aspiración tradicional no sólo de la ciencia sino también de la filosofía, a saber, poder reducir el conjunto del conocimiento a partir de un único principio o, al menos, de un corto número de ellos”. (Ipar 2000).

Los resultados de esta investigación indican que el índice de sitio que relaciona las variables altura de dominantes y edad no está claramente asociado con las variables de calidad de sitio, esto significaría entonces que el índice de sitio se sitúa en el reduccionismo estricto (Romero, D. L. 2002).

Lo opuesto sería que cada saber o disciplina produzca toda la batería conceptual que crea necesaria para intentar dar cuenta de sus problemas específicos (Ipar 2000); lo cual se basa en la teoría general de sistemas cuyo enunciado es que el todo es más que la suma de sus partes constituyentes.

Lo anteriormente mencionado sugiere que se deberían incluir todas las variables que definen la calidad de sitio para elaborar un modelo que explique el crecimiento de *Pachira quinata*. Aquí nos encontramos con un nuevo problema ¿cómo abordar la complejidad?. Para Roger (1999) el reduccionismo imposibilita la comprensión de la complejidad.

Morin (1998) señala que la estadística permite tratar la interacción y la interferencia pero de manera insuficiente, señala además que la estadística se hala dentro de una óptica reduccionista que ignora la realidad del sistema de donde surgen elementos a considerar, tales como la incertidumbre. El autor señala que los métodos de análisis y los enfoques estadísticos disponibles para analizar relaciones entre variables no son suficientes.

Los modelos estadísticos multivariados han sido desarrollados por muchos investigadores para relacionar los bosques con factores del sitio. Dentro de ellos el análisis de regresión múltiple tiene la ventaja de relacionar directamente el bosque con las variables ambientales y puede también dar mayores correlaciones que las regresiones con otros métodos multivariados (Romero, D. L. 2002).

García-Oliva (com pers) señala que generalmente se piensa que los análisis multivariados dirán cuales son las variables importantes para explicar la variable dependiente, pero su efecto en la varianza no es independiente (hay efecto sinérgico) y si tienen efecto sobre la varianza no tiene por fuerza que interpretarse como de causa y efecto. Por este motivo fueron descartados los análisis de correspondencia canónica y de componentes principales (Romero, D. L. 2002).

Además, es importante examinar el empleo que se le está dando al análisis estadístico para obtener relaciones causa efecto entre las variables dasométricas y las ambientales. Una buena parte de las leyes elaboradas por la ciencia se basan o intentan demostrar la existencia de una relación real causa-efecto entre acontecimientos o sucesos que ocurren en la naturaleza. Sin embargo, una correlación matemática entre dos variables no necesariamente implica una relación de causa-efecto entre ellas (Andreu 2001).

Por tal motivo, es importante analizar métodos estadísticos o matemáticos que evalúen la relación causa-efecto. Es necesario encontrar métodos que permitan encontrar asociaciones causa-efecto entre características, atributos o variables. ¿Métodos como las series de tiempos y/o el análisis Path podrían ser útiles? (Romero, D. L. 2002).

Debemos entonces recordar que el método científico implica seleccionar o diseñar aquellas experiencias concretas cuyos resultados puedan ser considerados de máxima relevancia para la hipótesis que se formula. También implica analizar y evaluar detalladamente todo tipos de resultados, tanto aquellos que confirman los objetivos o hipótesis iniciales como aquellos que parecen contradecirlos (Andreu 2001).

Modelos de simulación en plantaciones forestales

Simulación es el uso de un modelo para imitar, o describir paso a paso, el comportamiento del sistema que estamos estudiando. Los modelos de simulación están compuestos de una serie de operaciones aritméticas y lógicas que, en conjunto, representan la estructura (el estado) y el comportamiento (el cambio del estado) del sistema de interés. Los conceptos de “estado de sistema” y de “cambio de estado de sistema” son muy simples, pero a la vez muy eficaces y son fundamentales para la simulación. El sistema de interés existe en diferentes estados en distintos momentos en el tiempo y existen reglas que rigen la forma en el que el estado del sistema cambia a

medida que transcurre el tiempo. Las reglas que gobiernan el cambio, también pueden cambiar en el tiempo, ya que cada una por si misma es una función del estado del sistema. Si escogemos las variables apropiadas para describir el sistema y representamos adecuadamente las reglas que gobiernan el cambio, deberíamos poder predecir los cambios en el estado del sistema a través del tiempo, es decir, podríamos simular el comportamiento del sistema (Grant et al, 2001).

Como un aporte importante de Grant et al, 2001, el método más útil para resolver un problema determinado en un momento dado depende del nivel de detalle con el cual vamos a enfrentar el problema y del entendimiento actual del problema que tengamos a este nivel de detalle. Sin embargo la utilidad relativa de los diferentes métodos va cambiando a medida que trabajamos en el problema, es decir, a medida que aumenta nuestro conocimiento y la cantidad de datos. Imaginemos una situación en la que comenzamos con pocos datos y poco entendimiento. Como primera etapa podemos integrar el conocimiento existente a través del análisis de sistemas, y usar los modelos de simulación para formular hipótesis acerca de la forma cómo funciona el sistema. El proceso de desarrollo del modelo va a aumentar nuestro entendimiento sobre el sistema y nos ayudará a identificar áreas específicas para las cuales no existen datos. Con base a esta primera etapa, el siguiente paso corresponde a la recolección de nuevos datos y a la ejecución de los análisis estadísticos correspondientes. Dichos análisis generan nuevas hipótesis acerca de la estructura y el funcionamiento del sistema, las que podemos incorporar en nuestro modelo de simulación.

Como ejemplo de simulaciones en plantaciones forestales, Condes, S. et al (2004) presenta lo siguiente. Para simular las distribuciones diamétricas de los rodales de manera adecuada, se recurre a la “recuperación de parámetros” en la que se relacionan los percentiles de la distribución teórica con los valores promedios de las variables de la parcela: número de pies, diámetro medio cuadrático, altura dominante y edad. Pudiéndose así determinar los valores de los parámetros para unas determinadas características de la masa.

En segundo lugar se tiene en cuenta la distribución espacial de los árboles dentro del rodal, considerando que se corresponden con distribuciones uniformes a marco real, puesto que las masas proceden generalmente de repoblaciones hechas con este criterio. Es importante tener en cuenta en este punto que no es suficiente con situar los árboles en los vértices de una malla cuadrada, cuyo lado sea adecuado al número de pies por hectárea que se desee conseguir. Hay que tener en cuenta que dentro de un mismo rodal suelen aparecer zonas con distinto número de pies por hectárea.

La presencia de rasos y zonas de distinta densidad en las masas arboladas puede ser debida a actuaciones silvícolas, principalmente claras, en las que se retiran un número de pies más o menos uniforme en toda la superficie del rodal. Estas actuaciones modifican de un modo gradual la densidad del número de pies. Por otro lado aparecen zonas rasas o de marcadas diferencias de densidad como consecuencia de marras, plagas, enfermedades, vientos, incendios etc.

Una simulación realista de rodales de la superficie deseada (25 hectáreas) requeriría un estudio de la distribución espacial a meso-escala que podría realizarse a partir de fotografías aéreas o de imágenes de satélite. Puesto que no se cuenta con estudios de este tipo, se ha recurrido a una solución teórica consistente en situar, en una primera fase, el doble del número de pies que se desea conseguir. Estos árboles se colocarán, con cierta holgura, en los vértices de una malla cuadrada superpuesta sobre el rodal.

En una segunda fase se eliminan tantos árboles como se desee, de manera que las zonas de marras, mortalidad, etc., queden distribuidas en el rodal con diferentes grados de agregación. Con idea de minimizar dentro de lo posible la influencia de las características espaciales de la masa simulada en los resultados del estudio, se ha optado por simular 8 rodales cuya distribución diamétrica es similar y con diferente distribución espacial, si bien se mantiene aproximadamente igual el número de pies por hectárea (Condes, S. et al. 2004).

También se han diseñado software especializados para simulaciones de crecimiento y producción forestal (como muestra Rojo, A. 2005). En este trabajo se presenta el simulador informático de crecimiento y producción de masas forestales GesMO (Gestión por Modelos), concebido como una herramienta de sencillo manejo para ser utilizada por gestores y propietarios forestales como apoyo a la toma de decisiones en la gestión forestal.

Con GesMO es posible simular el desarrollo de una masa forestal sometida a diferentes opciones de tratamientos, así como estimar y valorar económicamente la producción de la masa según los diferentes destinos industriales de la madera. También es posible aplicar esquemas selvícolas preestablecidos o "a la carta", a partir de la definición de las restricciones que se deben cumplir para llevar a cabo una clara o la corta final. Actualmente GesMO incluye dos modelos de crecimiento, realizados para las repoblaciones de *Pinus radiata* D. Don y *Pinus sylvestris* L. de Galicia, pero el programa se ha diseñado para poder implementar diferentes modelos de crecimiento que se vayan elaborando para distintas especies forestales.

La simulación geoestadística estocástica se combina siempre con el método de Monte Carlo³ para cuantificar la incertidumbre en el modelo espacial de las simulaciones. Sin embargo, debido al gran interés en los últimos años de la espacialización del bosque se debe modelar como resultado de su complejidad, lo que es siempre inviable para generar centenares o millares de simulaciones del método de Monte Carlo. Así, es la gran importancia para generar un conjunto relativamente pequeño de realizaciones condicionales que capturan la mayoría de la variabilidad espacial. En este estudio, nosotros introdujimos un efectivo método de muestreo (muestreo hipercubico Latino) en un algoritmo estocástico de simulación (LU simulación de descomposición). El muestreo hipercubico Latino es primero comparado con un procedimiento de muestreo común (muestreo simple al azar) en LU de descomposición de la simulación. Entonces se aplica a la investigación de incertidumbre en los resultados de simulación de un modelo espacial explícito de bosque, LANDIS. Los resultados mostraron que el muestreo hipercubico Latino puede capturar más variabilidad en el muestreo espacial que el muestreo simple al azar, especialmente cuando el número de simulaciones es pequeño. Los resultados de aplicación mostraron que LANDIS de simulación resulta a nivel de paisaje (porcentaje de especies por área y su modelo espacial medido por un índice de agregación) no es sensible a la incertidumbre en especies con información vieja de grupo a nivel de parcela producido por algoritmos geoestadísticos estocásticos de simulación. Esto sugiere ese LANDIS puede usarse para predecir el cambio del paisaje de bosque a escalas espaciales y temporales aún cuando la información de las especies exhaustivamente vieja del grupo para cada parcela, no esté disponible (Chonggang, X. et al. 2004).

³ El método Monte Carlo se refiere a la predicción y a la simulación

Modelos de variabilidad espacial de plantaciones y aspectos biofísicos

La información de campo de suelo es un componente importante de recurso terrestre de la evaluación del bosque. Los problemas conceptuales y operacionales provienen desde emplear los métodos convencionales de encuesta en el bosque, específicamente: los métodos implícitos de interpretación de paisaje (carencia de los procedimientos explícitos), traslado de datos por la analogía atípica de los paisajes por inferencias que presentan la escala y la dependencia del intérprete, la variabilidad de juicio intuitivo del agrimensor, y la pobre expresión de variación de suelo dentro de las unidades de mapa (Thwaites, N. R., Brian, S. K. 2000).

El suelo relativo que se traza en la evaluación del bosque por adoptar una multiescala y el paisaje explícito que modela con su enfoque. Los aspectos conceptuales del método presentaron aquí fin, para predecir las gamas en la variación de atributos edáficos y geomorfológicos que son pertinentes a la gestión de plantación de bosque. La intención está en predecir la variación en las unidades de geomorfología y suelos y sus atributos, con los modelos pertinentes a la planificación y gestión de bosques de plantación.

Se presentan aportes para las discusiones sobre la utilización de la lógica difusa en los estudios de suelos de complejas variaciones geomorfológicas y edáficas más estrechamente. Nosotros creemos que el procedimiento planteado aquí va a adicionar hacia la meta definitiva de una dinámica, basado en el proceso y evaluación multiescala sobre el recurso terrestre con modelamiento y teorías en el estudio de sistemas naturales del suelo (Thwaites, N. R., Brian, S. K. 2000).

Se muestran a continuación diferentes casos en donde se analizó la variabilidad espacial en zonas forestales.

La evaluación cuantitativa de factores claves de variabilidad de suelo junto con el modelo espacial de variables subyacentes son los pasos importantes para comprender el funcionamiento de los diferentes paisajes del suelo. Quince variables físicas y químicas que describen 24 tipos de suelo (Tchienkoua M., Zech, W. 2003).

Para entender la diferenciación de los procesos de suelo en un ambiente de bosque húmedo en Sur Camerún se usaron en el paisaje y las posiciones delineadas con base a sensores remotos, incluyeron: cumbres convexas planas (FCS), valle lineal inclinado (LVS), valles interiores coluviales (CIV), y plano inundable aluvial. La ordenación por el análisis principal de componente (PCA) resultado de tres factores de un modelo, que eficientemente resumió los datos explicando 81.4% de varianza total de suelo (TSV). La genética del suelo, con el factor de ferralitización surgido como el factor principal muestra el 43.7% de TSV. Los procesos subyacentes identificados incluyeron, basicidad, acidificación y capacidad de intercambio catiónico CIC. Las propiedades de intercambio y fósforo disponible eran el segundo y tercero en la mayoría de los factores importantes, asociaron con 26.7 y 11.4% de TSV respectivamente. La materia orgánica y relacionados los procesos biológicos tuvieron fuerte control sobre la disponibilidad de CIC. Mientras el fósforo disponible del suelo (AP) mostró una dependencia fuerte de la acidez potencial y materia orgánica y a la condición de mineralización. El análisis de varianza destacó diferencias importantes para la mayoría de las propiedades de suelo a través de la localización del paisaje y profundidad de suelo a excepción de la materia orgánica (OC), nitrógeno total (TN), y fósforo total (Tchienkoua M., Zech, W. 2003).

Lo anterior muestra como el suelo presenta una variabilidad de acuerdo a sus propiedades físicas y químicas del mismo, permitiendo a futuro comparar con la producción forestal.

A continuación se muestran otros casos donde se analiza la variabilidad espacial en zonas forestales de diferentes objetivos, metodologías y sitios.

Según Daniel, E. et al. 2004. Nuestros objetivos estaban para cuantificar la respiración de suelo en una plantación de 3 años de Eucalipto en el Congo costero y para investigar las variaciones temporales y espaciales de este componente importante, la respiración del ecosistema. La respiración de suelo expuso fuertes variaciones estacionales que claramente reflejan los contenidos de agua de suelo, con valores mínimos más adelante $1.6 \text{ mmol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ al final de la temporada seca en Septiembre y un valor máximo de $5.6 \text{ mmol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ después de la nueva lluvia en el mes de Diciembre. Un modelo empírico puede describir la relación entre el suelo, el contenido de agua de suelo y la respiración que predice las variaciones estacionales en la respiración de suelo es razonablemente bueno ($R^2 = 0.88$), aún cuando los efectos de suelo el contenido de agua de suelo y la temperatura pueden confundirse desde ambos factores y covariar a través del tiempo.

La heterogeneidad espacial de la respiración de suelo era afectada claramente por las prácticas de gestión, entre más alta la respiración clasifica en la reducción de filas intermedias que recibió cantidades más altas de detrito a la etapa a registrar, y rebajó la respiración, clasificada en el transporte de filas intermedias se usaron para el tránsito pesado de vehículo. Los valores más altos de la respiración de suelo se registraron también en la vecindad de troncos que en medio de las filas intermedias. Mientras el contenido de agua de suelo es la principal determinante de variación estacional de la respiración de suelo, presenta pobremente su variabilidad espacial sobre la posición experimental, a excepción de días con bajo contenido de agua de suelo. La respiración del suelo no se relacionó para capturar biomasa ni para el evaluar el contenido de carbón en el suelo, pero se correlacionó positivamente con ambos hoja y el total sobre el terreno desordenar (es decir hoja, ramillas y corteza de madera). Los lotes que exponen la respiración más alta de suelo también tuvieron gran cantidad de hojarasca sobre el terreno. La respiración microbica asociada con la descomposición de la hojarasca es probable que sea un componente importante de suelo (Daniel, E. et al. 2004).

Indica Mörtberg, U. Karlström, A. 2005. Espacialmente se muestra, la multiescala de modelos para pronósticos de especies de distribución potencial y poder ser herramientas útiles para consideraciones integrantes de diversidad biológica en planificar y ser estratégica la evaluación ambiental. En tales modelos, las ocurrencias de especies focales son las variables relativas al paisaje y al hábitat, que en áreas urbanizadas deben también incluir efectos de perturbaciones urbanas. Además, la exactitud de la predicción espacial de los modelos pueden ser afectados por autocorrelaciones espaciales, que significa que una parte de la varianza es explicada por colindar valores. El fin de este estudio estuvo para explorar los efectos del hábitat y la perturbación presente sobre la distribución de dos guacos de bosque las especies, *Tetrao urogallus* y *Bonasa bonasia*, y para detectar y modelar los efectos de autocorrelación espacial. La distribución de las dos de especies podría explicarse en los términos de reducción de un predador principal, la calidad del hábitat, la cantidad y la conectividad, incluyendo perturbaciones urbanas.

Los residuos de las regresiones iniciales mostraron positiva la autocorrelación espacial que pueda ser cuantificado por usar un modelo probit espacial. La aplicación del modelo

probit espacial da a conocer fuertemente la importante dependencia espacial de ambas especies. Además, el ajuste de modelo podría aumentarse para *T. urogallus* por aplicar este modelo. Los resultados implicaron que ambas distribuciones de la especie puedan ser afectadas por ambas reacciones a la tierra subyacente usando el modelo, pero también por la interacción con vecinos. El uso del modelo probit espacial es una manera a incorporar interacciones espaciales que de otra manera no pueden ser capturadas por las variables independientes (Mörtberg, U. Karlström, A. 2005).

Presenta Heping, Z. et al. 2002. Donde describe una evaluación del Lachlan Catchment, en el suroriente de Australia, emprendido para desarrollar y aplicar los métodos para la planificación de Catchment. El GROWEST y Proceso Fisiológico para Predecir Crecimiento (3-PG), modelos que se usaron para modelar la distribución espacial de productividad primaria para plantaciones templadas de bosque y pasturas, respectivamente. Para ambos modelos, la estimación espacial de crecimiento se obtuvo usando las superficies climáticas mensuales a largo plazo con una resolución de 0.01 de latitud y la longitud. Sin embargo, dos enfoques diferentes se usaron para modelar temporalmente los cambios en la productividad y para investigar los efectos de la variabilidad del clima sobre la confiabilidad de producción a través del tiempo. El clima mensual emerge para el período desde 1950 a 1999 con una resolución de 0.25. Se usaron para simular el crecimiento para pasturas templadas que usan GROWEST.

El crecimiento del árbol en plantaciones era simulado usando 3-PG con 50 años de datos mensuales de clima en 14 estaciones climáticas (sitios) dentro del Catchment. La estimación de producción se usó entonces para examinar la confiabilidad de producción para ambos sistemas y determinar las áreas dentro del Catchment que son la mayoría seleccionadas a la producción perenne de pastura y esas áreas más favorecidas a plantaciones de bosque para la producción de madera. Hay similitudes en la estimación espacial y temporal producida desde los diferentes modelos, pero la producción de las pasturas templada es limitada más por las bajas temperaturas. Mientras la mayoría de la Catchment es capaz de crecer con pastura, sólo una pequeña área es capaz de producir la alta tasa de crecimiento que se requiere para las plantaciones comerciales de madera. Las plantaciones de bosque son también comparativamente más confiables que las pasturas templadas en las áreas más productivas del Catchment. El estudio concluye que los métodos para estimaciones espaciales y temporales de crecimiento vienen aumentando al caso para integrarlos a la planificación del Catchment (Heping, Z. et al. 2002).

Comenta Prasolova, N.V. et al. 1999. La variabilidad espacial de humedad de suelo, nitrógeno (N) índice de disponibilidad (N total, $\text{NO}_3\text{-N}$, $\text{NH}_4\text{-N}$, potencialidad mineralizable N (PMN)), y otras propiedades químicas (el C orgánico (OC), P disponible, pH, CEC, K cambiante, Ca, Mg, Mn, Na) era investigado en dos de lotes (1.36 ha. cada uno) de ocho años de edad (*Araucaria cunninghamii* Ait. EL D. ex Don) la progenie prueba ubicado en el sur - oriental Queensland, Australia, para temporadas secas y húmedas. Seguir un modelo anidado de muestreo, muestreos de suelo de 0-10 cm la profundidad estratificado a tres escalas diferentes de muestreo (378, 42 y 2.6 m²) se tomaron. El modelo jerárquico de análisis de la varianza se usó para analizar la estructura espacial de estas propiedades de suelo. Los objetivos de este estudio estaban en: (1) evaluar la variabilidad espacial y temporal de las propiedades de suelo en los dos de lotes, y (2) desarrollar una estrategia efectiva de muestreo para la prueba similar por tramo.

A la temporada húmeda en el estudio tramo 1, se mostró que para el suelo N total, CEC, pH, Ca cambiante, Mg, y Na había significado diferencias entre medios de 42 m² lotes

dentro de 378 m² lotes y entre los de 378 m² lotes dentro de el 1.36 ha del tramo. Para P disponible, PMN, N mineral, OC, y Mn cambiante diferencias únicas entre medios de 42 m² lotes dentro de 378 m² los lotes eran significantes. Para la humedad de suelo, N₄-N y K cambiante había significativas diferencias entre los medios de 378 m² lotes dentro del 1.36 ha del lote. Para todas estas propiedades ningún había significado diferencias entre medios de 2.6 m² lotes dentro de 42 m² lotes, principalmente debido a la variación considerable (30-70% de varianza total) de las propiedades de suelo dentro de 42 m² de tramo. Ninguna estructura espacial se encontró para el suelo NO₃-N. Para la temporada seca en el estudio tramo 1, los modelos de la variabilidad espacial única para el suelo N total, N mineral y P disponible permaneció al igual que para los de la temporada húmeda. Para el estudio tramo 2 a la temporada húmeda, los modelos de variabilidad espacial para las tales propiedades de suelo eran menos pronunciadas. La estrategia de muestreo para la evaluación la potencialidad de productividad del árbol de los lotes y para controlar las propiedades de suelo era altamente dependiente del conjunto de las propiedades elegidas, y sobre qué cambios esperados en medios de propiedades de suelo desde la fecha. La investigación discute en relación a los puntos en lo que concierne a la evaluación de desempeño de crecimiento de árbol en plantaciones de bosque (Prasolova, N.V. et al. 1999).

CONCLUSIONES

- Para las necesidades de predicción del autor de la producción de madera en plantaciones forestales, el método más acorde es la variabilidad espacial de las condiciones biofísicas y de crecimiento de la plantación, con respecto al índice de sitio o a la simulación sin componente espacial.
- Aún dentro de la misma zona ecológica (16.000 ha)⁴ se registra un crecimiento diferencial de Ceiba roja *Pachira quinata*, el cual se manifiesta en la presencia de grupos de parcelas con crecimientos similares (pendientes similares) para cada variable de crecimiento estudiada. Esto indica la existencia de sitios forestales diferentes.
- A la escala de resolución a la que se efectuó el análisis, no se encontró una relación clara entre la precipitación y la distribución de las parcelas permanentes de crecimiento de Ceiba roja con índices de sitio diferentes. Por lo cual, estas dos variables no parecen tener efecto sobre el crecimiento de la especie.
- Los factores o variables edáficas estudiadas basados en estudios de suelos IGAC escala 1:100.000 no permiten explicar el crecimiento diferencial de la Ceiba roja en la escala espacio-temporal que permita establecer la variabilidad espacial.
- Se debe establecer un método acorde con las condiciones del sitio e información del estudio (tema de tesis), para la determinación de la variabilidad espacial, puesto que la revisión de la literatura muestra metodologías para diferentes casos y situaciones en áreas forestales, que solo sirven como guía.

⁴ Rubiano R. D. 2009. Variabilidad espacial de las propiedades del suelo, la producción y la respuesta espectral de plantaciones industriales de Ceiba roja. UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA.

- El índice de sitio puede ser un buen estimativo de crecimiento pero no tiene una relación clara con las variables de calidad de sitio. Por lo tanto, posiblemente evaluar el índice de sitio no sea la aproximación metodológica apropiada para estudiar tal relación (Romero, D. L. 2002).
- El índice de sitio obtenido en este trabajo está acorde con lo esperado para la especie en plantaciones de bosque seco tropical (Romero, D. L. 2002).
- El análisis de regresión señala que las variables edáficas a las que hay que prestarles mayor atención en un plan de manejo de Ceiba Roja son: sodio (Na), fósforo (P), potasio (K), nitrógeno (N), materia orgánica (MO). De igual forma, se debe tener en cuenta al aluminio ya que su ausencia parece tener un efecto en la disminución del índice de la especie (Romero, D. L. 2002).

BIBLIOGRAFÍA

- ANDREU, M.J. 2001. Empirismo, 2 Método científico, 1. En: <http://www.ciencias.uma.es/publicaciones/encuentros/ENCUENTROS1/empirismo.html>
- ALDER, D.1980. Estimación del volumen forestal y predicción del rendimiento, con referencia especial a los trópicos. Vol 2: predicción del rendimiento. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. Estudio FAO: Montes. Roma. 118 pp.
- CARMEAN, W.H. & D.J. LENTHALL.1989. Height growth and site index curve for jack pine in north central Ontario. *Can. J. For. Res.*, 19: 215-224.
- CHONGGANG X., HONG S. H., YUANMAN, H., YU, C., XIUZHEN, L., RENCANG B. 2004. Latin hypercube sampling and geostatistical modeling of spatial uncertainty in a spatially explicit forest landscape model simulation. *Ecological Modelling* 185 (2005) 255–269.
- CLUTTER, J.L., J.C., FORTSON, I.V. PIENAAR, G.H. BRISTER, & R.L. BAILEY. 1983. *Timber Management: a quantitative approach*. Wiley, New York. Chichester. Brisbane. Toronto. Singapore. P, 33. En: ELFVING, B. y A. KIVISTE. 1997. Construction of site index equations for *Pinus sylvestris* L. using permanent plot data in Sweden. *Forest Ecology and Management* 98: 125-134.
- CONDES, S. & MARTINEZ, M. J. 2004. Comparación de inventarios mediante la simulación de muestreos sobre repoblaciones de *P. Silvestris* en la Sierra de Guadarrama. Ciudad Universitaria. Madrid.
- DANIEL, E. et al. 2004. Spatial and temporal variations of soil respiration in a Eucalyptus plantation in Congo. *Forest Ecology and Management* 202 (2004) 149–160.
- DANIEL, T.W.; J. A. HELMS y F.S. BACKER. 1982. *Principios de silvicultural*. McGraw Hill. México. 492p.
- ELFVING, B. y A. KIVISTE. 1997. Construction of site index equations for *Pinus sylvestris* L. using permanent plot data in Sweden. *Forest Ecology and Management* 98: 125-134.
- FERNÁNDEZ, R.A. & N. PAHR. 1988. Relaciones entre el crecimiento de *Pinus elliottii* y tipos de suelo para la provincia de Misiones. Primera aproximación. *Yvyrareta*, s.f. 121-125.
- GRANT, W. et al. 2001. *Ecología y Manejo de Recursos Naturales: Análisis de Sistemas y Simulación*. Editorial Agroamericana – IICA. Costa Rica.
- Heping, Z. et al. 2002. Spatial and temporal modelling of pasture and plantation production for integrated catchment planning in south-eastern Australia. *Ecological Modelling* 166 (2003) 75–86.
- HUANG, S. & S.J. TITUS. 1993. An index of site productivity for uneven-aged or mixed-species stands. *Can. J. For. Res.*, 23: 558-562.
- IPAR, J.J. 2000. El problema del reduccionismo. *Alcmeón*. Año XI, 9(1).

MONSERUD, R.A. 1984. Height growth and site index curves for inland Douglas-fir based on stem analysis and forest habitat type. For. Sci. 38: 415-420.

MÖRTBERG, U. KARLSTRÖM, A. 2005. Predicting forest grouse distribution taking account of spatial autocorrelation. Journal for Nature Conservation.

PRASOLOVA, N.V. et al. 1999. Spatial temporal variability of soil moisture, nitrogen availability indices and other chemical properties in hoop pine (*Araucaria cunninghamii*) plantations of subtropical Australia. Forest Ecology and Management 136 (2000) 1±10

PROCTOR, J. 1992. Soils and mineral nutrients: what do we know, and what we need to know, for wise rain forest management? In: Miller, F.R. y Adam K.L. (Eds). Wise management of tropical forests. Pp. 27-35. Oxford Forestry Institute. Univ of Oxford. Oxford.

ROJO, A. et al. 2005. El simulador de crecimiento y producción de masas forestales GesMO (Gestión por Modelos). Una herramienta de apoyo para la toma de decisiones en la gestión forestal. Universidad de León. España.

ROJO, M. G. et al. 2005. Modelos de índice de sitio para hevea brasiliensis müll. arg. del clon IAN-710 en el norte de Chiapas. Ra Ximhai Revista Sociedad, Cultura y Desarrollo Sostenible. Universidad Autónoma Indígena de México.

ROGER, E. 1999. Uma antropologia complexa para o siglo XXI. O pensar complexo. Edgar Morin e a crise da modernidade. Garamond. Brasil.

ROMERO, D.L. 2002. La calidad de sitio y el crecimiento de *Pachira quinata* (jacq.) w.s. a Iverson. (1994) (malvales: bombacaceae) en la formación bosque seco tropical (costa norte colombiana). Universidad Nacional de Colombia.

TCHIENKOUA M., ZECH, W. 2003. Statistical analysis of soil variability in a humid forest landscape of Central Cameroon. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation 5 (2004) 69–79

TESHOME, T. y J.A. PETTY. 2000. Site index for *Cupressus lusitanica* stands in Munessa forest, Ethiopia. For. Ecol. Man. 126: 339-347.

THWAITES, N. R., BRIAN, S. K. 2000. Soil landscape resource assessment for plantations – a conceptual framework towards an explicit multi-scale approach. Forest Ecology and Management 138 (2000) 123-138.

VANCLAY, J.K. & N.B. HENRY. 1988. Assessing site productivity of indigenous cypress pine forest in southern Queensland. Commonw. For. Rev, 67: 53-64.

WANG, G.G. 1998. ¿Is height of dominant trees at a reference diameter an adequate measure of site quality? For. Ecol. Man. 112: 49-54.

WYKOFF, W.R. 1990. A basal area increment model for individual conifers in Rocky Mountains. For. Sci. 37: 1526-1537.

ZIEDE, B. 1993. Analisis of growth ecuations. For. Sci. 39(3):594-616.

ANEXO 2

DESCRIPCION DE LOS PRINCIPALES ASOCIACIONES DE SUELOS DONDE ESTA PLANTADA LA CEIBA ROJA

ASOCIACIÓN LA CAÑA (CE)

Son suelos aluviales de terrazas bajas del Río Magdalena. No inundables por el Magdalena, arcillosos de topografía plana a ligeramente inclinada hacia el río, de pendiente 0 – 3%. Tiene algunas quebradas que la atraviesan de Occidente a Oriente; son frecuentemente inundadas por éstas en épocas de lluvia. En general son suelos de colores oscuros; tiene altos porcentajes de arcillas; se observan concreciones de Fe y Mn y yesos en sus horizontes profundos. En ocasiones tiene moteados superficiales, principalmente en las concavidades del paisaje; a veces se observan también moteados en la profundidad, probablemente litocrómicos. No hay nivel freático alto.

Limita abruptamente con orillares y con el Río Magdalena, lo mismo que con las asociaciones La Magdalena y La Merced. Es una amplia zona que se extiende de Sur a Norte, interrumpida ocasionalmente con otras asociaciones que bordean el río. Por la expansión y contracción de las arcillas, las raíces sufren su destrucción; los postes de cercas o de alumbrado eléctrico o los mismos árboles se inclinan por la misma razón.

En el área generalmente se siembra algodón, tabaco, maíz, patilla, melón, pero en general está dedicada a ganadería extensiva; gran parte del parea permanece en rastrojo en donde se entremezcla el ganado. Por la índole de la arcilla, tienen alta capacidad catiónica de cambio; son fértiles, pero la dificultad estriba en el uso de la maquinaria en épocas extremas de sequía o de lluvia. Por ser una zona de régimen ústico, se ha hecho necesario construir pozos de recolección de agua para el ganado e inclusive para el uso humano. Pertenecen a la clase agrológica III con limitaciones por humedad y suelos.

Entre los macroelementos recomendables está el nitrógeno, porque estos suelos aunque de color negro, este no se debe a la materia orgánica, sino a la polimerización de los ácidos húmicos (Andreaux 1973).

La vegetación dominante es el cactus (Opuntia Wentiana), Pringamoza (Gnidosculus urens), trupillo (Prosopis juliflora) y guásimo (quazuma ulmifolia).

La asociación está compuesta de dos conjuntos:

Conjunto La Caña, Chromustert Udico:

Se localiza en las partes ligeramente convexas del paisaje, dominante en extensión sobre el otro. Se caracteriza por tener un epipedón de un grosor de 30 cm, color pardo grisáceo muy oscuros. Presenta un horizonte Bu1 De color gris oscuro y Bu2 de color pardo a pardo oscuro con manchas de color pardo amarillento, comunes, finas en tamaño y nitidez tenue.

El perfil es arcilloso en su totalidad, donde la compactación es un factor limitante de la profundidad efectiva del suelo. La estructura es en bloques angulares, excepto en el segundo que se presenta prismática. Los “slikensides” ocurren a partir del segundo horizonte, siendo de tamaño grande y numeroso, las grietas en el suelo llegan hasta el horizonte C.

Rango de variación del Conjunto:

El horizonte A puede tener un espesor de 15 a 30 cm; el color varía de gris muy oscuro a gris oscuro, hay además moteados en algunos perfiles, la textura puede ser arcillosa o franco arcillosa.

Conjunto La Partilla, Ustropept Vértico

Localizado generalmente cerca de los orillares y bajos; son suelos arcillosos.

El primer horizonte es de 18 cm; color gris oscuro, con estructura en bloques subangulares, cuyo tamaño varía de medios a finos y grado de desarrollo débil; la porosidad es abundante siendo de tamaño medio y fino y de forma tubular; la actividad biológica y presencia de raicillas son abundantes en este horizonte.

En el segundo horizonte hay dos colores: gris oscuro y pardo amarillento oscuro con presencia de manchas de color pardo rojizas.

LA estructura es mejor desarrollada que la del horizonte anterior, pero disminuye la porosidad y la presencia tanto de macroorganismos como de raicillas.

El horizonte C es de color pardo a pardo oscuro y con revestimientos de color pardo grisáceo oscuro; hay polvos blancos de yeso en los canalículos dejados por las raicillas. Como características especiales de este horizonte, está la presencia de grietas y "slikensides" que sitúan el conjunto en intergrado vértico. En este horizonte se presenta salinidad ligera, en la profundidad.

Esto implica que no afecta a la mayoría de los cultivos.

ASOCIACIÓN EL EDEN (ED)

Es un área de diferentes sistemas de drenaje y de relieve con pendientes dominantes 12 – 25%.

El área se extiende de Oriente a Occidente donde se encuentra encajonada entre colinas de paisaje miocénico y Pliocénico, con los cuales limita abruptamente; además tiene límites difusos con la asociación La Caña y Santa Isabel.

Se observa dominancia de vertisoles o de integrados vérticos en la zona encajonada por áreas de paisaje Pliocénico y de molisoles en áreas con influencia del Mioceno.

Es la zona de mayor uso agrícola y ganadero. Existen latifundios con ganadería extensiva y también cultivos comerciales de maíz, algodón, tabaco, sorgo y pastos admirables, pangola, yaraguá, etc. el Incora ha construido para las épocas de sequía un embalse para recolección de agua, pero sin uso ni beneficio, por la falta de alimentación porque en verano las quebradas que la abastecen se secan igualmente.

En bajo porcentaje el área recubierta de vegetación arbustiva espinosa como el trupillo (prosopis juliflora), el cactus (Opuntia wentiana), la zarza, etc; en donde el ganado se entremezcla con ellas.

La asociación consiste en seis conjuntos así:

Conjunto El Edén, Chromustert típico:

Suelos con todas las propiedades de un vertisol; en algunos perfiles se observan moteados en el horizonte superficial, ocasionados probablemente por el agua de lluvia.

Se caracteriza por tener el primer horizonte Ap disturbado por acción del arado y de una profundidad de 23 cm, cuyos colores son pardo grisáceo oscuro y pardo grisáceo muy oscuro.

Tiene estructura en bloques subangulares, de tamaño medio y fino y grado de desarrollo moderado; en estado húmedo es friable, facilitando el laboreo. El segundo horizonte es similar al anterior pero no se encuentra disturbado.

Se presenta un Bu1 y un Bu2; el primero es de color pardo oscuros, con estructura prismática y con una subestructura en bloques subangulares, medios y finos, con grado de desarrollo moderado; el Bu2 es similar a este pero difiere en que no es de estructura prismática.

Otra característica de este suelo es la presencia de un horizonte de transición BC que descansa sobre un C, donde existe una discontinuidad litológica, por cambio brusco en textura, color y carbón orgánico.

Hay "slikensides" a partir del segundo horizonte, ya que el primero ha sido destruido por el arado; del tercero en adelante son muy abundantes y notorios. Otra característica vértica de estos suelos es la presencia de grietas que se encuentran hasta una profundidad de 70 cm con una amplitud de más de 1 cm.

Rango de variación del conjunto:

El horizonte A puede ser de 33 a 55 cm de espesor; el color varía entre pardo grisáceo muy oscuro a pardo a pardo oscuro. En las grietas del perfil se pueden encontrar acumulaciones de materia orgánica, provenientes de los horizontes superiores, o, carecer de ellas.

La estructura se presenta en bloques subangulares, de tamaño grueso a fino y grado de desarrollo moderado a débil; también se puede encontrar horizontes con estructura prismática y masiva; esta última es común en los horizontes inferiores.

Conjunto Jesús de Monte, Ustropept Fluvéntico:

Se localiza en las cercanías de las quebradas Alférez y Caño Negro.

Pertenece este conjunto a suelos de origen aluvial que no sufren inundaciones periódicas pero son algo encharcables en época de lluvia. El primer horizonte es un Ah1 de color pardo a pardo oscuro, con textura arcillosa; la estructura es en bloques subangulares, medios y débiles; abunda una subestructura de bloques finos con grado de desarrollo moderado.

El Ah2 es similar al anterior pero de color pardo grisáceo oscuro, con moteados débiles, causados por la humedad.

El B cámbico es de color pardo amarillento pero a partir de este se encuentran acumulaciones de materiales oscuros, provenientes de los horizontes superiores, posiblemente su translocación se produce a través de las grietas al abrirse en épocas de verano.

Después del cuarto horizonte hay discontinuidad litológica de textura franco arenosa, sin estructura; se presentan los gránulos separados dando origen a lo que se llama grano simple, el último horizonte 3C es otra discontinuidad litológica, pero de color similar al anterior.

Rango de variación del Conjunto

El horizonte A se presenta con un grosor que fluctúa entre 33 y 60 cm; los colores son de pardo grisáceo muy oscuro a pardo amarillento; existen moteados en todo el perfil o en parte de él.

La estructura es en bloques subangulares, muy finos a gruesos, moderados; la parte inferior del perfil puede ser masiva.

Conjunto Admirable, Tropaquoll Vértico:

Se observan moteados superficiales y en la profundidad e iniciación de gleyzación; permanece cubierta de agua; la superficie es con microrelieve ondulado a manera de surales. La zona está ocupada principalmente por pasto admirable. La descomposición de la materia orgánica al iniciarse el verano produce mal olor (H₂S).

Son suelos aluviales caracterizados por sufrir inundaciones periódicas en épocas de lluvias; por la textura arcillosa se dificulta la evacuación de las aguas.

El primer horizonte Ah1 es de 40 cm; color gris muy oscuro con abundancia de manchas de nitidez clara, rojo amarillentas y escasas, pardo oliva claras, características de suelos con problemas de hidromorfismo.

La estructura se presenta en forma de bloques subangulares, gruesos y medios, con grado de desarrollo moderado. El segundo horizonte es de color pardo amarillento, con manchas grises y rojo amarillentas, siendo más abundantes los primeros.

La consistencia en húmedo es firme en el primer horizonte y en los demás friables, en mojado todos los horizontes son de consistencia pegajosa y ligeramente plástica.

Suelos ricos en carbonatos que dan reacción fuerte al HCL a partir del segundo horizonte.

Rango de variación del conjunto:

El horizonte A se puede presentar con un espesor comprendido entre 40 y 70 cm; color gris muy oscuro a pardo oliva. El perfil tiene texturas finas, arcillosas a franco arcillosas; la estructura en bloques subangulares, gruesos y medios y con un grado de desarrollo moderado a débil; en los horizontes inferiores es masiva.

Conjunto Las Delicias, Chromustert éntico:

Suelos de colores claros: textura fina (arcilla) y con otras características vérticas.

Son de origen aluvial, caracterizados por tener un horizonte Ap de color pardo amarillento, con manchas pardo a pardo oscuras, la estructura es débilmente desarrollada, compuesta por bloques subangulares, gruesos; la subestructura es de bloques subangulares, medios y finos, con un grado de desarrollo moderado.

El segundo horizonte (AC) de color pardo amarillento con manchas grises.

El tercer horizonte es similar en color al anterior pero hay aumento de las manchas grises y se presentan algunos de los suelos con color pardo a pardo oscuro; la estructura es en bloques subangulares a masiva.

La arcilla de los suelos del conjunto es de tipo montmorillonita (2:1), que se caracteriza porque en época de invierno se expande y en verano se contrae, dando como consecuencia la formación de grietas hasta una profundidad de 80 cm y de amplitud mayor de 1 cm.

Los "slikensides" en el primer horizonte no son notorios, pero a partir del segundo son más claros y en el tercero, son muy nítidos y grandes, también se observa estructura en cuñas.

Los carbonatos se encuentran en el último horizonte dando una reacción ligera con HCL.

Conjunto Bajo de Las Flores, Calciustoll Vértico:

Suelos de textura fina sobre mediana, aireados y con buena presencia de macroorganismos, especialmente en los horizontes cálcicos y epipedón mólico.

El conjunto pertenece a los suelos aluviales que tiene en el primer horizonte un epipedón mólico color pardo oscuro de 26 cm, de espesor; este horizonte ha sido disturbado por acción del arado.

La estructura es en bloques subangulares, de tamaño grueso, con grado de desarrollo estructural débil; existe una subestructura de bloques subangulares, finos y muy finos, moderados. La textura es arcillosa, la consistencia en mojado pegajosa y plástica; en húmedo friable. Los poros son abundantes, finos y tubulares; se observa buena actividad biológica con abundancia de macroorganismos y raicillas.

El segundo horizonte es similar al primero pero de color pardo a pardo oscuro. A partir del tercer horizonte, la textura es franco arcillosa y franco arcillo arenosa; se observan manchas en los horizontes, especialmente en el último, y son rojizas debido a procesos de óxido reducción.

La consistencia en mojado es friable, y firme en el último horizonte únicamente.

Son suelos calcáreos con reacción fuerte al HCL en todos los horizontes, pero, a partir del segundo horizonte los carbonatos se presentan en forma de pseudomicelio (migración de carbonatos).

Rango de variación del conjunto:

El horizonte A es de 20 a 26 cm de espesor, el color varía de gris muy oscuro a pardo grisáceo oscuros. Las texturas en todo el perfil son finas. La estructura puede ser en los primeros horizontes granular y en el resto bloques subangulares, o , en todo el perfil preséntase con esta última estructura; también pueden observarse horizontes con estructura masiva; el grado de desarrollo va de débil a moderado, dominando el primero, y el tamaño es grueso y fino.

Conjunto Los Andes, Haplustoll Vértico:

Suelos de textura fina sobre mediana; tiene grietas profundas. Se observa buena actividad biológica y evidencia de sus actividades; tiene buena aireación por la buena porosidad del material.

El conjunto se caracteriza por tener el primer horizonte de color pardo grisáceo oscuro a pardo oscuro muy oscuro, en los primeros 18 cm de profundidad.

El Ap es arcilloso pero fácil de trabajar ya que en húmedo es friable, pero con mucha humedad se vuelve pegajoso y plástico, lo cual implica daño en la estructura durante el laboreo.

Se encontró además en este horizonte algo de gravilla, micelios de hongos y abundantes canaliculos hechos por las lombrices; es entonces un horizonte de gran actividad biológica.

El horizonte B es de color pardo amarillento, con manchas pardas a pardo oscuras, que se encuentran en poca cantidad. La estructura es en bloque subangulares, medios y finos, moderados a bien desarrollados.

Debajo del horizonte (Bs) se presenta una discontinuidad genética, posiblemente, un A enterrado de color pardo oscuro, el análisis de laboratorio reporta mayor cantidad de carbono en relación al horizonte inmediatamente superior. Los suelos del conjunto son de textura arcillosa y franco arcillosas.

Rango de variación del conjunto:

El horizonte A puede variar de 22 a 28 cm de espesor; el color de gris muy oscuro a pardo grisáceo muy oscuro. En el resto del perfil puede hacer moteado o carecer de ellos.

Los primeros horizontes son arcillosos y el resto varía de textura franco arcillosa a arcillo arenosa. Se encuentran horizontes con carbonatos libres.

ASOCIACIÓN EL BONGAL (BN)

Suelos bien drenados; topografía ondulada a fuertemente ondulada; la pendiente varía de 3 a 50%; de textura franco arcillosa, arcillosa y franco arcillo arenosa. La erosión se presenta de ligera a severa. Algunos perfiles son salino sódico y sódicos desde los primeros 30 cm de profundidad.

Es una amplia zona que se extiende de Sur a Norte, bordeada por la asociación La Magdalena, con la cual en ocasiones tiene límites difusos; está rodeada además, con las asociaciones El Coral, El Eden y El Salado, con las cuales limita en forma abrupta.

Son extensas áreas (latifundios) que se encuentran bajo vegetación arbustiva, que protege al suelo de la acción contra la erosión. Sin embargo los aparceros practican cultivos de subsistencia, talado de vegetación existente, acentuando la erosión. La diferencia granulométrica de los horizontes (arcillo, arena, arcilla), ha provocado erosión interna en algunas zonas. Sobre la superficie se observa gravilla (especialmente concha, fragmentos de areniscas). Se encuentran cultivos de yuca, melón, patilla y algunos frutales y ganadería extensiva que se entremezcla en la vegetación.

Por contener epipedones cercanos al mólico, son aireados, buena actividad biológica, alta porosidad ocasionada por lombrices, termitas y raíces. No se observa un O1 porque de acuerdo a la teoría, los carbonatos ayudan a la descomposición rápida de la materia orgánica; también tiene dificultades en la nitrificación y mineralización del nitrógeno disponible para las plantas (Andreaus 1973).

En esta asociación la vegetación dominante es el trupillo (Prosopis juliflora), cactus (Opuntia wentiana), pringamoza (Gnidosculus Urens) y bleo (Amaranthus sp.).

La asociación consta de cuatro conjuntos:

Conjunto el Bonqal, Ustropept típico:

Con un epipedón cercano al mólico, aireado de buena actividad microbiológica, especialmente de lombrices y evidencia de sus actividades. Se localiza en la parte más baja del paisaje con menor evidencia de disección y menor pendiente.

Son suelos arcillosos que presentan una discontinuidad litológica en el último horizonte; de textura franco arcilloso, dado en el campo, porque en el laboratorio no presenta dispersión al hacer el análisis de textura por el método de Bouyoucos.

El primer horizonte (Ah1) tiene una profundidad de 25 cm, con estructura en bloque subangulares a granulares de tamaño fino y grano débil.

El segundo horizonte es de color pardo amarillento, en las otras propiedades es similar al primer horizonte.

La consistencia en húmedo es firme hasta el tercer horizonte y friable en el último. Como características importantes de las propiedades físicas está la abundancia de poros en el perfil hasta los 92 cm. tiene carbonatos en todo el perfil y como consecuencia, el pH es alto; se observan pseudomicelios de carbonatos en los horizontes segundo y tercero (migración y acumulaciones).

En el cuarto horizonte hay yeso en polvo y en forma cristalina; posiblemente sean la causa para que los suelos no dispersen al hacer el análisis de textura en el laboratorio; este horizonte además es salino sódico.

En la superficie hay gravilla ocasionada por cochas fosilíferas.

Rango de variación del conjunto:

El horizonte A tiene espesor que puede llegar hasta 30 cm cuyo color puede variar de pardo oscuro a pardo amarillento. En el perfil se observan manchas de origen litocrómico.

La textura predominante en el perfil es la franco arcillo arenosa y franco arcillosa y en la parte inferior la franca o franco arenosa con mayor ocurrencia. La estructura es en forma de bloques angulares o subangulares, con un tamaño de medios a finos y un grado de desarrollo de débil a moderada. La estructura en el último horizonte puede ser masiva.

El pH varía de casi neutro a alcalino. Puede haber gravilla dentro del perfil como también presencia de carbón de madera en algunos perfiles.

Conjunto La Trocha, Ustropept Vértico:

Se localiza en las partes medias del paisaje, de textura fina, con arcillas no dispersables por la presencia de yeso; el último horizonte es de textura fina y compacta.

Suelos arcillosos en todo el perfil, en el laboratorio no se presentó dispersión en los tres últimos horizontes debido posiblemente a la presencia de yeso.

El color del primer horizonte (Ah) es pardo a pardo oscuro con manchas pardo amarillentas, comunes, medias y poco nítidas.

La estructura es en bloques subangulares con tendencia a granular y tamaño fino a medio, con grado de desarrollo estructural débil. Los poros se presentan escasos, forma tubular y de tamaño fino, presencia de macroorganismos y raicillas abundantes. El horizonte B se caracteriza por ser de color oliva con manchas grises y pardas amarillentas; a partir de este horizonte se encuentran los carbonatos.

El color del tercer horizonte es gris verdoso, litocrómico; a partir de este horizonte los suelos se toman salino sódicos y a medida que se profundiza aumenta la conductividad eléctrica y por lo tanto, el porcentaje de saturación de sodio.

A partir de este horizonte la estructura es masiva. Como característica especial de estos suelos está la presencia de grietas que llegan hasta el horizonte C y "slikensides" que se encuentran en el tercer horizonte.

Rango de variación del conjunto:

El horizonte A se presenta de 8 a 20 cm de grosor, el color varía de pardo grisáceo oscuro a pardo grisáceo muy oscuro y pardo amarillento. La textura varía de arcillosa a franco arcillo arenosa y en algunos perfiles el último horizonte es franco arenoso.

La estructura predominante es en bloques subangulares y angulares, de tamaño medio y fino, con un grado de desarrollo que puede ser débil a fuerte; los últimos horizontes pueden ser masivos o de grano simple.

Conjunto comunitario, Chromustert éntico:

Se ubica en las partes casi planas del paisaje (restos de antiguas terrazas de afluentes del Magdalena). Tienen alto contenido de arcillas, con casi todas las características de vertisoles.

El primer horizonte tiene 10 cm y es de color pardo grisáceo muy oscuro; la estructura es en forma de bloques subangulares a granulares, de clase fina y con grado de desarrollo débil; en húmedo el suelo se presenta friable y la porosidad abundante, presentándose de tamaño medio y fino y de forma tubular; la actividad biológica de macroorganismos es intensa y contiene raicillas de tamaño fino. Es sódico desde los primeros 10 cm de profundidad.

A partir del segundo horizonte hasta el cuarto el suelo es más duro, considerándose de consistencia firme. El tercer horizonte tiene estructura prismática de tamaño grueso y con un desarrollo fuerte.

Se observan grietas con una amplitud de 1 a 3 cm que llegan hasta la profundidad de 52 cm y "slikensides" en el segundo y tercer horizonte que se interceptan y presentan cabeza de rotación, como también un contraste brusco entre el tercer y cuarto horizonte. En el quinto y cuarto horizonte se observan carbonatos y yeso, este último en forma de cristales.

Rango de variación del conjunto:

El primer horizonte tiene un espesor de 8 a 15 cm; el color varía entre pardo grisáceo oscuro y pardo grisáceo muy oscuro; puede observarse moteados o carecer de ellos a partir del segundo horizonte. La estructura se presenta con mayor frecuencia en forma de bloques angulares y subangulares y en la profundidad es a veces masiva.

El pH varía de ligeramente ácido a alcalino en los horizontes inferiores (presencia o ausencia de carbonatos y sodio).

Conjunto de Las Hachas, Ustorthent típico:

Se localiza generalmente en las cimas de las colinas; el epipedón descansa directamente sobre material poco alterado de areniscas; en menor proporción se encuentra también en las partes más erosionadas del paisaje.

Estos suelos únicamente presentan dos horizontes un Ah1 que se caracteriza por tener un color pardo a pardo oscuros con deyecciones de lombrices y gran actividad de macroorganismos; la estructura es en bloques subangulares, medios y un grado de desarrollo moderado. El horizonte se muestra duro en estado seco y al humedecerse se vuelve firme, la textura es franco arcillo arenosa.

El segundo horizonte es un C que va de 15 a 150 cm de profundidad; de color pardo amarillento y amarillo pálido; la estructura es de saprolita o areniscas en proceso de meteorización.

Se observa mayor cantidad de porosidad en el primer horizonte, de tamaño mediano y forma tubular. Los macroorganismos son abundantes en todo el perfil, en cambio las raicillas escasas y finas se encuentran únicamente en el primer horizonte.

Hay presencia de conchas fosilíferas incrustadas en las areniscas.

Rango de variación del conjunto:

El horizonte A tiene un grosor que fluctúa entre 15 y 35 cm; el color varía de pardo grisáceo oscuros a pardo amarillento. La textura del horizonte A es de arcillosa a franco arcillo arenosa, que descansa sobre un horizonte C, donde existe textura franco arenosa o arenosa; puede además presentar gravilla, cascajo o piedra; estas últimas pueden tener incrustaciones de cochas; hay sectores con erosión severa debido a esporádicos y torrenciales aguaceros.

ANEXO 3 BARRENADAS



Figura 1: Barrenada Q1.



Figura 2: Barrenada Q2.



Figura 3: Barrenada Q3.



Figura 4: Barrenada R1.



Figura 5: Barrenada R2.



Figura 6: Barrenada R3.



Figura 7: Barrenada =C4-B.



Figura 8: Barrenada C4-C.



Figura 9: Barrenada C5-D.



Figura 10: Barrenada G5



Figura 11: Barrenada C5-DU4.



Figura 12: Barrenada D-1



Figura 13: Barrenada G5DM5.



Figura 14: Barrenada C5F



Figura 15: Barrenada DC3.



Figura 16: Barrenada C5H



Figura 17: Barrenada DA5-CS6.



Figura 18: Barrenada DA5-CS7.



Figura 19: Barrenada C5JD.



Figura 20: Barrenada C5K.



Figura 21: Barrenada C6-A.



Figura 22: Barrenada C6-B.



Figura 23: Barrenada C6-C.



Figura 24: Barrenada AL4.



Figura 25: Barrenada C6-E.



Figura 26: Barrenada G5-DM5

ANEXO 4

RESULTADOS DE LABORATORIO

LABORATORIO DE SUELOS

RESULTADOS ANALISIS DE SUELOS CARACTERIZACION UDIS – 1

INFORMACION GENERAL

Departamento: BOLIVAR
Municipio: ZAMBRANO
Predio: PIZANO S.A.
Fecha de muestra: Enero 2.006
No. De muestras: 38
Tipo de trabajo: Tesis de Maestría

Profundidad:
Cobertura: Plantaciones forestales
a.s.n.m.
Zona de vida:
Pendiente:
Tomado por: Diego Rubiano
Fecha de entrega: 11 de abril de 2.006

METODOS

Abreviatura	Nombre	Método
CH%	Humedad Gravimétrica	Anillos. Relación masa de agua – masa de sólidos
pH	Potencial de Hidrogeniones	Relación 1:1 Agua – Suelo
C.I.C.	Capacidad de Intercambio Catiónico	Extracción Acetato de Amonio
Bases	Bases intercambiables	Acetato de amonio 1 N - Absorción Atómica
C.O.%	Carbono orgánico	Método de Walckley - Black
Fósforo	Fósforo	Bray y Kurtz No. II
A.I.	Acidez Intercambiable	Titulación con Hidróxido de Sodio (para pH > 5,4)
Textura	Textura	Método del Bouyoucos
D.A.H. – D.A.S.	Densidad aparente (Húmedo – Seco)	Anillos
D.S.	Densidad Real	Picnómetro
Infiltración	Infiltración	Cilindros Concéntricos
Cond. Hidraul.	Conductividad Hidráulica	Anti - visser

CONTACTOS

MIGUEL E. CADENA R.
Jefe de Laboratorio de Suelos
Mecadena80@hotmail.com
mecadenar@udistrital.edu.co

JOSE LUIS BAQUERO B.
Asistente de Laboratorio de Suelos
Josebak5@hotmail.com

Laboratorio de suelos
Teléfono: 2 84 15 74 Bogotá (Colombia)



MUESTRA	pH	C.I.C.	BASES meq / 100 g				%SB
		meq / 100g	Ca	K	Mg	Na	
1	5,83	39,08	23,18	0,65	11,01	2,47	95,50
2	5,61	40,84	21,54	0,70	13,65	3,47	96,38
3	5,31	33,80	18,43	0,61	10,15	2,08	92,54
4	5,03	42,35	21,31	0,46	12,37	2,95	87,58
5	6,98	28,30	22,96	1,08	7,81	0,21	113,25
6	6,49	39,06	22,43	0,91	11,34	1,04	91,45
7	5,64	41,79	22,96	0,54	13,44	2,89	95,28
8	7,72	36,26	36,35	0,41	11,84	1,30	137,60
9	7,24	38,76	29,13	0,61	12,12	2,56	114,62
10	6,45	31,18	21,91	0,70	10,93	2,37	115,19
11	6,44	26,61	16,43	0,26	8,59	3,41	107,83
12	7,11	28,76	10,78	0,24	16,65	3,75	109,26
13	6,92	35,60	21,59	0,33	8,84	2,34	92,97
14	6,63	34,88	21,81	0,15	10,97	2,24	100,82
15	6,96	32,86	22,48	0,32	8,10	1,83	99,60
16	6,76	39,59	25,15	0,68	10,56	2,86	99,16
17	6,69	39,56	26,15	0,95	9,25	1,25	95,02
18	6,90	43,24	27,39	1,14	9,95	1,60	92,67
19	6,78	22,74	15,54	0,81	5,06	0,11	94,59
20	6,74	39,63	24,45	1,54	9,33	0,30	89,86
21	6,67	35,93	27,89	0,73	6,58	0,62	99,69
22	7,18	27,48	20,22	0,95	7,27	0,31	104,62
23	6,05	41,64	22,24	0,68	10,40	2,50	86,00
24	6,37	41,29	23,66	1,16	10,64	3,12	93,46
25	6,70	40,19	22,96	1,00	10,69	3,17	94,07
26	6,81	38,35	18,63	0,72	10,97	2,32	85,10
27	6,84	45,13	27,14	0,90	13,67	2,30	97,52
28	7,40	37,95	24,25	0,25	10,74	2,76	100,14
29	7,03	27,37	18,90	0,33	14,57	2,97	134,35
30	7,14	33,21	22,61	0,41	7,53	0,28	92,83
31	7,86	36,14	25,65	0,29	10,48	3,43	110,25
32	7,84	28,18	23,33	1,02	9,54	0,54	122,19
33	7,09	36,24	19,87	0,42	12,09	3,06	97,79
34	6,56	44,28	25,90	1,34	11,70	0,26	88,52
35	6,59	45,17	26,64	0,72	14,30	2,47	97,69
36	7,17	47,05	42,58	1,68	12,21	0,76	121,62
37	6,83	39,29	25,90	1,65	10,69	0,91	99,63
38	6,06	42,97	26,64	1,48	13,56	0,66	98,55



MUESTRA	C.O. %			FOSFORO
	C.O. Oxidable%	C.O. Total %	M.O. %	ppm
1	0,32	0,43	0,74	82,23
2	0,27	0,36	0,62	92,40
3	0,27	0,35	0,61	88,03
4	0,31	0,40	0,70	79,20
5	0,38	0,50	0,86	120,98
6	0,40	0,52	0,90	114,20
7	0,41	0,55	0,95	86,40
8	0,29	0,38	0,66	107,18
9	0,39	0,52	0,90	111,20
10	0,52	0,68	1,19	97,27
11	0,21	0,28	0,49	40,81
12	0,27	0,35	0,61	99,32
13	0,61	0,80	1,39	39,10
14	0,69	0,91	1,57	6,80
15	0,54	0,71	1,24	36,88
16	0,59	0,78	1,36	46,12
17	0,67	0,88	1,53	93,70
18	0,32	0,43	0,74	89,96
19	0,68	0,90	1,56	117,82
20	0,29	0,38	0,65	104,09
21	0,61	0,81	1,40	60,26
22	0,52	0,69	1,20	46,81
23	0,77	1,02	1,76	48,03
24	0,76	1,00	1,73	70,43
25	0,47	0,62	1,07	44,65
26	0,47	0,62	1,07	40,80
27	0,47	0,61	1,06	63,53
28	0,38	0,50	0,86	13,70
29	0,48	0,64	1,11	62,26
30	0,95	1,25	2,17	79,73
31	0,34	0,45	0,78	40,33
32	0,86	1,13	1,96	79,85
33	0,68	0,90	1,55	41,07
34	0,66	0,88	1,52	84,38
35	0,56	0,74	1,28	44,49
36	1,30	1,71	2,97	> 140
37	1,16	1,54	2,66	105,60
38	0,92	1,21	2,09	65,56



MUESTRA	PORCENTAJE GRANO				TEXTURA	
	% Arenas	% Limos	% Arcillas	% TOTAL		
1	17,64	17,32	65,04	100,0	ARCILLOSO	Ar
2	14,27	13,03	72,70	100,00	ARCILLOSO	Ar
3	24,27	15,37	60,36	100,00	ARCILLOSO	Ar
4	14,27	13,03	72,70	100,00	ARCILLOSO	Ar
5	32,27	22,03	45,70	100,00	ARCILLOSO	Ar
6	26,27	12,69	61,04	100,00	ARCILLOSO	Ar
7	16,27	9,03	74,70	100,00	ARCILLOSO	Ar
8	18,27	19,03	62,70	100,00	ARCILLOSO	Ar
9	12,27	17,03	70,70	100,00	ARCILLOSO	Ar
10	15,64	19,66	64,70	100,00	ARCILLOSO	Ar
11	29,64	23,32	47,04	100,00	ARCILLOSO	Ar
12	34,27	17,03	48,70	100,00	ARCILLOSO	Ar
13	24,88	20,76	54,36	100,00	ARCILLOSO	Ar
14	20,27	19,37	60,36	100,00	ARCILLOSO	Ar
15	28,00	19,64	52,36	100,00	ARCILLOSO	Ar
16	18,00	17,64	64,36	100,00	ARCILLOSO	Ar
17	18,00	21,64	60,36	100,00	ARCILLOSO	Ar
18	17,64	14,00	68,36	100,00	ARCILLOSO	Ar
19	59,30	12,34	28,36	100,00	FRANCO ARCILLO - ARENOSO	FArA
20	23,30	18,34	58,36	100,00	ARCILLOSO	Ar
21	17,30	22,34	60,36	100,00	ARCILLOSO	Ar
22	36,28	21,36	42,36	100,00	ARCILLOSO	Ar
23	22,00	11,64	66,36	100,00	ARCILLOSO	Ar
24	14,27	15,37	70,36	100,00	ARCILLOSO	Ar
25	16,27	17,37	66,36	100,00	ARCILLOSO	Ar
26	17,64	19,89	62,47	100,00	ARCILLOSO	Ar
27	13,64	17,66	68,70	100,00	ARCILLOSO	Ar
28	19,64	21,66	58,70	100,00	ARCILLOSO	Ar
29	23,64	24,64	51,72	100,00	ARCILLOSO	Ar
30	27,64	30,64	41,72	100,00	ARCILLOSO	Ar
31	15,64	28,64	55,72	100,00	ARCILLOSO	Ar
32	32,27	34,01	33,72	100,00	FRANCO ARCILLOSO	FAr
33	21,64	22,64	55,72	100,00	ARCILLOSO	Ar
34	30,44	24,52	45,04	100,00	ARCILLOSO	Ar
35	26,20	11,44	62,36	100,00	ARCILLOSO	Ar
36	36,20	13,44	50,36	100,00	ARCILLOSO	Ar
37	30,44	23,20	46,36	100,00	ARCILLOSO	Ar
38	30,44	11,20	58,36	100,00	ARCILLOSO	Ar



PARCELA	MUESTRA	HUMEDAD GRAVIMETRICA HG%	DENSIDAD APARENTE SECO gr / cm ³	DENSIDAD APARENTE HUMEDO gr / cm ³	DENSIDAD REAL gr / cm ³
1	A1	36,14	1,15	1,57	2,63
1	A2	35,68	1,18	1,60	2,63
2	A1	36,38	1,16	1,59	2,62
2	A2	33,30	1,20	1,60	2,72
3	A1	30,19	1,34	1,75	2,60
3	A2	27,54	1,30	1,66	2,72
4	A1	29,90	1,24	1,61	2,69
4	A2	30,14	1,30	1,69	2,68
5	A1	32,02	1,38	1,82	2,63
5	A2	36,47	1,18	1,61	2,66
6	A1	41,08	1,16	1,64	2,60
6	A2	44,75	1,09	1,58	2,59
7	A1	44,64	1,08	1,57	2,58
7	A2	47,60	1,06	1,57	2,65
8	A1	35,66	1,27	1,72	2,58
8	A2	32,73	1,23	1,64	2,59
9	A1	39,41	1,14	1,59	2,63
9	A2	31,34	1,32	1,74	2,60
10	A1	35,13	1,22	1,65	2,65
10	A2	34,61	1,24	1,67	2,58
11	A1	25,26	1,46	1,83	2,58
11	A2	25,25	1,38	1,73	2,74
12	A1	28,87	1,39	1,79	2,59
12	A2	24,98	1,46	1,82	2,64
13	A1	27,03	1,39	1,77	2,63
13	A2	28,54	1,29	1,65	2,63
14	A1	28,34	1,38	1,77	2,63
14	A2	32,24	1,27	1,67	2,61
15	A1	31,31	1,28	1,68	2,94
15	A2	31,70	1,34	1,76	2,77
16	A1	37,48	1,18	1,63	2,63
16	A2	38,73	1,16	1,61	3,13
17	A1	37,48	1,32	1,81	2,81
17	A2	38,94	1,26	1,75	3,04
18	A1	41,50	1,17	1,65	2,74
18	A2	41,58	1,17	1,65	2,73
19	A1	20,23	1,37	1,65	2,73
19	A2	18,47	1,43	1,69	2,69



PARCELA	MUESTRA	HUMEDAD GRAVIMETRICA CH%	DENSIDAD APARENTE SECO gr / cm ³	DENSIDAD APARENTE HUMEDO gr / cm ³	DENSIDAD REAL gr / cm ³
20	A1	51,38	0,95	1,44	2,62
20	A2	51,54	1,04	1,58	2,62
21	A1	29,53	1,19	1,54	2,69
21	A2	30,02	1,31	1,70	3,27
22	A1	23,55	1,35	1,66	3,45
22	A2	24,48	1,26	1,57	2,66
23	A1	31,64	1,25	1,64	2,54
23	A2	33,85	1,25	1,67	2,68
24	A1	43,23	1,04	1,50	2,74
24	A2	29,76	1,18	1,53	2,77
25	A1	39,91	1,17	1,64	2,69
25	A2	48,36	1,19	1,77	2,60
26	A1	43,28	1,07	1,54	2,52
26	A2	40,19	1,16	1,62	2,64
27	A1	42,33	1,10	1,56	2,64
27	A2	44,76	1,03	1,50	2,58
28	A1	27,32	1,37	1,74	2,65
28	A2	26,68	1,24	1,57	2,66
29	A1	25,57	1,41	1,77	2,55
29	A2	25,29	1,48	1,86	2,52
30	A1	26,18	1,11	1,40	2,41
30	A2	27,17	1,22	1,56	2,39
31	A1	28,14	1,46	1,87	2,53
31	A2	31,14	1,31	1,72	2,53
32	A1	20,56	1,14	1,37	2,42
32	A2	21,50	1,15	1,40	2,55
33	A1	29,53	1,24	1,61	2,39
33	A2	32,70	1,24	1,64	2,53
34	A1	34,15	1,19	1,60	2,70
34	A2	37,63	1,09	1,50	2,67
35	A1	41,96	1,22	1,73	2,76
35	A2	39,26	1,25	1,75	2,77
36	A1	36,60	1,03	1,41	2,78
36	A2	43,21	0,98	1,41	2,80
37	A1	30,62	1,19	1,55	2,71
37	A2	34,12	1,17	1,57	2,74
38	A1	38,31	1,06	1,47	2,67
38	A2	41,19	1,11	1,56	2,61



MUESTRA	No.	INFILTRACION cm / hora
D1 - C2A	1	5,46
D3 - C2B	2	17,01
E2 - C2C	3	2,53
E4 - C2D	4	5,52
F1 - C2E	5	0,18
G2 - C2F	6	1,67
G3 - C2G	7	3,12
B2 - C2H	8	0,33
H1 - C2I	9	0,33
H3 - C2J	10	1,44
J4 - C2K	11	0,00
J2 - C2L	12	0,44
K1 - C3A	13	12,92
K3 - C3B	14	0,55
M2 - C3C	15	0,09
O1 - C3D	16	0,00
O3 - C3E	17	15,88
Q2 - C3F	18	0,00
R2 - C3G	19	0,00
B2 - C4B	21	48,41
F3 - C4C	22	5,41
C5D - U13	27	0,06
C5H - DA1	30	1,91
C6D - AL4	37	17,63
C5B - DU9	23	15,07
C5D - DT1	25	15,77
C5D - U4	24	0,21
C5D - M5	26	0,86
C5F - M1	28	33,64
C5G - DG3	29	17,95
C5I - DE9	31	6,92
C5K - DI1	33	27,66
C5J - DA5	32	2,00
C6A - AH1	34	68,33
C6B - AA6	35	15,70
C6C - AG4	36	5,11
C6E - AC1	38	1,45



MUESTRA	No.	CONDUCTIVIDAD HIDRAULICA cm / hora
C2A - D1	1	0,06
C2B - D3	2	0,14
C2C - E2	3	0,19
C2D - E4	4	0,26
C2E - F1	5	0,04
C3F - Q2	18	0,02
C3E - O3	17	0,01
C2F - G2	6	0,14
C2G - G3	7	0,09
C2H - B2	8	0,02
C2I - H1	9	0,15
C2J - H3	10	0,04
C2K - J4	11	0,08
C2L - J2	12	0,00
C3A - K1	13	0,07
C3B - K3	14	0,09
C3C - M2	15	0,07
C3D - O1	16	0,05
C3G - R2	19	0,53
C4B - B2	21	0,66
C4C - F3	22	0,34
C5B - DU9	23	0,33
C5D - DT1	25	0,03
C5F - M1	28	0,60
C5G - DG3	29	0,09
C5H - DA1	30	0,67
C5K - DI1	33	0,65
C5I - DE9	31	0,47
C5J - DA5	32	0,08
C5D - U13	27	0,01
C5D - U4	24	0,03
C5D - M5	26	0,04
C6A - AH1	34	0,00
C6B - AA6	35	0,19
C6C - AG4	36	0,39
C6E - AC1	38	0,11
C6D - AL4	37	0,11



ANEXO 5 PROPIEDADES DE LOS SUELOS

MUES-TRA	PROPIE-DAD	RELACIONES MASA VOLUMEN					TEXTURA				pH	COMPLEJO DE CAMBIO							SATURACION DE BASES							
		W	DENSIDAD			PO-ROSIDAD	CLASE TEXT.	Ar	L	A		ACIDEZ INTERCAMBIABLE		BASES INTERCAMBIABLES			CICE	CIC	SATURACION DE BASES							
			REAL	APAR	AP. H.							H	AI	Ca	Mg	K			Na	H	AI	Ca	Mg	K	Na	TOTAL
			g/cm3									%			cmol(+)/Kg											
1	andaluz 17	25,25	2,66	1,42	1,78	46,62	Ar	47,04	23,32	29,64	6,44	0,00	0,00	16,43	8,59	0,26	3,41	28,69	26,61	0,00	0,00	61,74	32,28	0,98	12,81	107,82
2	andaluz 17	26,92	2,61	1,42	1,81	45,59	Ar	48,70	17,03	34,27	7,11	0,00	0,00	10,78	16,65	0,24	3,75	31,42	28,76	0,00	0,00	37,48	57,89	0,83	13,04	109,25
3	andaluz 17	35,37	2,61	1,23	1,66	52,87	Ar	70,70	17,03	12,27	7,24	0,00	0,00	29,13	12,12	0,61	2,56	44,42	38,76	0,00	0,00	75,15	31,27	1,57	6,60	114,60
4	andaluz 17	34,87	2,61	1,23	1,66	52,87	Ar	64,70	19,66	15,64	6,45	0,00	0,00	21,91	10,93	0,70	2,37	35,91	31,18	0,00	0,00	70,27	35,05	2,25	7,60	115,17
5	andaluz 17	34,20	2,58	1,25	1,68	51,55	Ar	62,70	19,03	18,27	7,72	0,00	0,00	36,35	11,84	0,41	1,30	49,90	36,26	0,00	0,00	100,25	32,65	1,13	3,59	137,62
6	andaluz 17	35,91	2,63	1,17	1,59	55,51	Ar	65,04	17,32	17,64	5,83	0,00	0,00	23,18	11,01	0,65	2,47	37,31	39,08	0,00	0,00	59,31	28,17	1,66	6,32	95,47
7	andaluz 17	34,84	2,67	1,18	1,59	55,81	Ar	72,70	13,03	14,27	5,61	0,00	0,00	21,54	13,65	0,70	3,47	39,36	40,84	0,00	0,00	52,74	33,42	1,71	8,50	96,38
8	andaluz 17	28,86	2,66	1,32	1,71	50,38	Ar	60,36	15,37	24,27	5,31	0,00	0,00	18,43	10,15	0,61	2,08	31,27	33,80	0,00	0,00	54,53	30,03	1,80	6,15	92,51
9	andaluz 17	30,02	2,69	1,27	1,65	52,79	Ar	72,70	13,03	14,27	5,03	0,00	0,00	21,31	12,37	0,46	2,95	37,09	42,35	0,00	0,00	50,32	29,21	1,09	6,97	87,58
10	andaluz 17	34,24	2,64	1,28	1,71	51,52	Ar	45,70	22,03	32,27	6,98	0,00	0,00	22,96	7,81	1,08	0,21	32,06	28,30	0,00	0,00	81,13	27,60	3,82	0,74	113,29
11	andaluz 17	46,12	2,61	1,07	1,57	59,00	Ar	74,70	9,03	16,27	5,64	0,00	0,00	22,96	13,44	0,54	2,89	39,83	41,79	0,00	0,00	54,94	32,16	1,29	6,92	95,31
12	andaluz 16	19,35	2,71	1,40	1,67	48,34	FArA	28,36	12,34	59,30	6,78	0,00	0,00	15,54	5,06	0,81	0,11	21,52	22,74	0,00	0,00	68,34	22,25	3,56	0,48	94,64
13	andaluz 16	41,54	2,74	1,17	1,65	57,30	Ar	68,36	14,00	17,64	6,90	0,00	0,00	27,39	9,95	1,14	1,60	40,08	43,24	0,00	0,00	63,34	23,01	2,64	3,70	92,69
14	andaluz 16	38,21	2,92	1,29	1,78	55,82	Ar	60,36	21,64	18,00	6,69	0,00	0,00	26,15	9,25	0,95	1,25	37,60	39,56	0,00	0,00	66,10	23,38	2,40	3,16	95,05
15	andaluz 16	31,51	2,85	1,31	1,72	54,04	Ar	52,36	19,64	28,00	6,96	0,00	0,00	22,48	8,10	0,32	1,83	32,73	32,86	0,00	0,00	68,41	24,65	0,97	5,57	99,60
16	andaluz 16	27,79	2,63	1,34	1,71	49,05	Ar	54,36	20,76	24,88	6,92	0,00	0,00	21,59	8,84	0,33	2,34	33,10	35,60	0,00	0,00	60,65	24,83	0,93	6,57	92,98
17	andaluz 16	30,29	2,62	1,32	1,72	49,62	Ar	60,36	19,37	20,27	6,63	0,00	0,00	21,81	10,97	0,15	2,24	35,17	34,88	0,00	0,00	62,53	31,45	0,43	6,42	100,83
18	hachados	14,82	2,43	1,49	1,71	38,68	Ar	46,28	12,66	41,06	6,05	0,00	0,00	15,57	6,39	0,75	0,32	23,03	19,71	0,00	0,00	79,00	32,42	3,81	1,62	116,84
19	hachados	17,47	2,34	1,33	1,56	43,16	Ar	76,88	17,53	5,59	6,30	0,00	0,00	35,31	11,75	1,78	0,34	49,18	48,20	0,00	0,00	73,26	24,38	3,69	0,71	102,03
20	hachados	17,48	2,40	1,48	1,74	38,33	Ar	81,26	15,86	2,88	6,69	0,00	0,00	35,56	13,32	2,17	0,73	51,78	47,09	0,00	0,00	75,51	28,29	4,61	1,55	109,96
21	hachados	19,86	2,36	1,41	1,69	40,25	Ar	81,81	14,46	3,73	6,46	0,00	0,00	32,79	12,87	1,35	1,50	48,51	46,52	0,00	0,00	70,49	27,67	2,90	3,22	104,28
22	hachados	19,34	2,43	1,31	1,56	46,09	Ar	79,87	16,58	3,54	6,92	0,00	0,00	30,70	13,92	1,08	1,38	47,08	42,21	0,00	0,00	72,73	32,98	2,56	3,27	111,54
23	hachados	17,83	2,47	1,40	1,65	43,32	Ar	83,96	12,59	3,44	6,85	0,00	0,00	33,19	14,17	1,33	1,98	50,67	40,86	0,00	0,00	81,23	34,68	3,26	4,85	124,01
24	hachados	19,47	2,39	1,33	1,59	44,35	Ar	82,38	14,61	3,02	6,27	0,00	0,00	32,72	12,54	1,69	0,56	47,51	42,50	0,00	0,00	76,99	29,51	3,98	1,32	111,79
25	san josé	24,14	2,19	1,28	1,59	41,55	Ar	73,46	19,86	6,69	6,48	0,00	0,00	27,65	10,74	1,03	2,42	41,84	38,72	0,00	0,00	71,41	27,74	2,66	6,25	108,06
26	san josé	26,12	2,31	1,33	1,68	42,42	Ar	76,97	19,25	3,78	6,13	0,00	0,00	23,14	11,20	0,99	3,50	38,83	37,09	0,00	0,00	62,39	30,20	2,67	9,44	104,69
27	san josé	24,34	2,26	1,28	1,60	43,36	Ar	75,05	17,72	7,23	6,58	0,00	0,00	28,42	12,07	1,12	5,94	47,55	41,59	0,00	0,00	68,33	29,02	2,69	14,28	114,33
28	san josé	24,44	2,35	1,33	1,65	43,40	Ar	77,78	19,53	2,69	6,49	0,00	0,00	24,61	12,05	1,18	2,91	40,75	41,57	0,00	0,00	59,20	28,99	2,84	7,00	98,03
29	san josé	24,63	2,25	1,28	1,60	43,11	Ar	75,97	20,09	3,94	6,63	0,00	0,00	27,43	12,45	1,21	5,36	46,45	38,32	0,00	0,00	71,58	32,49	3,16	13,99	121,22
30	san josé	26,81	2,23	1,26	1,60	43,50	Ar	74,70	17,93	7,37	6,54	0,00	0,00	24,46	13,27	0,96	4,25	42,94	37,61	0,00	0,00	65,04	35,28	2,55	11,30	114,17
31	san josé	27,87	2,27	1,24	1,58	45,37	Ar	71,91	18,10	9,99	6,72	0,00	0,00	23,17	12,17	1,00	7,12	43,46	38,90	0,00	0,00	59,56	31,29	2,57	18,30	111,72

valores bajos
 valores medios
 valores altos
 valores ideales

MUES-TRA	PROPIE-DAD	SATURACION DE BASES									RELACIONES				P-Disp.	N-Total	C.O.	M.O.
		H	Al	Ca	Mg	K	Na	AC. INT.	B. INT.	TOTAL	Ca /Mg	Mg /K	Ca /K	(Ca+Mg) /K				
#	UNIDAD	%									-				mg/Kg	%		
1	andaluz 17	0,00	0,00	57,27	29,94	0,91	11,89	0,00	100,00	100,00	1,91	33,04	63,19	96,23	40,81		0,28	0,48
2	andaluz 17	0,00	0,00	34,31	52,99	0,76	11,94	0,00	100,00	100,00	0,65	69,38	44,92	114,29	99,32		0,35	0,60
3	andaluz 17	0,00	0,00	65,58	27,29	1,37	5,76	0,00	100,00	100,00	2,40	19,87	47,75	67,62	111,20		0,52	0,90
4	andaluz 17	0,00	0,00	61,01	30,44	1,95	6,60	0,00	100,00	100,00	2,00	15,61	31,30	46,91	97,27		0,68	1,17
5	andaluz 17	0,00	0,00	72,85	23,73	0,82	2,61	0,00	100,00	100,00	3,07	28,88	88,66	117,54	107,18		0,38	0,66
6	andaluz 17	0,00	0,00	62,13	29,51	1,74	6,62	0,00	100,00	100,00	2,11	16,94	35,66	52,60	82,23		0,43	0,74
7	andaluz 17	0,00	0,00	54,73	34,68	1,78	8,82	0,00	100,00	100,00	1,58	19,50	30,77	50,27	92,40		0,36	0,62
8	andaluz 17	0,00	0,00	58,94	32,46	1,95	6,65	0,00	100,00	100,00	1,82	16,64	30,21	46,85	88,03		0,35	0,60
9	andaluz 17	0,00	0,00	57,45	33,35	1,24	7,95	0,00	100,00	100,00	1,72	26,89	46,33	73,22	79,20		0,40	0,69
10	andaluz 17	0,00	0,00	71,62	24,36	3,37	0,66	0,00	100,00	100,00	2,94	7,23	21,26	28,49	120,98		0,50	0,86
11	andaluz 17	0,00	0,00	57,64	33,74	1,36	7,26	0,00	100,00	100,00	1,71	24,89	42,52	67,41	86,40		0,55	0,95
12	andaluz 16	0,00	0,00	72,21	23,51	3,76	0,51	0,00	100,00	100,00	3,07	6,25	19,19	25,43	117,82		0,90	1,55
13	andaluz 16	0,00	0,00	68,34	24,83	2,84	3,99	0,00	100,00	100,00	2,75	8,73	24,03	32,75	89,96		0,43	0,74
14	andaluz 16	0,00	0,00	69,55	24,60	2,53	3,32	0,00	100,00	100,00	2,83	9,74	27,53	37,26	93,70		0,88	1,52
15	andaluz 16	0,00	0,00	68,68	24,75	0,98	5,59	0,00	100,00	100,00	2,78	25,31	70,25	95,56	36,88		0,71	1,22
16	andaluz 16	0,00	0,00	65,23	26,71	1,00	7,07	0,00	100,00	100,00	2,44	26,79	65,42	92,21	39,10		0,80	1,38
17	andaluz 16	0,00	0,00	62,01	31,19	0,43	6,37	0,00	100,00	100,00	1,99	73,13	145,40	218,53	6,80		0,91	1,57
18	hachados	0,00	0,00	67,61	27,75	3,26	1,39	0,00	100,00	100,00	2,44	8,52	20,76	29,28	94,73		0,67	1,16
19	hachados	0,00	0,00	71,80	23,89	3,62	0,69	0,00	100,00	100,00	3,01	6,60	19,84	26,44	161,75		2,15	3,71
20	hachados	0,00	0,00	68,68	25,72	4,19	1,41	0,00	100,00	100,00	2,67	6,14	16,39	22,53	122,39		1,57	2,71
21	hachados	0,00	0,00	67,59	26,53	2,78	3,09	0,00	100,00	100,00	2,55	9,53	24,29	33,82	45,71		0,87	2,16
22	hachados	0,00	0,00	65,21	29,57	2,29	2,93	0,00	100,00	100,00	2,21	12,89	28,43	41,31	92,57		0,30	0,52
23	hachados	0,00	0,00	65,50	27,97	2,62	3,91	0,00	100,00	100,00	2,34	10,65	24,95	35,61	115,25		0,43	0,74
24	hachados	0,00	0,00	68,87	26,39	3,56	1,18	0,00	100,00	100,00	2,61	7,42	19,36	26,78	107,44		1,25	2,16
25	san josé	0,00	0,00	66,09	25,67	2,46	5,78	0,00	100,00	100,00	2,57	10,43	26,84	37,27	102,17		0,78	1,34
26	san josé	0,00	0,00	59,59	28,84	2,55	9,01	0,00	100,00	100,00	2,07	11,31	23,37	34,69	52,42		0,71	1,22
27	san josé	0,00	0,00	59,77	25,38	2,36	12,49	0,00	100,00	100,00	2,35	10,78	25,38	36,15	83,99		0,66	1,14
28	san josé	0,00	0,00	60,39	29,57	2,90	7,14	0,00	100,00	100,00	2,04	10,21	20,86	31,07	70,71		0,87	1,50
29	san josé	0,00	0,00	59,05	26,80	2,60	11,54	0,00	100,00	100,00	2,20	10,29	22,67	32,96	90,56		0,64	1,10
30	san josé	0,00	0,00	56,96	30,90	2,24	9,90	0,00	100,00	100,00	1,84	13,82	25,48	39,30	75,18		0,60	1,03
31	san josé	0,00	0,00	53,31	28,00	2,30	16,38	0,00	100,00	100,00	1,90	12,17	23,17	35,34	120,53		0,66	1,14

ANEXO 6

CARACTERÍSTICAS DASOMÉTRICAS, ESPECTRALES Y PRECIPITACIÓN DE LOS PUNTOS DE MUESTREO

PREDIO	VOL_COM	VOL_TOT	ALTURAT	IS	IMA	PRECIPITA	B1	B2	B3	B4	B5
San José	0,2642	0,3515	13,3422	14,20	5,44	1027,28	74	56	58	55	103
San José	0,2536	0,3521	13,5533	14,00	5,27	1022,52	73	58	63	52	109
San José	0,1952	0,3171	13,7579	14,80	5,99	1030,89	72	54	54	54	96
San José	0,1397	0,2325	11,8640	13,00	4,44	1025,97	70	54	53	56	95
San José	0,2358	0,3711	12,7977	13,40	4,76	1023,66	71	57	56	66	99
San José	0,1722	0,2850	12,8834	13,20	4,60	1034,16	71	54	50	59	87
San José	0,1679	0,2635	12,9752	13,10	4,52	1036,91	70	53	47	55	92
San José	0,1468	0,2391	12,2309	13,00	4,44	1039,60	0	0	0	0	0
San José	0,3282	0,4684	15,3011	17,80	9,15	1029,19	71	55	51	58	96
San José	0,2181	0,3543	14,1666	14,40	5,62	1024,16	70	54	50	60	94
San José	0,1582	0,2296	13,7382	15,50	6,66	1032,12	69	53	50	54	91
San José	0,1958	0,3072	12,9926	13,70	5,01	1029,63	70	53	49	56	90
San José	0,2190	0,3391	14,0396	14,20	5,44	1041,89	68	54	50	57	88
San José	0,1109	0,1890	11,7561	13,40	4,76	1034,72	0	0	0	0	0
San José	0,2016	0,3427	12,9982	13,70	5,01	1032,21	72	54	53	52	97
San José	0,1817	0,2884	12,6044	13,90	5,18	1037,10	0	0	0	0	100
San José	0,2958	0,4446	14,0827	15,10	6,27	1034,56	71	57	54	53	100
San José	0,2543	0,3598	14,1594	15,50	6,66	1029,51	71	54	50	60	95
San José	0,2961	0,4273	13,8760	15,60	6,76	1043,66	72	56	54	55	95
San José	0,2692	0,3846	12,7279	13,20	4,60	1039,06	74	55	54	55	97
San José	0,2084	0,3223	13,5263	15,40	6,56	1045,33	73	56	53	55	97
San José	0,1864	0,2633	13,0748	14,30	5,53	1043,06	73	58	58	54	103
San José	0,1396	0,2598	13,6662	16,70	7,90	1038,18	73	55	55	53	100
San José	0,2209	0,3763	13,9631	15,10	6,27	1033,41	0	0	0	0	0
San José	0,1241	0,1916	12,3890	12,50	4,06	1046,43	73	56	55	55	96
San José	0,1674	0,2442	12,6417	13,20	4,60	1044,27	75	57	56	54	98
San José	0,1559	0,2477	11,6522	12,60	4,13	1039,93	73	57	55	55	102
San José	0,1668	0,2563	11,1884	12,10	3,77	1035,29	73	57	53	56	94
San José	0,1589	0,2399	11,3880	12,20	3,84	1047,23	73	57	53	56	95
San José	0,1605	0,2176	11,8044	13,40	4,76	1045,15	73	57	56	55	98
San José	0,2342	0,3137	11,6020	13,60	4,93	1041,04	73	58	56	56	99
San José	0,1870	0,2822	11,5694	11,70	3,48	1036,58	74	58	56	57	102
San José	0,2058	0,3411	13,7131	13,60	4,93	1047,73	72	56	52	59	92
San José	0,1796	0,2891	11,7705	13,20	4,60	1045,75	73	57	54	57	94
San José	0,1964	0,2662	10,5774	8,30	1,58	1041,87	74	57	58	56	99
Andaluz 16	0,2504	0,3333	14,5515	16,00	7,00	783,79	67	54	49	66	87
Andaluz 17	0,1199	0,2064	11,4910	12,00	3,00	741,53	71	54	48	60	92
Andaluz 17	0,1524	0,2725	12,5192	14,00	6,00	744,12	71	54	51	55	92
Andaluz 17	0,0844	0,1462	9,9846	12,00	4,00	746,85	68	52	48	59	90
Andaluz 17	0,0887	0,1772	10,6852	12,00	4,00	748,54	67	53	50	61	91
Andaluz 17	0,1449	0,2167	13,5453	15,00	6,00	741,51	71	54	48	59	88
Andaluz 17	0,1960	0,3921	14,0273	15,00	6,00	744,16	69	54	50	58	88
Andaluz 17	0,1397	0,2397	12,2149	14,00	5,00	745,81	71	53	53	56	92
Andaluz 17	0,0654	0,1358	10,6368	11,00	3,00	749,19	70	55	53	58	92

PREDIO	VOL_COM	VOL_TOT	ALTURAT	IS	IMA	PRECIPITA	B1	B2	B3	B4	B5
Andaluz 17	0,1044	0,1924	13,2988	13,00	5,00	741,64	68	53	48	57	89
Andaluz 17	0,1269	0,2304	14,6801	15,00	6,00	744,36	69	53	48	62	86
Andaluz 17	0,1389	0,2290	15,4955	18,00	9,00	747,30	70	53	50	59	90
Andaluz 17	0,1437	0,2238	14,2009	15,00	6,00	749,06	70	52	50	59	88
Andaluz 17	0,1009	0,1892	12,0887	13,00	4,00	742,33	71	54	49	59	89
Andaluz 17	0,1349	0,2589	14,5903	16,00	8,00	744,67	69	54	48	60	87
Andaluz 17	0,1680	0,3096	15,5399	16,00	8,00	746,84	71	52	45	63	86
Andaluz 17	0,0939	0,1640	12,6762	15,00	6,00	749,98	68	53	48	61	86
Andaluz 17	0,0957	0,1863	14,3624	15,00	6,00	742,34	69	54	48	61	87
Andaluz 17	0,1092	0,1937	13,4089	14,00	6,00	745,44	68	54	47	58	88
Andaluz 17	0,1092	0,1842	13,1558	13,00	5,00	748,51	68	53	45	61	87
Andaluz 17	0,1335	0,2432	14,6130	16,00	7,00	750,46	67	53	44	63	87
Andaluz 17	0,2508	0,4166	15,8520	16,00	8,00	743,18	70	52	49	59	88
Andaluz 17	0,0893	0,1704	12,8164	13,00	5,00	745,90	70	55	48	59	88
Andaluz 17	0,2716	0,4297	17,6432	18,00	9,00	749,03	0	0	0	0	86
Andaluz 17	0,1611	0,2359	12,1781	12,00	4,00	751,08	70	52	45	61	85
Andaluz 17	0,1425	0,2499	15,3831	16,00	8,00	743,97	70	55	49	58	92
Andaluz 17	0,1884	0,3354	16,5892	18,00	9,00	746,82	0	0	0	0	0
Andaluz 17	0,1207	0,1828	13,8243	14,00	5,00	750,15	71	52	45	59	84
Andaluz 17	0,1072	0,1955	13,7482	15,00	6,00	752,23	66	50	42	62	85
Andaluz 17	0,0854	0,1630	10,5321	11,00	3,00	741,11	70	55	49	59	93
Andaluz 17	0,1172	0,1882	10,0849	11,00	3,00	744,23	72	52	50	60	88
Andaluz 17	0,1742	0,2607	12,7853	14,00	5,00	745,90	70	53	48	58	90
Andaluz 17	0,0864	0,1498	11,7575	13,00	5,00	748,64	69	54	50	58	92
Andaluz 17	0,0932	0,1775	11,8510	13,00	4,00	741,34	68	54	50	59	90
Andaluz 17	0,1543	0,2797	13,3859	14,00	6,00	743,85	70	55	51	62	94
Andaluz 17	0,1731	0,2785	11,7783	14,00	5,00	745,52	73	53	50	59	94
Andaluz 17	0,1744	0,2984	13,7148	15,00	6,00	748,26	69	54	50	59	90
Andaluz 17	0,1250	0,1993	11,9685	12,00	4,00	741,76	71	54	52	58	97
Andaluz 17	0,0545	0,1003	8,3658	9,00	2,00	744,29	70	54	49	59	90
Andaluz 17	0,1178	0,1963	9,7494	11,00	3,00	747,04	72	55	53	59	96
Andaluz 17	0,1963	0,3127	12,9308	14,00	5,00	748,93	70	55	51	60	93
Andaluz 16	0,1799	0,2696	12,3390	13,00	4,00	792,63	67	52	46	62	86
Andaluz 16	0,1525	0,2262	11,9135	13,00	5,00	796,04	70	53	51	61	92
Andaluz 16	0,1144	0,1690	9,9791	10,00	2,00	798,16	69	52	52	61	94
Andaluz 16	0,1857	0,2777	13,4267	13,00	5,00	790,10	68	54	49	62	90
Andaluz 16	0,1146	0,2390	11,8425	14,00	5,00	792,30	70	52	50	60	94
Andaluz 16	0,1926	0,2741	11,8971	13,00	4,00	795,71	69	53	52	63	100
Andaluz 16	0,1664	0,2752	13,4752	13,00	5,00	785,86	70	53	51	60	96
Andaluz 16	0,2475	0,3485	13,8693	14,00	5,00	788,11	69	53	50	59	88
Andaluz 16	0,1392	0,2270	11,3476	12,00	4,00	791,58	68	52	49	61	91
Andaluz 16	0,2989	0,3823	12,0755	12,00	4,00	783,50	70	54	50	60	93
Andaluz 16	0,1359	0,2590	12,7034	14,00	5,00	785,84	67	53	50	61	91
Andaluz 16	0,2129	0,3480	13,0435	14,00	5,00	789,33	70	53	51	61	92
Andaluz 16	0,1481	0,2168	11,5974	12,00	4,00	781,36	68	53	0	0	89
Andaluz 16	0,2969	0,4051	12,9589	13,00	4,00	782,09	69	53	49	62	0
Andaluz 16	0,2439	0,3430	13,9599	14,00	5,00	787,31	69	51	50	63	90
Andaluz 16	0,2185	0,3202	12,9827	14,00	5,00	781,17	69	52	49	63	88
Andaluz 16	0,1802	0,2703	10,8334	13,00	4,00	777,75	68	54	49	62	89

PREDIO	VOL_COM	VOL_TOT	ALTURAT	IS	IMA	PRECIPITA	B1	B2	B3	B4	B5
Andaluz 16	0,1461	0,2097	12,3205	13,00	4,00	776,87	69	53	50	63	89
Andaluz 16	0,2107	0,3342	12,1226	13,00	4,00	779,51	67	53	49	64	88
Andaluz 16	0,2383	0,3023	12,6931	16,00	7,00	782,27	68	51	47	64	85
Andaluz 16	0,1224	0,2125	9,8068	14,00	5,00	773,52	68	53	46	65	87
Andaluz 16	0,1541	0,2296	11,7445	13,00	4,00	776,34	67	52	50	61	88
Andaluz 16	0,0664	0,1021	8,0960	9,00	2,00	779,85	69	53	50	62	91
Hachados	0,0889	0,1333	11,2661	14,00	5,00	740,75	64	48	37	67	79
Hachados	0,0849	0,1494	13,3583	14,00	5,00	738,03	65	48	39	68	78
Hachados	0,1305	0,2117	13,2892	14,00	5,00	736,08	67	50	43	68	80
Hachados	0,1273	0,1977	12,9687	15,00	6,00	733,51	0	0	0	0	0
Hachados	0,1300	0,2297	14,4929	16,00	7,00	731,62	0	0	0	0	80
Hachados	0,1076	0,2009	12,8450	15,00	6,00	730,93	0	0	0	0	83
Hachados	0,0673	0,1101	10,7872	13,00	4,00	729,64	67	51	46	67	80
Hachados	0,1253	0,2110	13,5238	14,00	6,00	728,17	67	51	43	67	80
Hachados	0,1102	0,1828	12,3083	15,00	6,00	727,13	68	53	48	67	86
Hachados	0,1230	0,2374	15,0994	20,00	12,00	726,19	69	54	48	67	88
Hachados	0,0710	0,1153	8,8510	10,00	2,00	726,03	69	52	48	63	86
Hachados	0,1039	0,1791	11,5735	15,00	6,00	726,93	67	53	48	65	84
Hachados	0,1094	0,1864	14,3963	16,00	7,00	728,24	68	51	43	68	80
Hachados	0,1605	0,2039	12,5682	14,00	5,00	729,37	0	0	0	64	0
Hachados	0,1406	0,2332	12,9999	15,00	6,00	730,97	67	51	48	64	82
Hachados	0,1401	0,2274	14,0086	15,00	7,00	732,37	66	49	44	69	79
Hachados	0,2071	0,3195	16,4416	17,00	8,00	733,91	67	50	42	66	74
Hachados	0,0610	0,1011	11,4653	13,00	5,00	736,08	67	50	44	69	79
Hachados	0,1072	0,1674	12,3105	14,00	5,00	738,01	66	51	46	70	82
Hachados	0,1388	0,2259	13,3851	15,00	6,00	740,73	65	50	41	69	81
Hachados	0,1402	0,2134	13,3551	16,00	7,00	741,92	67	50	42	69	79
Hachados	0,1484	0,2305	12,4965	13,00	5,00	739,06	66	50	43	71	79
Hachados	0,1443	0,2124	13,9061	15,00	6,00	737,03	67	50	42	69	80
Hachados	0,1182	0,1794	11,9414	13,00	5,00	735,22	65	50	45	67	81
Hachados	0,1225	0,1864	13,7819	15,00	6,00	733,17	68	51	48	60	82
Hachados	0,1197	0,1579	12,6243	13,00	5,00	730,06	69	53	48	62	85
Hachados	0,1378	0,2518	12,0089	13,00	4,00	731,34	69	53	50	61	83
Hachados	0,1129	0,1853	13,6575	15,00	6,00	728,56	69	53	48	62	83
Hachados	0,1733	0,2454	13,5200	14,00	5,00	727,22	0	0	0	0	80
Hachados	0,1009	0,1745	13,1770	16,00	7,00	726,03	69	53	47	65	87
Hachados	0,1894	0,2991	14,9797	16,00	7,00	743,14	66	50	48	64	83
Hachados	0,1537	0,2489	15,7948	16,00	8,00	740,71	65	51	45	67	78
Hachados	0,1109	0,1675	13,7607	15,00	6,00	738,55	66	50	46	67	76
Hachados	0,1281	0,2050	12,5329	13,00	5,00	736,63	69	52	49	62	83
Hachados	0,1427	0,2092	10,7089	12,00	4,00	734,92	69	52	51	60	86
Hachados	0,1139	0,1732	13,6375	14,00	5,00	732,26	69	52	48	61	85
Hachados	0,2675	0,3744	13,4640	15,00	6,00	730,96	68	48	45	65	78
Hachados	0,3108	0,4345	16,2892	23,00	16,00	729,80	68	51	47	63	80
Hachados	0,1218	0,1947	12,0975	14,00	5,00	728,74	67	52	46	66	83

ANEXO 7

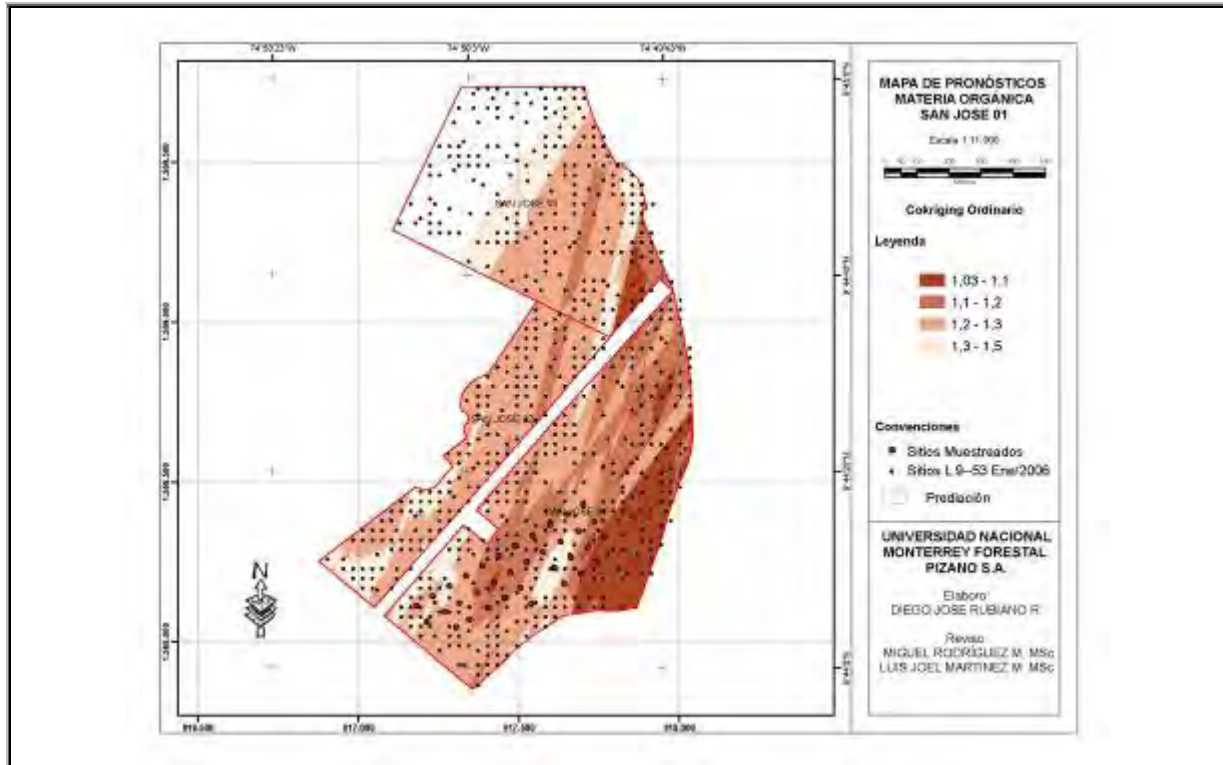


Figura 1: Variabilidad espacial (Cokriging) de materia orgánica en San José

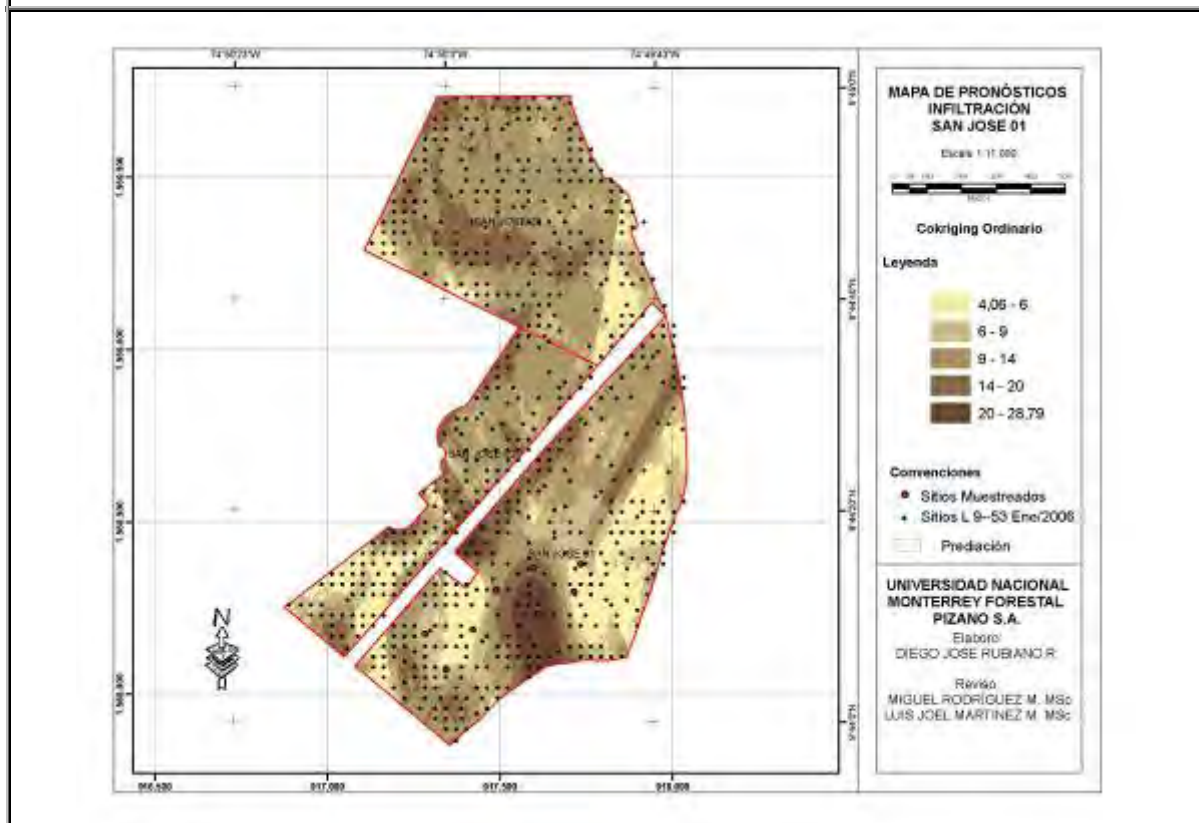


Figura 2: Variabilidad espacial (Cokriging) de infiltración en San José

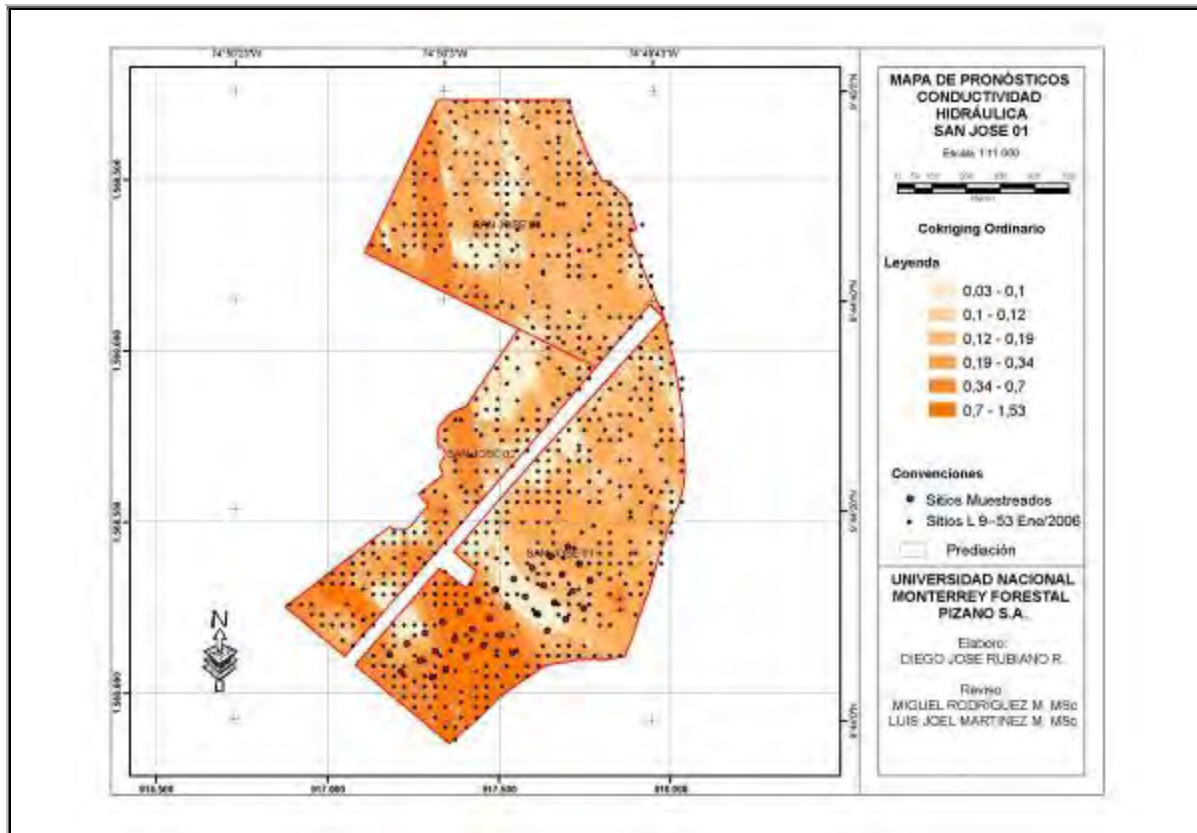


Figura 3: Variabilidad espacial (Cokriging) de la conductividad hidráulica en San José

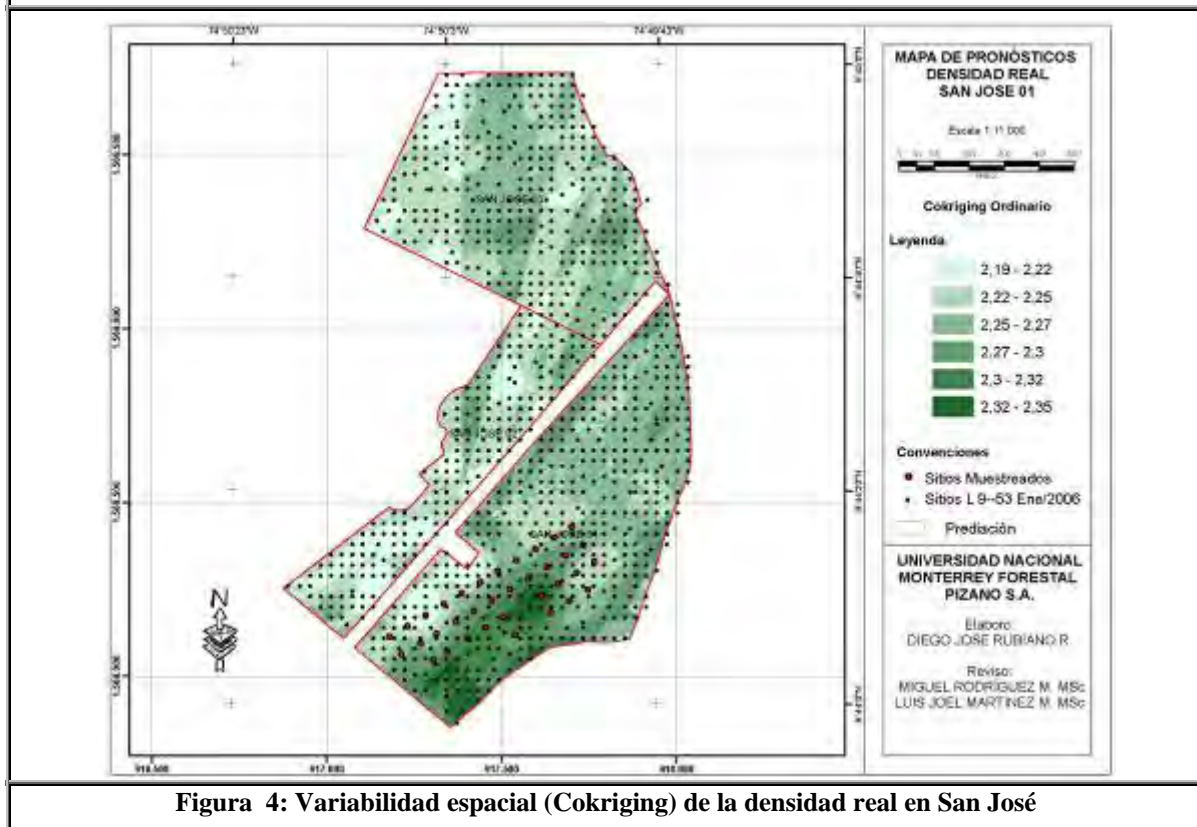


Figura 4: Variabilidad espacial (Cokriging) de la densidad real en San José

ANEXO 8

Covariables	Variograma	Dirección	Pepita (Co)	Meseta Parcial (C)	Rango	Rango menor	Error
VT-VT	Circular	77,2	0,090901	0,005058	553,2	215,1	1,019
VT-VT	Esférico	77,3	0,087913	0,009211	553,2	242,7	1,046
VT-VT	Exponencial	81,2	0,082992	0,015213	553,2	264,2	1,044
VT-VT	Gaussiano	76,3	0,090410	0,005945	553,2	170,0	0,9888
VT-VT	Lineal	78,2	0,091786	0,003911	530,5	198,7	1237
PMM-PMM	Circular	77,2	0,000000	0,000030	553,2	215,1	1,019
PMM-PMM	Esférico	77,3	0,000000	0,000030	553,2	242,7	1,046
PMM-PMM	Exponencial	81,2	0,000000	0,000030	553,2	264,2	1,044
PMM-PMM	Gaussiano	76,3	0,000000	0,000030	553,2	170,0	0,9888
PMM-PMM	lineal	78,2	0,000000	0,000033	530,5	198,7	1237
B4	Circular	77,2	0,000483	0,017757	553,2	215,1	1,019
B4	Esférico	77,3	0,000006	0,018190	553,2	242,7	1,046
B4	Exponencial	81,2	0,000000	0,017690	553,2	264,2	1,044
B4	Gaussiano	76,3	0,003028	0,012491	553,2	170,0	0,9888
B4	Lineal	78,2	0,003019	0,013412	530,5	198,7	1237
B3	Circular	77,2	0,000000	0,015022	553,2	215,1	1,019
B3	Esférico	77,3	0,000000	0,015166	553,2	242,7	1,046
B3	Exponencial	81,2	0,000000	0,016487	553,2	264,2	1,044
B3	Gaussiano	76,3	0,000014	0,013548	553,2	170,0	0,9888
B3	Lineal	78,2	0,000000	0,014568	530,5	198,7	1237
VT-PMM	Circular	77,2	0,090901	0,000079	553,2	215,1	1,019
VT-PMM	Esférico	77,3	0,090901	0,000088	553,2	242,7	1,046
VT-PMM	Exponencial	81,2	0,090901	0,000120	553,2	264,2	1,044
VT-PMM	Gaussiano	76,3	0,090901	0,000076	553,2	170,0	0,9888
VT-PMM	Lineal	78,2	0,090901	0,000072	530,5	198,7	1237
VT-B4	Circular	77,2	0,090901	-0,005019	553,2	215,1	1,019
VT-B4	Esférico	77,3	0,090901	-0,005671	553,2	242,7	1,046
VT-B4	Exponencial	81,2	0,090901	-0,006821	553,2	264,2	1,044
VT-B4	Gaussiano	76,3	0,090901	-0,004623	553,2	170,0	0,9888
VT-B4	Lineal	78,2	0,090901	-0,004370	530,5	198,7	1237
VT-B3	Circular	77,2	0,090901	-0,005917	553,2	215,1	1,019
VT-B3	Esférico	77,3	0,090901	-0,006297	553,2	242,7	1,046
VT-B3	Exponencial	81,2	0,090901	-0,007045	553,2	264,2	1,044
VT-B3	Gaussiano	76,3	0,090901	-0,004774	553,2	170,0	0,9888
VT-B3	Lineal	78,2	0,090901	-0,005236	530,5	198,7	1237
PMM-B4	Circular	77,2	0,090901	-0,000405	553,2	215,1	1,019
PMM-B4	Esférico	77,3	0,090901	-0,000420	553,2	242,7	1,046
PMM-B4	Exponencial	81,2	0,090901	-0,000462	553,2	264,2	1,044
PMM-B4	Gaussiano	76,3	0,090901	-0,000389	553,2	170,0	0,9888
PMM-B4	Lineal	78,2	0,090901	-0,000353	530,5	198,7	1237
PMM-B3	Circular	77,2	0,090901	-0,000548	553,2	215,1	1,019
PMM-B3	Esférico	77,3	0,090901	-0,000564	553,2	242,7	1,046
PMM-B3	Exponencial	81,2	0,090901	-0,000590	553,2	264,2	1,044
PMM-B3	Gaussiano	76,3	0,090901	-0,000522	553,2	170,0	0,9888
PMM-B3	Lineal	78,2	0,090901	-0,000478	530,5	198,7	1237
B4-B3	Circular	77,2	0,090901	0,013971	553,2	215,1	1,019
B4-B3	Esférico	77,3	0,090901	0,014859	553,2	242,7	1,046
B4-B3	Exponencial	81,2	0,090901	0,016154	553,2	264,2	1,044
B4-B3	Gaussiano	76,3	0,090901	0,012434	553,2	170,0	0,9888
B4-B3	Lineal	78,2	0,090901	0,012192	530,5	198,7	1237