

Estudio de los cambios espaciales y temporales durante el  
crecimiento de las plantas de banano empleando fotografías  
aéreas de alta resolución

Darío A. Castañeda S.

Centro de Investigaciones del Banano, CENIBANANO-AUGURA  
Centro Internacional de Agricultura Tropical CIAT  
Universidad Nacional de Colombia sede Medellín  
Medellín  
2003 .

# Estudio de los cambios espaciales y temporales durante el crecimiento de las plantas de banano empleando fotografías aéreas de alta resolución

Darío A. Castañeda S.

Director                                      Thomas Oberthur, Ph. D, Líder, Programa Uso de la Tierra, CIAT

Codirector                                    Kenneth Roy Cabrera, BSc, Profesor Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín

Trabajo de investigación presentado como prerrequisito para optar al título de Master en Geomorfología y Suelos, línea geo-matemáticas

Centro de Investigaciones del Banano, CENIBANANO-AUGURA  
Centro Internacional de Agricultura Tropical CIAT  
Universidad Nacional de Colombia sede Medellín  
Medellín – Colombia  
2005 .

**“LA FACULTAD Y LOS JURADOS DEL TRABAJO DIRIGIDO DE GRADO, NO SON  
RESPONSABLES POR LAS IDEAS EMITIDAS POR EL AUTOR O AUTORES DEL MISMO”**

**Art. 24, resolución 04 de 1974**

A Nicolás, Luz, Gisela, Mélida, Olga y Alex, su constante presencia me dieron la oportunidad de ser conciente de la esencia de ustedes.

## **AGRADECIMIENTOS**

Agradezco a:

Thomas Oberthür, Líder del programa uso de la tierra, CIAT, por su tiempo, recursos, discusiones y recomendaciones, aportados para la realización de esta investigación. A si como por las recomendaciones para mi vida profesional.

Kenneth Roy Cabrera, por hacerme querer la estadística.

Sonia Jaramillo, una luz que ha guiado mi camino.

Mis compañeros de grupo, Camilo, Robinson y Edwin, por las deliciosas discusiones entabladas creo que han dado su fruto.

La Asociación de Bananeros de Colombia, por el apoyo económico para la realización de este trabajo.

Colciencias – Sena, por el apoyo financiero para la realización de este proyecto.

Sandra Bolaños, por sus aportes técnicos

Herman Usma, un amigo con un gran corazón y entrega

Mis profesores y compañeros de la maestría, un tiempo que no olvidaré

Yesenia, por hacerme creer que eras mi fin de trayecto...

A mi familia, por soportar mis largas ausencias.

Y a todos aquellos que de una u otra forma colaboraron con la realización de este trabajo.

## Resumen

Los sistemas agrícolas presentan una alta variabilidad espacial y temporal debida a las propiedades del suelo, la topografía, el clima, las plagas, las enfermedades entre otros factores; el banano no escapa a esta realidad. Los productores también han identificado que aquellos factores que son más variables presentan un mayor riesgo para su sistema o lo que es lo mismo, mayor incertidumbre a la hora de tomar una decisión de manejo. En los sistemas agrícolas tropicales sin embargo no es común el uso de metodologías ni herramientas de bajo costo que permitan capturar y manejar la variabilidad espacial de los factores que hacen parte del sistema con miras a disminuir la incertidumbre.

Usando herramientas de los sistemas de información geográfica y estadística espacial se encontró una alta variabilidad en la configuración de la superficie del suelo o micro-topografía, inducida principalmente por la baja precisión de la maquinaria usada en la zona y la no distribución uniforme del suelo generado en la construcción de los canales de drenaje.

Se construyó un sistema de bajo costo para la adquisición de imágenes aéreas de baja altitud y alta resolución espacial. Se generó un protocolo para la extracción de la información contenida en las imágenes digitales, encontrándose cinco características relacionadas con la forma de los objetos o plantas las cuales capturan la mayor variabilidad de estos, sin temor de perder o ganar información por su inclusión o exclusión, estas son: El área, el índice de forma, la densidad, la dirección principal y la asimetría.

El crecimiento de las plantas fue seguido usando tres métodos que denominamos: tradicional, munsell e imágenes. El método munsell no resultó apropiado por lo dispendioso y la baja pendiente presentadas por las curvas de crecimiento. El área de los objetos resultó ser la mejor característica y con la cual se explica en un alto porcentaje la mayoría de las variables tomadas tradicionalmente como: área foliar, altura de la planta, y número de hojas. Debe explorarse el significado que tienen las demás variables dentro del sistema. El peso de los racimos también presentó una relación aunque débil esta fue significativa con el área de los objetos obtenidos de las imágenes.

Las características, área, índice de forma y densidad de los objetos presentaron estructuración espacial y dada la alta relación entre el área de los objetos y las características tradicionales: área foliar, altura y número de hojas, puede decirse entonces que estas también están estructuradas espacialmente y no se detecta directamente debido al bajo número de muestras tomado.

Se concluye finalmente que las imágenes aéreas se constituyen en una buena herramienta para monitorear los cambios espaciales y temporales del sistema banano.

## Summary

Agricultural production systems is inherently variable due to spatial variation in soil properties, topography, climate, pest, diseases, and other factors, and the bananas system is included here, too. The growers had identified, that highest variable factors, represent a risk to the system or insecurity to the time to get a manage decision.

However, on the tropical systems, the use of low cost methodologies and tools, which temporal and spatial variability can be captured and managed with focus to slow the insecurity, haven't a common use.

Using the geographic information systems and spatial statistics, we found a high variability on the land configuration, due to bad precision of the machinery used and doesn't uniform distribution of the soils generated by the build of the drainages channel.

We build a low cost acquisition image system, which let us acquire aerial images with high spatial resolution. A protocol to extract the information in the images was generated, too. We found that five characteristics related with the form of objects or plants in the images, retain the greater variability of objects related with the bananas plants growing. This characteristics are: area, shape index, density, main direction, and asymmetry.

The plants grow were evaluated by three methods named: Traditional, munsell, and images. The munsell method, does not recommended by time consuming and low slope of the curves. The area of objects was the better characteristics with which the major of grow variables can be explained in a high percent. As leaf area, high of the plant, and number of leaves. The sense of the other variables in the systems can't be explained, so, this need researched. The weigh of the bananas fruits presented a low relationship with the area of images but this was statistically significant.

The characteristics of objects as: area, shape index, density, had spatial structure. Due to high relation with the objects area of images, then we can say that traditional variables had spatial structure, too. The structure can not be detected by the small sample got.

Finally, the aerial images is a good tool to monitoring the spatial and temporal changes of the banana systems.

## INDICE

	Pág.	
1	Introducción	1
2	Estado del Arte	2
2.1	El estado actual del sistema banano	2
2.2	Manejo por sitio específico	3
2.3	Bases para el manejo agronómico del sistema banano por sitio específico.	4
2.4	Sensoreo remoto o teledetección	6
2.4.1	Espectro electromagnético	6
2.4.2	comportamiento espectral de las plantas	7
2.4.3	El sensor	10
2.4.4	Análisis de imágenes	11
2.5	Usos agrícolas de la fotografía aérea	13
2.6	Beneficiarios	15
2.7	Hipótesis	15
3	Objetivos	16
3.1	General	16
3.2	Específicos	16
4	Materiales y métodos	17
4.1	Información de campo y sitio experimental	17
4.1.1	La región	17
4.1.2	Diseño del experimento	18
4.1.3	Micro-topografía	19
4.1.4	Textura del suelo	19



4.1.5	Sistema de drenaje y distancias de los flujos de agua	20
4.2	El cultivo de banano	21
4.2.1	Manejo agronómico	21
4.2.2	Muestreo y métodos de evaluación del crecimiento	23
4.2.3	Equipo	28
4.2.4	Estadística	30
4.3	Resumen metodología	45
5	Resultados y análisis	46
5.1	Análisis de la información del sitio experimental	46
5.1.1	Microtopografía	46
5.1.2	Textura	48
5.1.3	Longitud de los flujos de agua.	51
5.1.4	Descripción del drenaje.	53
5.1.5	Comportamiento espacial de la textura.	53
5.2	Análisis de la información de las plantas obtenidas por métodos tradicionales.	55
5.2.1	Relación entre las variables de medición tradicional.	55
5.2.2	Evaluación del crecimiento.	56
5.3	Método de evaluación con las tablas de color Munsell.	60
5.4	Análisis de imágenes.	63
5.4.1	Extracción de la información.	63
5.4.2	Características de crecimiento a partir de las imágenes	67
5.4.3	Análisis de las características espectrales y de forma en la determinación del crecimiento de las plantas de banano.	68
5.4.4	Análisis de interdependencia de las características de forma seleccionadas a partir de las imágenes	73

5.4.5	Estadísticos descriptivos de las características de forma de los objetos o plantas extraídos de las imágenes	77
5.4.6	Comportamiento espacial de las características de las imágenes	81
5.5	Validación de la metodología	90
5.5.1	Relación entre la micro-topografía, la textura, longitud de los flujos de agua y las características de los objetos o plantas obtenidas a través de las imágenes	90
5.5.2	Comparación entre los métodos de evaluación tradicional y de imágenes	91
5.5.3	Relación entre Área foliar de las plantas de banano y las características de forma de los objetos o plantas obtenidos de las imágenes	99
5.5.4	Relación del peso de los racimos y las características de los objetos o plantas obtenidas a través de las imágenes	102
6	Discusión	103
6.1	Micro-topografía	103
6.2	Textura	103
6.3	Drenaje y flujos de Agua	104
6.4	Micro-topografía, versus el área foliar de los objetos o plantas obtenidas de las imágenes.	104
6.5	Evaluación del crecimiento por métodos tradicionales	105
6.6	Evaluación del crecimiento empleando las tablas munsell	107
6.7	Análisis de imágenes	107
6.8	Características de forma de los objetos o plantas obtenidos a través de las imágenes	108
6.9	Características forma de los objetos y características tradicionales de las plantas	109
	Bibliografía	113

## LISTA DE TABLAS

		pag.
<b>Tabla 4.1:</b>	Programa de fertilización por fecha, compuesto y cantidad a aplicar	21
<b>Tabla 4.2:</b>	Escala de los grados de infección y área foliar afectada; para evaluar la Sigatoka negra (según Stover y Dickson 1970 y modificada por Gauhl 1989).	22
<b>Tabla 4.3:</b>	Descripción de las características evaluadas por el método de imágenes en cada una de las plantas.	27
<b>Tabla 5.1.1:</b>	Estadísticos descriptivos de la variable altura relativa (AR) en cada una de las parcelas del lote experimental expresados todos en cm.	46
<b>Tabla 5.1.2:</b>	Análisis de varianza para las alturas relativas de las plantas	47
<b>Tabla 5.1.3:</b>	Índice de rugosidad aleatoria para cada una de las parcelas	48
<b>Tabla 5.1.4:</b>	Estadísticos descriptivos de la distribución de los separados del suelo en las cuatro parcela, expresado en porcentajes (%).	50
<b>Tabla 5.1.5:</b>	Análisis de varianza para los separados del suelo por parcela	51
<b>Tabla 5.1.6:</b>	Análisis bi-variado de los separados arena y arcilla del suelo por parcela.	51
<b>Tabla 5.1.7:</b>	Estadísticos descriptivos para evaluar el comportamiento y distribución de la longitud expresada en metros de los flujos de agua obtenidos en cada uno de las cuatro parcelas.	52
<b>Tabla 5.1.8:</b>	Análisis de varianza para los flujos de agua en las parcelas A, B, C y D	52
<b>Tabla 5.2.1:</b>	Matriz de correlaciones entre cinco variables usadas tradicionalmente para determinar el crecimiento de las plantas de banano.	56
<b>Tabla 5.2.2:</b>	Estadísticos descriptivos para tres mediciones de las variables número de hojas por planta (NHP), diámetro del pseudo tallo a 20 cm (DST20) y altura de la planta.	57
<b>Tabla 5.2.3:</b>	Pruebas de hipótesis para los perfiles de NHP	58
<b>Tabla 5.2.4:</b>	Pruebas de hipótesis para los perfiles de DST20	59
<b>Tabla 5.2.5:</b>	prueba de hipótesis para los perfiles de altura	59
<b>Tabla 5.3.1:</b>	Estadísticos descriptivos de cada una de las características <b>x</b> , <b>y</b> y <b>z</b> generadas por la transformación de los valores munsell tomados a las hojas de las plantas, tanto en su parte inferior como superior.	60
<b>Tabla 5.3.2:</b>	ANAVAMU, evaluación del crecimiento de las plantas empleando el color de las plantas según el sistema CIE X,Y yZ.	61

<b>Tabla 5.3.3:</b>	Coeficientes $\beta_1$ y $\beta_2$ , con los cuales se estima el cambio en los niveles X, Y y Z tanto en la parte inferior como superior de la hoja durante el crecimiento de las plantas de banano.	61
<b>Tabla 5.3.4:</b>	Análisis de los perfiles para cada una de las variables de color X, Y y Z tanto en la parte inferior como superior de las hojas, para probar las hipótesis nulas de: paralelismo, perfiles en el mismo nivel y perfiles planos, contra que no lo son.	62
<b>Tabla 5.4.1:</b>	Parámetros de escala y criterios de heterogeneidad usados en cada nivel de segmentación.	64
<b>Tabla 5.4.2:</b>	Características por clase utilizadas para la clasificación de las plantas.	66
<b>Tabla 5.4.3:</b>	Características espectrales y de forma exportadas de cada uno de los objetos.	68
<b>Tabla 5.4.4:</b>	Hora en la cual se realizó la captura de 4 imágenes adquiridas de la parcela C.	69
<b>Tabla 5.4.5:</b>	Análisis de varianza para los niveles de intensidad de la banda R	71
<b>Tabla 5.4.6:</b>	Matriz de correlaciones de las características de forma de las plantas obtenidas a partir de las imágenes.	73
<b>Tabla 5.4.7:</b>	Proporción de variabilidad retenida por cada componente principal en cada medición.	74
<b>Tabla 5.4.8:</b>	Vectores propios, grados de importancia de cada variable respecto a las componentes principales, para cada una de las tres mediciones.	75
<b>Tabla 5.4.9:</b>	Estadísticos para las características de forma de los objetos (plantas obtenidas a partir de las imágenes).	79
<b>Tabla 5.4.10:</b>	Estadística lambda de Wilks para verificar tendencia de crecimiento en cada una de las característica de forma usadas.	79
<b>Tabla 5.4.11:</b>	Estadística lambda de Wilks y T2 de Hotelling para verificación del comportamiento de los perfiles de cinco características obtenidas a partir de las imágenes.	81
<b>Tabla 5.4.12:</b>	Parámetros de los modelos de semi-variogramas para las mediciones 1,4 y 4, usando la función de correlación “matern” (exponencial).	83
<b>Tabla 5.5.1:</b>	Correlaciones entre las alturas relativas de las plantas, el área de los objetos o plantas obtenidos a través de las imágenes y el área foliar real de las plantas en las tres mediciones efectuadas.	91
<b>Tabla 5.5.2:</b>	Contraste de hipótesis para los parámetros de la regresión lineal entre las alturas relativas y la raíz cuadrada del área de los objetos.	91
<b>Tabla 5.5.3:</b>	Matriz de correlaciones entre variables obtenidas a través de imágenes	

	aéreas y variables obtenidas por métodos tradicionales para evaluar crecimiento y desarrollo de las plantas de banano.	92
<b>Tabla 5.5.4:</b>	Contraste de hipótesis para el intercepto y coeficientes de la regresión obtenida a partir de área foliar de los objetos para estimar el número de hojas por planta.	94
<b>Tabla 5.5.5:</b>	Contraste de hipótesis para el intercepto y coeficientes de la regresión obtenida a partir de la raíz cuadrada del área, la densidad y la asimetría de los objetos o plantas para estimar el largo de las hojas.	96
<b>Tabla 5.5.6:</b>	Contraste de hipótesis para el intercepto y coeficientes de la regresión obtenida a partir de la raíz cuadrada del área, el índice de forma y la densidad de los objetos o plantas para estimar el diámetro del pseudotallo de la plata a 20 cm de altura.	97
<b>Tabla 5.5.7:</b>	contraste de hipótesis para el intercepto y el coeficiente, de la regresión obtenida a partir de la raíz cuadrada del área, de los objetos o plantas para estimar el diámetro la altura en metros de la planta.	98
<b>Tabla 5.5.8:</b>	Estadísticos descriptivos del área foliar real.	99
<b>Tabla 5.5.9:</b>	contraste de hipótesis para el intercepto y el coeficiente de la regresión obtenida a partir de la raíz cuadrada del área, de los objetos o plantas para estimar el área foliar de las plantas de banano.	101
<b>Tabla 5.5.10:</b>	Estadísticos descriptivos del peso (Kg) del racimo por planta	102
<b>Tabla 5.5.11:</b>	Contraste de hipótesis para los parámetros de la regresión lineal entre área de los objetos y el peso de los racimos.	102

## LISTA DE FIGURAS

		pag.
<b>Figura 2.1:</b>	Comportamiento del área sembrada y de la productividad del banano Colombiano en el tiempo.	3
<b>Figura 2.2:</b>	Espectro electromagnético	7
<b>Figura 4.1:</b>	Zonas bananeras de Colombia y municipios de Urabá, Antioquia	17
<b>Figura 4.2:</b>	Vista aérea del lote experimental, parcelas A, B, C, D (Centro experimental Tulenapa- Coropica, Carepa-Antioquia)	18
<b>Figura 4.3:</b>	Nivel de agua y distribución de puntos para la siembra de plantas, drenajes y marcas reflectantes en las parcelas	19
<b>Figura 4.4:</b>	Representación a escala de los puntos de muestreo para los análisis de textura.	20
<b>Figura 4.5:</b>	Sección de corte del canal (diagrama tomado de soto 2000)	20
<b>Figura 4.6:</b>	Distribución a escala en el lote experimental de plantas en evaluación (puntos en color rojo)	24
<b>Figura 4.7:</b>	Diagrama resumen de la metodología	45
<b>Figura 5.1.1:</b>	Boxplot, e intervalos de confianza para las medias de las alturas relativas por parcela	47
<b>Figura 5.1.2:</b>	Modelo topográfico de elevación digital, basado en las alturas relativas de las plantas y canales de drenaje, lote experimental, Tulenapa Carepa-Antioquia.	48
<b>Figura 5.1.3:</b>	Boxplot para la distribución de las partículas del suelo	50
<b>Figura 5.1.4:</b>	Distribución de la longitud de los flujos de agua (boxplots) y intervalos de confianza para los contrastes de las medias de cada parcela.	52
<b>Figura 5.1.5:</b>	Distribución espacial de la longitud de los flujos de agua de cada una de las plantas y de micro-cuencas	53
<b>Figura 5.1.6:</b>	Distribución por cuartiles de los separados: arcilla, limo y arena, lote experimental	54
<b>Figura 5.1.7:</b>	Semi-variogramas, de cada uno de los separados arena, limo y arcilla, calculados para las direcciones 0° 45° 90° y 145°.	54
<b>Figura 5.1.8:</b>	Interpolación espacial, empleando el método IDW para cada uno de los separados arcilla, limo y arena.	55
<b>Figura 5.2.1:</b>	Número de hojas (NHP) promedio por parcela y por medición	57
<b>Figura 5.2.2:</b>	Diámetro promedio del seudo tallo a 20 cm del suelo (DS20 cm) y por medición	57
<b>Figura 5.2.3:</b>	Altura promedio cm de la plantas del suelo promedio por parcela y por	

	medición	57
<b>Figura 5.3.1:</b>	Perfiles promedio para cada una de las componentes de color X, Y y Z tanto en la parte inferior como superior de la hojas de las plantas de banano.	63
<b>Figura 5.4.1:</b>	fragmento de imagen adquirida en la medición 4 y este mismo fragmento después del proceso de segmentación	64
<b>Figura 5.4.2:</b>	Clases jerárquicas de acuerdo con el nivel de segmentación y característica relación del azul.	65
<b>Figura 5.4.3:</b>	Imagen aérea de la parcela D, correspondiente con la tercera medición y esta misma imagen clasificada.	66
<b>Figura 5.4.4:</b>	Imagen de la parcela D con plantas separadas, resultado final del procesamiento para la extracción de información de las imágenes.	67
<b>Figura 5.4.5:</b>	Polígonos de plantas de banano de las cuatro parcelas con cuatro meses de sembradas.	67
<b>Figura 5.4.6:</b>	Dos imágenes de la parcela C, ilustrando dos condiciones de iluminación	69
<b>Figura 5.4.7:</b>	Comportamiento promedio de la intensidad de la banda G (verde) en campo, parcela C.	70
<b>Figura 5.4.8:</b>	Diferencias en los niveles medios de intensidad del verde	71
<b>Figura 5.4.9:</b>	Valores propios asociados a cada una de las componentes principales en cada una de las tres mediciones efectuadas.	75
<b>Figura 5.4.10:</b>	Importancia y ajuste de cada una de las variables respecto a las componentes principales 1 y 2, en las mediciones 1, 3 y 4.	76
<b>Figura 5.4.11:</b>	Perfiles medios para cinco características de forma usadas en la descripción de los objetos o plantas en las imágenes.	80
<b>Figura 5.4.12:</b>	Distribución espacial por cuartiles del área de los objetos obtenidas de las imágenes.	81
<b>Figura 5.4.13:</b>	Semi-Variogramas para las áreas de las plantas obtenidas de las imágenes.	82
<b>Figura 5.4.14:</b>	Modelos de Semi-variogramas ajustados (matern) a los semivariogramas empíricos, para las áreas de los objetos obtenidos de las imágenes.	83
<b>Figura 5.4.15:</b>	Semi-variogramas envolventes obtenidos a partir del modelo ajustado a los semi-variogramas empíricos para las áreas obtenidas en la medición 1, 4 y 4.	84
<b>Figura 5.4.16:</b>	Distribución espacial por cuartiles del índice de forma (SI) de los objetos obtenidas de las imágenes, para las mediciones 1, 4, 4.	85
<b>Figura 5.4.17:</b>	Variogramas empíricos, modelos esférico ajustado y envolventes simulados para el índice de forma (IS).	86
<b>Figura 5.4.18:</b>	Distribución espacial por cuartiles de la densidad de los objetos obtenidas	

	de las imágenes, para las mediciones 1, 4, 4.	87
<b>Figura 5.4.19:</b>	Semi-variogramas empíricos, modelos esférico ajustado y envolventes simulados para el índice de forma (IS).	88
<b>Figura 5.4.20:</b>	Semi-variogramas empíricos para la dirección principal de los objetos (Mdir) calculados en cuatro direcciones.	89
<b>Figura 5.4.21:</b>	Variogramas empíricos para la Asimetría de los objetos (Asy), calculados en cuatro direcciones.	90
<b>Figura 5.5.1:</b>	Relación grafica entre el área de los objetos y cada una de las características de crecimiento tradicional, y condicionada a la medición.	93
<b>Figura 5.5.2:</b>	Diagnósticos de la regresión, relación, residuales y boxplot entre el número de hojas promedio por planta real y el estimado.	905
<b>Figura 5.5.3:</b>	Diagnósticos de la regresión, relación, residuales y boxplot entre el largo promedio de hojas por planta real y el estimado.	96
<b>Figura 5.5.3:</b>	Diagnósticos de la regresión, relación, residuales y boxplot entre las alturas real y estimadas de las plantas.	98
<b>Figura 5.5.4:</b>	Relación entre el área foliar de las plantas de banano y el área de los objetos o plantas obtenidas de las imágenes, en tres mediciones.	100
<b>Figura 5.5.5:</b>	Diagnósticos de la regresión, relación, residuales y boxplot entre las áreas foliares reales y estimadas de las plantas de banano	101



## Introducción

La agricultura juega un papel importante a nivel mundial, tanto para los países desarrollados como no, ya sea porque representa un renglón importante en el fortalecimiento de la economía del país o simplemente para el sostenimiento y mitigación del hambre, en regiones superpobladas y sumidas en la pobreza. En ambos casos es apremiante la producción de alimentos de manera efectiva, a bajos costos, menor riesgo y cada día también con menor impacto ambiental. En el primero para tener productos competitivos en cuanto a volumen, frecuencia, calidad y precios y en el segundo para asegurar el alimento a sus comunidades.

En el caso particular del banano colombiano, este es un producto que juega un papel importante para la economía del país. En el año 2001, el banano participó con el 4.09 % (4.40 % incluyendo el plátano) de las exportaciones colombianas totales, con el 5.49 % de las no tradicionales y con el 47.48% de las agropecuarias sin café. Además podría decirse que en el Urabá Antioqueño, principal región de Colombia productora de banano tipo exportación, este cultivo es el principal factor estabilizador social de la región, ya que es la fuente generadora de empleo, mas importante. En la obtención de este producto se generan unos 15.000 empleos directos y unos 50.000 indirectos alrededor del transporte de la fruta, la fabricación de las cajas de cartón para su embalaje, bolsas y fibras sintéticas para la protección de los racimos y amarre de las plantas en campo respectivamente (Augura, 2001).

Para lograr mantener la competitividad, frente a países como Ecuador, Costa Rica; primer y segundo productor respectivamente y potenciales exportadores como Brasil, Venezuela, a si como la estabilidad social de las zonas de producción, los productores necesitarán estar informados. La correcta manipulación de la información, les permitirá diseñar estrategias tendientes a disminuir el riesgo, así como el mejoramiento de la competitividad y eficiencia del **sistema** banano.

Entiéndase **sistema** como, aquella unidad agrícola abierta, compuesta por factores como el suelo, variedades, plagas, enfermedades, el clima, entre otros, interactuando entre si e influenciando el sistema. Estos, desde el punto de vista del hombre y de la escala, pueden ser o no manejables, además de positivos, o no, según afecten, o no, la **eficiencia** del sistema, medida en términos de algún indicador, que pueden ser los rendimientos (cajas/haxaño).

En el caso del banano, factores que permanentemente están impactando negativamente el sistema, son por ejemplo la sigatoka negra, su control es principalmente químico y cuesta alrededor de los US \$ 40 millones al año; la nutrición del banano, tiene un costo entre los US \$ 10 y 15 millones al año, el agua libre en el suelo, los vientos, entre otros aspectos.

Las relaciones de estos factores implican, flujos, ciclos por ejemplo de nutrientes, de plagas, de enfermedades, de agua, etc, transformaciones y almacenamientos de materia y energía; como ejemplo se tienen los productos agrícolas que el hombre consume (Cambrella, et al 1996). Todos estos factores en el sistema banano, son variables que deben ser entendidas en el espacio y en el tiempo a fin de mantener el sistema en equilibrio económico, ambiental y social.

## 2 Estado del Arte

### 2.1 El estado actual del sistema banano

#### **Problemática**

Es bien sabido que en general los sistemas de producción tropical presentan una alta variabilidad y el banano no escapa a esta realidad. Los agricultores bananeros han identificado desde hace décadas la existencia de **variabilidad espacial y temporal**, en las propiedades del suelo, el agua, las plagas, las enfermedades a sí como de los rendimientos en las plantaciones de banano.

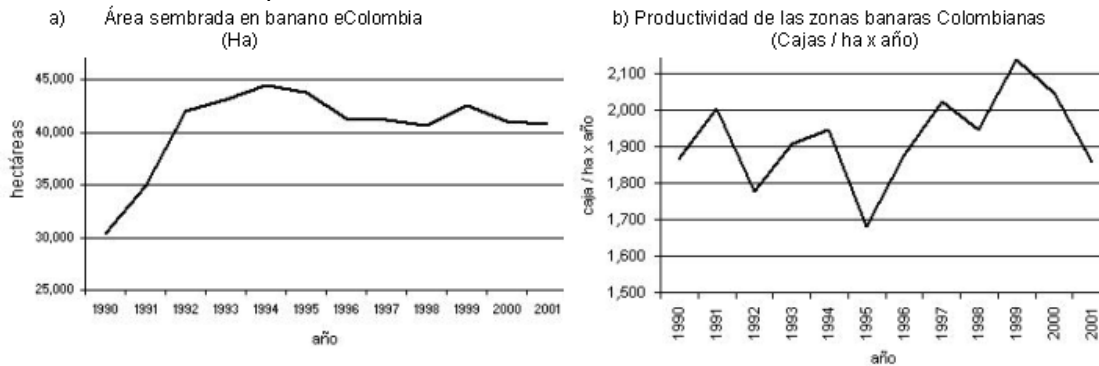
El comportamiento del área dedicada al cultivo del banano en Colombia, presentó un ascenso vertiginoso a principios de la década del 90, alcanzando su pico máximo en el año 1994 con aproximadamente 45.000 hectáreas, a partir de allí, se dio un leve descenso estabilizándose alrededor de las 41.000 hectáreas.

Por otra parte, el comportamiento de la productividad expresada en cajas / ha x año (donde: 1 caja =18 kg), es variable a través del tiempo. Por ejemplo en la primera mitad de la década del 90 el comportamiento de la productividad fue descendente, mientras que en la segunda fue ascendente, lográndose en el 99 un pico máximo superior a las 2000 cajas / ha x año. A partir de este año la productividad viene en descenso, comportamiento que no ha cambiado (Augura, 2001), ver figura 2.1.

Estas variaciones en la productividad han sido de tal magnitud que, incluso en años donde hubo incrementos de área cultivada, el volumen de cajas producida fue menor respecto a años anteriores. Como consecuencia directa, son los menores ingresos percibidos por el productor bananero. Asumiendo que este, no ha cambiado el manejo del cultivo, es decir, las cantidades usadas de insumos y mano de obra son estables, entonces los costos de producción por unidad de área, tendrán como factores de cambio el costo de los insumos y la mano de obra en el mercado. Es bien sabido que en Colombia la tendencia de estos es a subir, por lo que en muchos años la rentabilidad del cultivo ha sido menor frente años anteriores.

Si ya sabemos que los rendimientos son variables, en el espacio y en el tiempo, debemos comenzar ahora a resolver las siguientes preguntas: que factores están impactando el sistema banano y cual es el aporte de cada uno de estos a la variabilidad?, que tanto conoce el productor bananero estos factores y que tan importantes son para el?, son estos internos o externos al sistema y que tanto pueden ser manejados?, podemos monitorear cada uno de estos y cuales serian las herramientas disponibles o en caso de no existir es posible desarrollar una?, es la nueva información implementable en el sistema banano, en términos de costo – beneficio?.

**Figura 2.1:** Comportamiento del área sembrada y de la productividad del banano Colombiano en el tiempo.



Puede decirse que los productores bananeros más avanzados han realizado el manejo de la nutrición, basados en el contenido **promedio** de nutrientes, control de plagas y enfermedades basados en los porcentajes o grados promedios de infestación y estimado la producción, como producción promedia de los lotes. Estos métodos de diagnóstico, tratan de definir el manejo de estas variables, sobre la premisa de que la variabilidad intrínseca del factor (nutrición, plaga, enfermedad, producción) queda bien cubierta cuando se muestrea para estimar la media, por lo que para obtener rendimientos altos es preciso de la utilización de altas cantidades de agro-insumos.

Sin embargo formas particulares de manejo en cultivos diferentes a banano, han permitido obtener rendimientos altos, en forma sostenida. Este nuevo tipo de manejo aparece porque los rendimientos promedio, no están sobrepasando las expectativas del productor o se obtienen rendimientos bajos en suelos con contenidos altos de nutrientes. El manejo entonces del sistema banano basado en la media, no es suficiente para mantener rendimientos altos y sostenidos en el tiempo, estos no están considerando: 1- la variabilidad espacial y temporal de las características de interés, 2- los factores que causan tal variabilidad y 3- una forma de manejo acorde a la variabilidad espacio-temporal del sistema.

## 2.2 Manejo por sitio específico

La aplicación, de principios y tecnologías que permitan observar, conocer y manejar, **espacial** y **temporalmente** la **variabilidad** de los factores que intervienen en los sistemas agrícolas, para hacer las cosas en el momento preciso, en el sitio específico y de la manera correcta, es lo que se conoce como **agricultura de precisión** (AP) o manejo por sitio específico. Con la AP se busca lograr un mejor desempeño y calidad ambiental del sistema. La tecnología en la cual se basa el manejo por sitio específico es la siguiente: los **computadores**, los **sistemas de información geográfica** (SIG), los **sistemas de posicionamiento global** (GPS), los **sensores** y **control**. Toda esta tecnología deberá permitir la captura, almacenamiento, alimentación, manipulación, análisis y despliegue espacio-temporal, de todas las formas de información relacionadas con el sistema de estudio (Cambrella, et al 1996; Pierce and Nowak, 1999; Florax et al 2000).

Sin embargo, aun no es generalizado el uso de la agricultura de precisión (AP); uno de los argumentos, de las bajas tasas de adopción, se basa en que, su beneficio es insuficiente para justificar el costo. Esto parece quitar cualquier posibilidad de desarrollar AP en países en desarrollo, donde la rentabilidad es mucho menor, que en las economías desarrolladas; sin embargo Cook, et al 2004, postulan que el propósito básico de la AP, es suministrar información espacial, para reducir la incertidumbre, diciendo además que lejos de ser considerada como lujosa, debería ser vista como esencial para acelerar el cambio en los países en desarrollo (Cook, et al 2000). Otro de los obstáculos presentados en los sistemas tropicales es la ausencia de métodos ya implementados que permitan tanto evaluar la variabilidad espacial y temporal, como la aplicación variable de insumos.

Representa entonces un reto para los productores bananeros, la adopción del manejo por sitio específico, teniendo presente los errores cometidos en los países desarrollados y en otros cultivos. La tecnología esta limitada por el alto costo inicial, la escala y por un bajo conocimiento de las herramientas por parte de los operarios relacionados con el sistema. Uno de los aspectos mas críticos, será el monitoreo de rendimiento dado que este cultivo se cosecha manualmente. Es preciso iniciar la implementación con sistemas de menor tecnología y que dependa del conocimiento y soporte del productor.

## 2.3 Bases para el manejo agronómico del sistema banano por sitio específico

El manejo por sitio específico, es la tecnología que suministrará información y herramientas para el manejo espacial y temporal de la variabilidad dentro del sistema banano, para luego determinar el impacto de esta variabilidad en el rendimiento.

Cochrane, (1993) citado por Plant (2001), dice que el uso general y sostenido de la tecnología es posible, si esta se traduce en una ventaja económica. Muchos agricultores decidirán adoptar prácticas de manejo por sitio específico y comenzaran a adquirir y aprender a usar la tecnología, cuando ellos estén convencidos de que el tiempo y el dinero invertido este justificado en un incremento en los rendimientos o en una disminución de los costos o del riesgo (Plant, 2001). Miller et al. (1999), citado también por Plant (2001), lista tres criterios, que deben ser cumplidos para que el manejo por sitio específico se justifique. Estos son: 1- es significativa y nueva la variabilidad espacial en el campo de los factores que están afectando la producción; 2- las causas de la variabilidad, pueden ser identificadas y medidas; y 3- la nueva información puede ser usada para modificar las practicas de manejo e incrementar el beneficio económico o ambiental en el sistema agrícola.

El **rendimiento**, es un buen **indicador biológico** de variabilidad espacial y temporal en el sistema banano; ya que integra, el impacto acumulado de las variables naturales como el agua, las plagas y enfermedades, los insumos utilizados, el clima, el manejo e incluso las variables económicas (Clark and MC Guckin, 1996), razón por la cual es de suma importancia la cuantificación exacta de los rendimientos en cada una de las sub-unidades de este sistema.

Una vez que se entiende el efecto de la variabilidad, se pueden diseñar estrategias que permitan manejarla, de modo que se incrementen los rendimientos, se mejore la rentabilidad y reduzca el potencial impacto ambiental de la actividad (Walter, et al, 1996 y Espinosa, 2000).

Teniendo en cuenta las observaciones anteriores, puede decirse que numerosas prácticas o actividades de manejo son consideradas parte del manejo por sitio específico o AP, en sus diferentes etapas de implementación. Estas prácticas son realizadas a través de diferentes tecnologías e incluyen tanto actividades de campo como de oficina. Las principales etapas durante la implementación de un programa de AP son: **Recolección e ingreso de información**, implica la medición de la topografía del suelo, muestreo de suelos en malla, recorrido de cultivos para la detección de plagas y enfermedades, monitoreo de rendimientos, medición directa de propiedades del suelo, clima y cultivos, sensoreo remoto de suelos y cultivos, digitalización de mapas. **Análisis de la información**, comprende el procesamiento e interpretación de la información, análisis de dependencias espacial y/o temporal, confección de mapas de evaluación, confección de mapas de prescripción, para la identificación de áreas problema, evaluación de las áreas problema. **Diseño de la estrategia de manejo**, consiste en la aplicación por sitio específico o uniforme según el caso de insumos como: nutrientes, plaguicidas, siembra diferencial de variedades y semillas. **Evaluación y control**, evaluar si las nuevas prácticas implementadas en el sistema, si incrementó los rendimientos y **realizar los ajustes** del programa de AP con la nueva información adquirida.

Se espera entonces que el manejo por sitio específico mejore la rentabilidad al incrementar los rendimientos y reducir el costo de los insumos y/o una mejor utilización de estos. El mejor manejo asegurará al productor bananero una producción de mejor calidad que también intervendrá en la rentabilidad.

## 2.4 Sensoreo remoto o teledetección

Senay et al, (1998), citado por Plant, (2001), diferencia tres formas de medir la variabilidad espacial en campo estas son: continuas, discretas sobre el suelo y remotamente a través de sensores remotos. Se detallara aquí la forma relacionada con sensoreo remoto.

La teledetección o sensoreo remoto permite adquirir información a distancia de los objetos sobre la superficie terrestre, a través de un **sensor** ubicado en una **plataforma** (globo, aeronave, o satélite). Esta tecnología es una herramienta potencialmente importante para el manejo por sitio específico del sistema, ya que permite adquirir información espacial y temporal de manera detallada en el espacio y frecuente en el tiempo, que por los métodos de adquisición tradicional resulta difícil y dispendioso. Se espera que la variabilidad espacial y temporal presentada en la información remotamente adquirida sea consecuencia de las variaciones en las características del sistema agrícola.

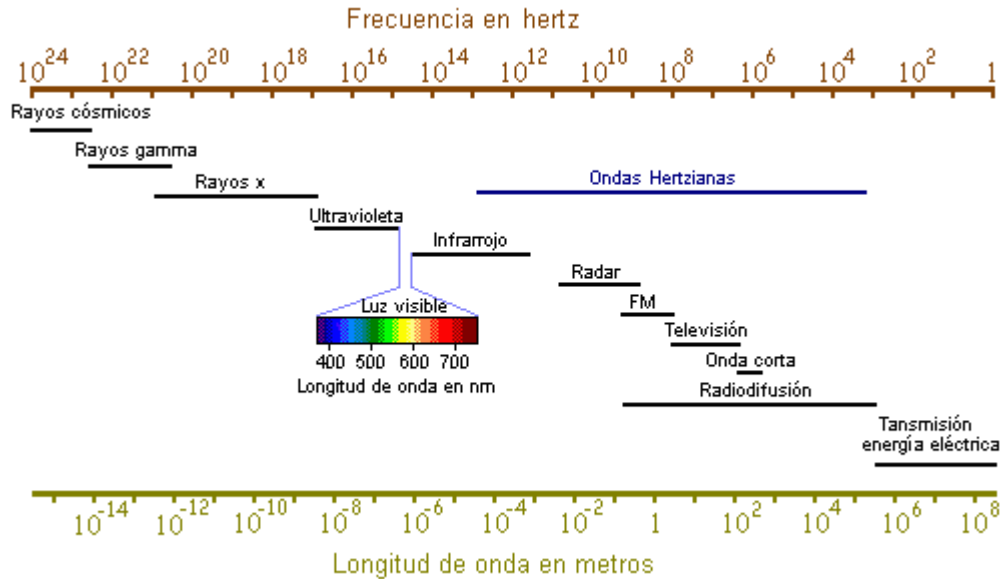
### 2.4.1 Espectro electromagnético

En la adquisición de información a distancia de los objetos, es de vital importancia la **energía radiante o electromagnética**. Las fuentes de radiación electromagnética pueden ser: naturales (el sol, la tierra, radioactividad) y artificiales (radar, láser, entre otras), además toda sustancia con temperatura superior al cero absoluto, emite radiación electromagnética como resultado de sus oscilaciones atómicas y moleculares. Este tipo de energía al interactuar con las diversas sustancias u objetos de la superficie terrestre, origina una serie de fenómenos como: reflexión, absorción, transmisión, luminiscencia, calentamiento; en el caso de la absorción la energía es reemitida, en diferente longitud de onda. En la práctica los procesos de emisión, absorción, reflexión y transmisión ocurren simultáneamente y sus intensidades relativas caracterizan la sustancia u objeto investigado (Chuvienco, 2000).

La teledetección implica la medición de la energía reflejada o emitida por los objetos, sin entrar en contacto con ellos. La energía viaja por el espacio como ondas electromagnéticas. Cualquier tipo de energía radiante se puede definir en función de su longitud de onda o frecuencia. Aunque la sucesión de valores de longitud de onda es continua, suelen establecerse una serie de bandas en donde la radiación electromagnética manifiesta un comportamiento similar. La organización de estas bandas de longitudes de

onda se denomina espectro electromagnético. Desde el punto de vista de la teledetección las bandas espectrales más comúnmente empleadas son las correspondientes a: espectro visible (0.4 y 0.7  $\mu\text{m}$ ), infrarrojo cercano (0.7 y 1.4  $\mu\text{m}$ ), infrarrojo medio (1.4 y 8  $\mu\text{m}$ ), infrarrojo lejano o térmico (8 y 14  $\mu\text{m}$ ) y las microondas (a partir de 1  $\mu\text{m}$ ) (Schneider and Young), ver figura 2.2.

**Figura 2.2:** espectro electromagnético



Cada objeto o grupo de objetos, examinados por percepción remota refleja un único espectro de longitudes de onda, con el cual puede ser caracterizado. En el diagnóstico de cultivos agrícolas, se debe determinar el espectro característico del cultivo para cada etapa de crecimiento. Se espera que plantas sanas, reflejen mas radiación en el verde que plantas enfermas, marrones o amarillas.

## 2.4.2 comportamiento espectral de las plantas

### ➤ Visible (VIS)

Las hojas absorben la mayor parte de la energía incidente en las bandas visibles (0,4 – 0,7  $\mu\text{m}$ ). La baja reflectividad en el azul y el rojo se atribuye normalmente a la absorción por la clorofila y otros pigmentos accesorios. La clorofila, carotenos y xantofilas absorben radiación a 0,445  $\mu\text{m}$ , pero sólo la clorofila absorbe en el rojo (alrededor de 0,645  $\mu\text{m}$ ) (Gates, 1980).

El pico del verde se produce por una carencia relativa de absorción por estos pigmentos, lo que proporciona el color verde de las plantas que percibe nuestra vista (Thomas, et al, 1971). En general la reflectividad en el VIS es más alta, entre otras razones por la dispersión Rayleigh.

### ➤ Infrarojo cercano (IRC)

La alta reflectividad de la vegetación en esta banda del espectro se ha asociado tradicionalmente al estado de vigor de la planta, porcentaje de cobertura verde y al buen estado foliar. Modificaciones en el contenido de agua de las plantas, senescencia, pérdida de hojas, son más cruciales en esta banda debido a que implica modificaciones en el vigor y al mismo tiempo, refleja el estado de las plantas en su conjunto.

Cuando la planta en su conjunto deteriora su actividad fisiológica al llegar a extremos de tensión, implica en esos casos una notable reducción de la reflectividad en esta banda. Sin embargo en el IRC una sola hoja seca tenderá a presentar una mayor reflectividad (Everitt and Nixon, 1986; Bowman, 1989; Carter, 1991).

Conviene tener en cuenta que la alta reflectividad de las hojas en el IRC (entre 0,7 y 1,4  $\mu\text{m}$ ) se debe a su estructura celular interna. La radiación se difunde y dispersa a través de la cutícula y la epidermis a las células del mesófilo y cavidades de aire del interior de las hojas. La radiación posteriormente es dispersada por reflexiones y refracciones múltiples en la interfase de las paredes de las células hidratadas con los espacios de aire intercelulares, debido a las diferencias existentes en el índice de refracción (1.4 para las células hidratadas y 1.0 para el aire). Entre el 40 y el 60 % de la radiación incidente en el IRC se dispersa hacia arriba (ésta es la radiación reflejada), mientras que el resto se dirige hacia abajo (radiación transmitida), absorbiéndose muy poca cantidad (Knipling, 1970). Al irse perdiendo agua en las hojas, hay más superficie de contacto entre paredes de células húmedas y cavidades de aire intercelulares, por lo que tienden a aumentarse las reflexiones y refracciones múltiples (Vogelmann y Björn), incrementándose ligeramente, la reflectividad.

Cuando las hojas se acercan a la pérdida total de humedad, la reflectividad es incluso mayor debido a que el índice de refracción de los materiales celulares secos es mayor que el de las células hidratadas. Este efecto se ha comprobado en análisis de laboratorio sobre hojas aisladas de *Agave deserti* (Hunt, et al, 1987) y sobre pino y secuoya (Westman y Price 1988). Esta disminución parece más claramente debida a los efectos secundarios de la pérdida en el contenido de humedad, como son la reducción de la actividad vegetativa (transpiración, fotosíntesis, productividad) y al deterioro en el área foliar y la estructura de la hoja. Esto ha permitido observar notables decrementos de reflectividad en el conjunto de la planta (Jackson y Ezra, 1985 y Westman y Price 1988). No obstante algunos autores no observan cambios significativos en esta banda (Vogelmann and Björn).



### ➤ Infrarrojo medio (IRM)

La respuesta de la vegetación en estas longitudes de onda está dominada por la absorción del agua, la cual se produce principalmente en 1.4, 1.9 y 2.4  $\mu\text{m}$ . En esta región, los picos de reflectividad de la vegetación se originan aproximadamente a 1.6 y 2.2  $\mu\text{m}$ , justo entre las bandas de absorción del agua, de ahí que al disminuir el contenido de humedad la reflectividad aumente. Esto se debe a que el agua es un buen absorbente del flujo de radiación incidente, por lo que la cantidad de energía solar reflejada en esta región es una función inversa de la cantidad de agua presente en la hoja (Knipling, 1970).

En resumen la literatura reporta que la reflectancia de las hojas responde a las condiciones de crecimiento de la planta, las cuales están relacionadas con las condiciones ambientales. Una planta con un crecimiento y desarrollo inhibido, tiende a presentar una mayor reflectancia, en el espectro visible (480-760 nm) o infrarrojo (760-2500 nm), frente a una planta normal. Este cambio en la reflectancia ha sido reportado como una respuesta de la planta a agentes de estrés biológicos o fisiológicos (Gates, 1980 y Carter, 1991).

Estudios de reflectancia realizados sobre plantas estresadas y normales bajo condiciones de campo, sometidas a diferentes agentes de estrés bióticos como competencia de plantas de *Pinus taeda* L., presencia de la enfermedad mildew polvoso en plantas de *Euonymus japonica* variety Aureo-marginata, infección insuficiente con hongos ectomicorriza en plantas de *Pinus elliotii* Engelm, y senescencia en *Quercus virginiana* Mill (roble); muestran diferencias en la reflectancia, particularmente en el verde (491 – 575 nm), cerca de los 550 nm y en el rojo (647 –760), cerca de los 710 nm, incrementando consistentemente en respuesta al estrés y es independiente del agente y de la especie. En el mismo estudio se evaluó también exposición a herbicidas de plantas *Diospyros virginiana* L. (caqui), alta concentración de ozono en pino, crecidos en suelo arenoso y salino y cortos periodos de deshidratación en plantas de *Arundinaria recta*. El estudio indica que la reflectancia aumenta considerablemente al rededor de los 409 nm en respuesta al daño por herbicidas. Con respecto a la deshidratación, la máxima diferencia se presenta en el amarillo (575 – 585 nm) a 584 nm. También presentó una mínima diferencia alrededor de los 670 nm en todos los casos. La reflectancia en el infrarrojo generalmente no cambia con el estrés. Sin embargo se presentan excepciones en la reflectancia en el infrarrojo con la infección del hongo y particularmente con la deshidratación a 40 %, la mayor diferencia ocurre cerca de los 1400, 1900, 2000, y 2400 nm (Carter, 1991).

La sensibilidad de la reflectancia indica la longitud de onda en la cual hay una respuesta lineal del detector, tal como una película fotográfica, podría muy probablemente detectar una respuesta de reflectancia para plantas

estresadas. La sensibilidad es mayor en el naranja (585 – 647 nm) y en el rojo, excepto para los picos en el violeta y el verde que acompañan el daño por herbicidas. Igual comportamiento para los rangos 545 – 640 nm y 685 – 700 nm excepto para los máximos obtenidos al rededor de los 409 nm, inducidos por el daño de herbicidas. Se obtiene poca sensibilidad alrededor de los 670 nm en todos los casos.

La clorofila se relaciona positivamente con el máximo declive en el espectro de reflectancia de las hojas; este punto es denominado borde rojo. El espectro de reflectancia de agujas de pino medidas en el campo y la concentración de clorofila de las mismas agujas se midió en laboratorio, mostrando una relación fuerte entre el borde rojo y la concentración de clorofila ( $r^2=0.82$ ,  $n=152$ ); concluyéndose entonces que el borde rojo puede ser empleado para estimar la concentración de clorofila en agujas de pino en el campo con una confiabilidad similar a la obtenida en las mediciones convencionales de los laboratorio (Kinipling, 1970).

### 2.4.3 El sensor

Entre los sistemas empleados para la percepción remota de objetos sobre el terreno, están los sensores **pasivos**, cuando estos se limitan a recibir la energía de un foco exterior a ellos y los **activos** cuando son capaces de emitir su propio haz de energía, como ejemplo tenemos el radar. En los sensores pasivos a su vez se considera el procedimiento para grabar la energía recibida, entonces estos pueden ser sensores **fotográficos**, **óptico-electrónicos** y de **antena** (Chuvienco, 2000).

Las cámaras fotográficas son un medio muy utilizado en teledetección especialmente desde plataformas aéreas. Funcionan básicamente por la impresión de un objeto sobre emulsiones fotosensibles con la ayuda de un sistema óptico que permite controlar las condiciones de exposición. La configuración de este sistema depende de cuatro elementos: tipo de **película**, número de **objetivos**, **ángulo** de observación y **altura** de la plataforma.

Respecto al tipo de película, el mas empleado en fotografía aérea es el film pancromático (blanco y negro); otros son a color y en infrarrojo blanco y negro, que recogen en tonos de gris la radiación correspondiente al infrarrojo cercano. En cuanto al número de objetivos, puede tratarse de una cámara mono o multibanda, que permita la discriminación de una o varias regiones del espectro simultáneamente. En lo relacionado al ángulo de observación, se tiene la fotografía tomada perpendicularmente al terreno (con desviaciones de 5°); empleada para la restitución fotogramétrica así como en estudios temáticos muy variados. La fotografía oblicua, tomada con un ángulo de visión menor de 90° y tiene principalmente un fin estético. La altura de observación permite separar la fotografía en aérea y espacial. Las

diferencias más significativas entre ambas se relacionan con la resolución espacial, nitidez, cobertura del terreno y precisión geométrica. Las dos primeras favorecen la fotografía aérea y las dos últimas a las espaciales.

En el caso de equipos óptico electrónicos, no existe la matriz de grabación, se genera una imagen digital, la cual es una imagen discretizada tanto en las coordenadas espaciales como en el valor de radiancia.

#### 2.4.4 Análisis de imágenes

El término imagen, se refiere a una función bidimensional  $f(x,y)$  de la intensidad, donde  $x$  e  $y$ , son las coordenadas espaciales y el valor de  $f$  en cualquier punto  $(x,y)$ , es proporcional a la intensidad o nivel de gris de la imagen en ese punto. Este valor depende, de las características de los objetos así como de las condiciones de iluminación, la época del año, hora del día, por ende, también está afectado por la **resolución** de la imagen, entendida como, el área promedia de terreno cubierta por un píxel.

La interpretación e identificación de las características de interés en la imagen puede ser realizada de forma, manual o visual por un interpretador humano, empleando formato tipo fotográfico o pictórico, en otras palabras formato análogo. Las imágenes también pueden ser representadas en un computador como arreglos de píxeles, en donde cada uno corresponde con un nivel de intensidad, de acuerdo con la escena representada y su análisis puede ser realizado, manualmente, semi-autónomo o autónomamente, según la participación o no de un interpretador humano.

##### ➤ Aspectos básicos en la interpretación de imágenes

**La escala**, definida como la magnitud o nivel de abstracción a la cual un objeto puede ser descrito. Esta determina la ocurrencia o no de cierta clase de objetos, así como su apariencia.

**La semántica**, es un aspecto importante en el contexto de la información. En el contexto **global**, se describe la situación de la imagen, básicamente, el sensor, tiempo y localización. En el contexto **local**, se describe las relaciones o el significado mutuo de las regiones en una imagen. También en el contexto de la información consciente o inconscientemente la percepción humana contribuye a mejorar las posibilidades, de éxito.

El **procesamiento**, consiste en el mejoramiento de la imagen con el propósito de incrementar la probabilidad de éxito en los pasos del **análisis**, los cuales generalmente son realizados de manera semi – automática, con el objetivo de asistir y complementar a un experto humano.

**La segmentación**, entendida como el proceso que permite la extracción de la información subyacente, en la imagen. Fu, 1985, citado por Pajares, 2002; Dice que la segmentación esta basada en dos principios fundamentales, discontinuidad o segmentación orientada a bordes y similitud o segmentación orientada a regiones.

Una **región**, es un área de la imagen en la que sus píxeles poseen propiedades similares de intensidad, color, forma, entre otras características, mientras que un **borde** es una línea que separa dos regiones, con diferentes propiedades (discontinuidad) (Pajares y De la Cruz, 2002). Ambos principios implican una manipulación de la información contenida en los píxeles de la imagen, mediante ciertas funciones de transformación u operadores. En el caso de la detección de bordes, operadores muy utilizados, son los de primera y segunda derivada, así como los morfológicos. En la detección de regiones se emplean algunas técnicas como: la binarización basada en el uso de umbrales, crecimiento de regiones mediante la adición de píxeles, división de regiones, similitud de textura, color, o niveles de gris. Estas se basan en el hecho de la similitud de ciertas áreas o zonas constituidas por agrupaciones de píxeles conectados entre si, pero además, dichos píxeles presentan propiedades o características comunes.

Un nuevo principio en el análisis de imágenes, se fundamenta en la, orientación a objetos o segmentos y no en píxeles individuales, para el análisis de esta. El hecho esta motivado, en que el resultado esperado es la extracción de objetos con propiedades y características espectrales, de forma, textura, entre otras, similares a los presentados en el mundo real.

El trabajo en red con los objetos se conecta directamente con la representación de la información de la imagen por medio de sus objetos. Esto es, mientras las relaciones topológicas de píxeles individuales adyacentes están dadas implícitamente por el raster, la asociación de objetos adyacentes, debe explícitamente establecerse por fuera, en orden a determinar los objetos vecinos. En consecuencia la relación topológica del trabajo en red con objetos, tiene la gran ventaja de permitir la propagación eficiente de muchas clases de información relacional. En este sentido es muy importante que la resolución promedio de los objetos de la imagen, permita su representación a diferentes escalas de acuerdo con el tamaño de los objetos y del interés. Las relaciones de los objetos dentro y entre varias capas de una misma imagen a diferentes escalas, facilita el análisis y contribuye a la extracción de información adicional, como la existencia de estructuras, un aspecto de la geometría y topología de fractales en la naturaleza y por tanto en las imágenes.

**La clasificación**, consiste en la asignación de un número de objetos a una clase de acuerdo a su descripción, que no es mas que el establecimiento de las propiedades o condiciones típicas a cumplir para la clase deseada. Los

objetos quedan entonces clasificados o asignados, de acuerdo al cumplimiento o no de estos criterios.

Entre los tipos de clasificadores se tienen:

**Clasificadores duros**, utilizados en sensorio remoto, como los de máxima probabilidad, mínima distancia o del paralelepípedo, operan bajo una relación de pertenencia binaria; esto es 0 ó 1, para expresar si un objeto pertenece o no a una determinada clase. **Los clasificadores suaves**, como los sistemas difusos y/o los bayesianos, utilizan un grado o probabilidad de pertenencia entre 0 y 1, para expresar la asignación a la clase. Este hecho permite la pertenencia de un objeto a más de una clase, en diferentes grados. Los clasificadores suaves, permiten entonces expresar el conocimiento ambiguo humano, acerca del mundo.

Estos métodos a su vez, según la intervención o no del usuario pueden ser diferenciados como **supervisados** o no. Los métodos supervisados preguntan al usuario por las clases que desea ver y son entrenados por este, mientras que los no supervisados son independientes del usuario. Además estos pueden considerarse como métodos de agrupamiento estadístico o de ordenación por propiedades de los objetos.

## 2.5 Usos agrícolas de la fotografía aérea

Las enfermedades, plagas, problemas nutricionales, entre otros factores, son aspectos críticos en el desarrollo fisiológico y anatómico de las plantas en general, y pueden afectar por ejemplo el contenido de agua, la fotosíntesis, la transpiración, concentración de iones y de CO<sub>2</sub>, esto a su vez, puede implicar cambios en la temperatura, color y morfología (rizado) de las hojas, todos estos parámetros resultan claves cuando se pretende determinar condiciones de estrés de las plantas. Algunas de estas variables pueden ser estimadas mediante sensorio remoto, puesto que permiten detectar los cambios de la radiación reflejada o emitida por la planta, lo cual resulta de gran utilidad para la predicción de rendimientos agrícolas, determinar condiciones de riesgo de plagas y enfermedades, entre otros aspectos. Para que dicha estimación sea posible, resulta preciso estudiar con detalle algunos de estos factores en la reflectividad de las hojas de las plantas con el objetivo de aislar las bandas más sensibles a la observación remota y determinar los niveles de afectación más críticos (Hale y Orcutt, 1987; Jackson, 1986). El problema radica en si esas modificaciones del comportamiento espectral de la planta son suficientemente nítidas, de tal forma que permitan discriminar un factor o conjunto de factores de interés de otros que no lo son, como la contribución del suelo, la morfología de la planta o de la atmósfera.

Hasta el momento, los análisis de reflectividad se han venido realizado de muy diversas maneras. Son más abundantes los análisis en laboratorio para

hojas individuales (Thomas et al, 1971; Cohen, 1991), aunque también existen estudios de laboratorio con grupos de hojas (Ripple, 1986). La radiometría de campo también se ha empleado en varios estudios (Everit and Nixon, 1986; Cibula, et al 1992). El análisis utilizando bandejas con hojas puede servir de puente para comparar los resultados de la radiometría de campo y del análisis de hojas individuales (Cohen, 1991). Pese a la mayor dificultad de las mediciones de campo, al ser más difícil de controlar los parámetros de observación, resultan los más adecuados para relacionar con la información tradicionalmente adquirida de los sistemas agrícolas ya que ofrecen condiciones más similares de adquisición teniendo en cuenta los efectos de la atmósfera y el contexto general del sistema de estudio.

A nivel general la fotografía aérea se ha empleado en el mapeo para clasificaciones detalladas de coberturas naturales y seminaturales del suelo, clasificación de cultivos, en estudios de erosión a escala local, estudios de hábitat, en mapeo topográfico y planimétrico detallado de pequeñas áreas, mapeo de micro relieves, estudios hidrológicos.

Las fotografías aéreas también se han utilizado en el monitoreo de las condiciones del cultivo a través de las fases de crecimiento, estado fitosanitario, en el monitoreo de prácticas agrícolas, en el mapeo y predicción de la producción, mapeo de características del suelo entre otros usos. No obstante lo anterior debe aclararse que la mayoría de estos estudios han sido llevados a cabo principalmente en gramíneas, y son pocos los usos en sistemas tropicales.

Investigaciones llevadas a cabo por Colwell (1956), mostraron que podían emplearse fotografías aéreas en el infrarrojo para detectar la pérdida de vigor en trigo y otros cereales de grano pequeño, inducidas por una enfermedad. Los primeros procedimientos, en el análisis digital de información remotamente adquirida, desarrollados para identificar la contribución de la vegetación en una imagen fue el índice de relación de Vegetación (IRV). El IRV se basó en la relación de la reflectancia en el infrarrojo cercano (IRC) y la reflectancia en el rojo (Colwell, 1956, Jordan, 1969). La base de esta relación es la fuerte absorción (baja reflectancia) por la clorofila de la luz roja y baja absorción (alta reflectancia y transmitancia) en el IRC. A partir del IRV otros índices de vegetación han sido desarrollados para interpretar las imágenes aéreas. El índice normalizado de la diferencia de vegetación (INDV), donde  $INDV = (IRC - rojo)/(IRC + rojo)$ , fue inicialmente propuesto como un medio para estimar la biomasa verde (Tucker, 1979). La relación entre el INDV y la biomasa verde, parece estar fundamentada en la cantidad de radiación fotosintéticamente activa absorbida por el sistema foliar de la planta. El INDV relaciona la reflectancia en la región del rojo (cerca de la máxima absorción de la clorofila a) y el IRC, para estimar variables de la vegetación como índices de área foliar, cobertura y concentración de clorofila total (Field, et al, 1999; Shanajan, 2001).

Diferencias entre el canopy e incrementos en la temperatura del aire, así como decrecimientos en la conductancia del canopy, son efectos que crean un potencial para monitorear la conductancia del canopy a través de la medición de la temperatura del canopy. Estos cambios de temperatura se pueden sentir en el infrarrojo y pueden ser empleados en la programación del riego de un cultivo (Tucker, 1979).

La teledetección en el sistema banano jugará un papel importante en la obtención de información espacial y temporal de manera detallada y bien distribuida, con miras a establecer un programa de manejo de este cultivo por sitio específico. La interpretación y análisis de las imágenes implica la evaluación de varios objetivos en una imagen, en aras de extraer información útil acerca de ellos. El objetivo en una imagen de un sistema de banano, puede ser un área clorótica, las líneas de plantas, o de drenajes, una extensión de agua. Estos deben ser distinguibles y contrastantes con las otras características alrededor de la imagen. El reconocimiento de estas características es la clave en la interpretación y extracción de información útil.

## **2.6 Beneficiarios**

Los productores bananeros son los beneficiarios directos de los resultados obtenidos en la presente investigación. Es claro también que los conceptos herramientas y metodologías trabajados pueden ser aplicados en la comprensión de factores altamente variables en el espacio y en el tiempo de otros sistemas agrícolas, pues son estas las que mayor riesgo representa para estos sistemas. En café, caña de azúcar y frijol el grupo uso de la tierra del Centro Internacional de Agricultura Tropical viene trabajando con la misma filosofía y con buenos resultados. Otro aspecto relevante son los bajos costos de los sistemas usados, lo que lo hace accesible a pequeños productores.

## **2.7 Hipótesis**

La hipótesis de trabajo consistió en demostrar que las imágenes aéreas de baja altitud y alta resolución, permiten monitorear indicadores tomados de manera tradicional durante el crecimiento de este, se demuestra adicionalmente que las imágenes aéreas permiten detectar estructuras espaciales existentes y no capturadas con los sistemas de monitoreo tradicional.

### **3 Objetivos**

#### **3.1 General**

Investigar el potencial de la información contenida en imágenes digitales de alta resolución para la caracterización de la variabilidad espacial y temporal de un sistema de banano durante el desarrollo de las plantas.

#### **3.2 Específicos**

**3.2.1** Analizar el impacto de diferentes factores bióticos y abióticos en el desarrollo de un sistema de banano.

**3.2.2** Adaptar una metodología para la obtención de imágenes digitales de alta resolución.

**3.2.3** Diferenciar precisamente en las imágenes digitales los tipos de cobertura vegetal.

**3.2.4** Cuantificar precisamente las características de la cobertura vegetal correspondiente a banano en las imágenes digitales.

**3.2.5** Evaluar el potencial de las características de la cobertura vegetal correspondiente a banano obtenidas a partir de las imágenes para sustituir metodologías tradicionales de evaluación del crecimiento de las plantas en un sistema de banano.

**3.2.6** Plantear recomendaciones para el uso de las imágenes digitales en el manejo específico por sitio en sistemas de banano.



## 4 Materiales y métodos

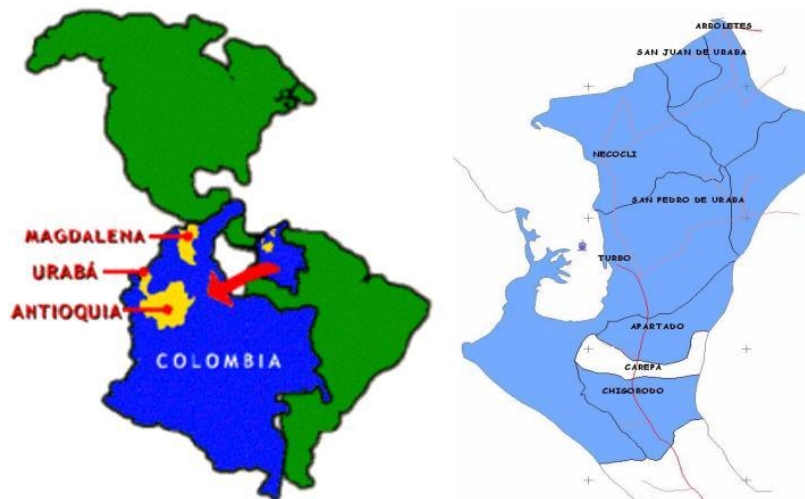
### 4.1 Información de campo y sitio experimental

#### 4.1.1 La región

El área de estudio, se ubicó en el centro experimental Tulenapa, el cual pertenece, al municipio de Carepa y es uno de cuatro municipios que conforman el denominado eje bananero. Estos se encuentran en el sector noroeste del Departamento de Antioquia hacia el flanco occidental de la Serranía del Abibe. Su cartografía corresponde a las cartas topográficas 79, 80, 90, 91 a escala 1: 100.000 del IGAC, extendiéndose de sur a norte entre las coordenadas 07°24' y 08°10' y de este a oeste entre las coordenadas 76°44' y 76°51'. El rango altitudinal oscila entre los 40 msnm en su parte mas baja y los 400 msnm en la mas alta. La zona comprende las cuencas hidrográficas de los ríos Chigorodó, Carepa, Vijagual, Zungo, Apartadó, Riogrande y Currulao. Las aguas se dirigen de occidente a oriente para encontrarse con el río León que las conduce hacia el Golfo de Urabá (ver figura 4.1).

**Figura 4.1:** Zonas bananeras de Colombia y municipios de Urabá, Antioquia

a) Ubicación de zonas bananeras, respecto a Colombia y America      b) Municipios de Urabá - Antioquia



Dos **unidades geomorfológicas** hacen parte de la zona bananera. **La planicie aluvial**, conformada por abanicos de piedemonte de la Serranía de Abibe. Esta planicie ocupa la mayor parte del área extendiéndose de sur a norte paralela a la serranía y subdividiéndose longitudinalmente en tres partes, (alta, media y baja); las cuales se diferencian entre sí por las condiciones de drenaje y textura de los materiales del suelo. **La depresión pantanosa**, es una franja que se extiende de sur a norte bordeando el río León, al sur y la costa del golfo, al norte. Por razones de su relieve plano – cóncavo y su baja posición, estos terrenos permanecen inundados la mayor parte del año.

Las zonas de vida predominantes son: el **bosque húmedo tropical (bht)**, esta formación ocupa aproximadamente el 40 % y se ubica al norte de la zona bananera, el **bosque muy húmedo premontano (bmh-PM)**, se ubica en la zona centro y comprende un 25 % y el **bosque muy húmedo Tropical (bmh-T)**, en el cual se asienta parte de la zona sur y representa aproximadamente el 45 % de la zona bananera.

En cuanto a **precipitación**, las isoyetas anuales, muestran un aumento longitudinal que oscila entre 2.000 mm en las cercanías de Turbo y 4.000 mm hacia la población de Mutatá. La zona bananera propiamente dicha presenta en promedio un total anual de 2.400 mm.

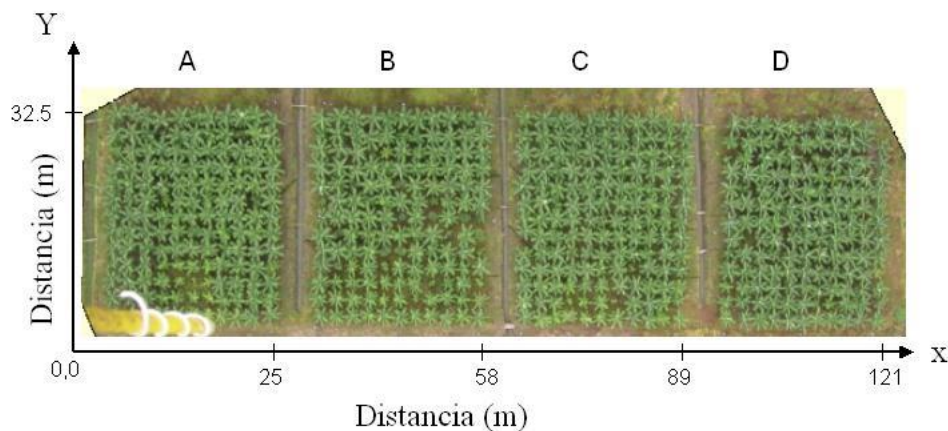
La fluctuación diaria de la **temperatura** a lo largo del año oscila entre 44.6°C y 19.8°C. La temperatura media multimensual no tiene variaciones significativas alrededor de su norma climatológica anual (26.5°C).

En lo relacionado con la **luminosidad**, la alta nubosidad predominante en la zona en las épocas de lluvia, hace que la radiación difusa prime sobre la directa. Los meses de mayor radiación directa son diciembre, enero y febrero con medias diarias mayores a 5.0 horas – sol. El total multianual de brillo solar es de 1.654 horas – sol.

#### 4.1.2 Diseño del experimento

En el centro experimental Tulenapa, propiedad de Corpoica, se adecuó un lote de 4500 m<sup>2</sup>. Este se dividió en cuatro parcelas de 42.5 x 25 m de largo y ancho respectivamente, para un área de 812.5 m<sup>2</sup> por parcela y de 4250 m<sup>2</sup> en las cuatro, los restantes 1250 m<sup>2</sup> corresponden al área cubierta por los canales de drenaje construidos, para evacuar el agua excedente, durante la época lluviosa (ver figura 4.2).

**Figura 4.2:** Vista aérea del lote experimental, parcelas A, B, C, D (Centro experimental Tulenapa- Coropica, Carepa-Antioquia)



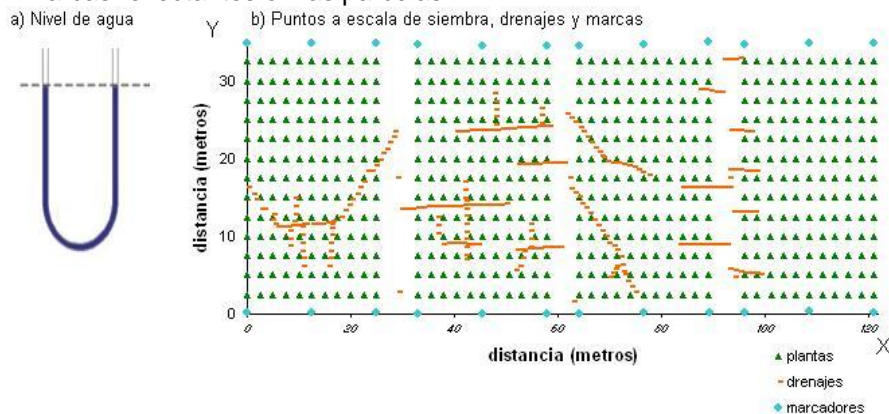
En cada parcela se ubicaron 144 plantas de banano, la semilla empleada pertenece al subgrupo Cavendish tipo gran enano y se obtuvo por cultivo *in vitro* de meristemas. Estas se plantaron en hoyos de 60 X 60 cm, a los cuales se les incorporó 1 kg de materia orgánica. Los hoyos fueron hechos a una distancia de 2.5 m entre ellos y entre surcos. Cada uno de estos y con estos a las plantas, se referenció de acuerdo con un sistema local de coordenadas en metros.

Cada parcela se señaló con 9 marcas reflectantes dispuestas en forma de malla a una distancia de 12.5 y 17.75 m entre ellas. Las marcas se referenciaron empleando el mismo sistema de coordenadas local adoptado en metros (ver figura 4.4).

#### 4.1.3 Micro-topografía

Se hizo un nivel, formando una columna de agua en una manguera plástica transparente, con los extremos libres, de tal forma que ambos estuvieran a la misma presión atmosférica y por ende al mismo nivel. Se seleccionó un punto cualquiera dentro de la parcela en el cual se estableció una altura arbitraria sobre el terreno que se referenció como cero. Empleando la columna de agua como nivel y respecto al punto de referencia, se estimaron las alturas relativas de todas las plantas y marcas reflectantes y algunos puntos sobre los drenajes. A cada altura se le hizo corresponder su respectiva coordenada, **x** e **y**, como se ve en la figura 4.3. Para evitar las alturas relativas negativas, se identificó el punto mas bajo del lote, a este punto se le hizo corresponder la altura 0 y a partir de este punto se ajustaron las alturas de los demás puntos tomados.

**Figura 4.3:** nivel de agua y distribución de puntos para la siembra de plantas, drenajes y marcas reflectantes en las parcelas

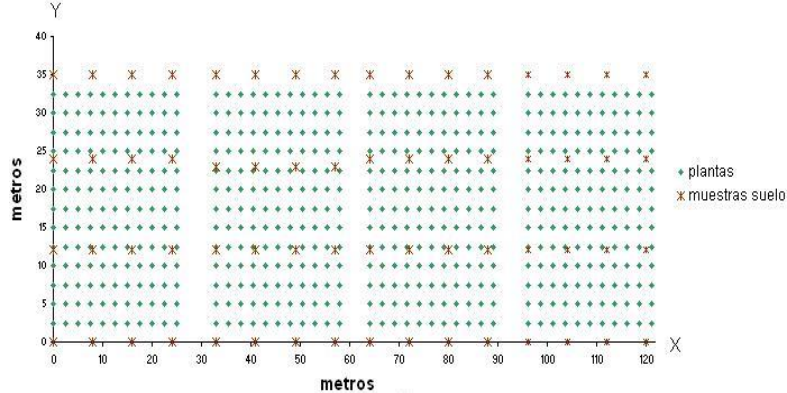


#### 4.1.4 Textura del suelo

En la determinación de la textura del lote experimental, se tomaron en malla 60 muestras. Los sitios de muestreo se seleccionaron con una separación entre ellos de 8 m en el sentido del eje **x** y 12 m en el de la **y**, de acuerdo con el sistema local de coordenadas adoptado. Para la toma de la muestra,

en cada sitio en una área de 40 x 40 cm, se removió las plantas y hojarasca fresca y con una pala se tomo 1 kg de suelo, de los primeros 40 cm de profundidad. En la figura 4.4 se muestra a escala, la ubicación de las plantas y los sitios de muestreo. Las muestras secas se analizaron en el laboratorio de Cenibanano para textura.

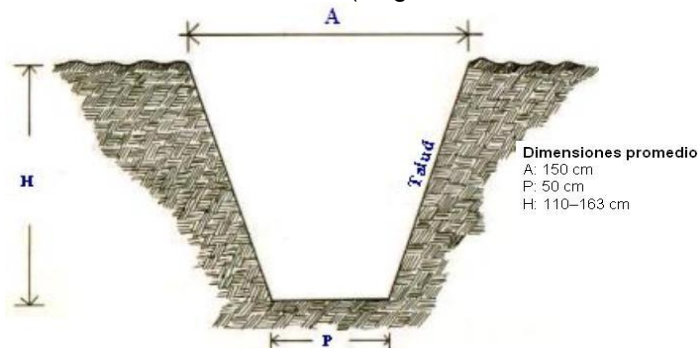
**Figura 4.4:** representación a escala de los puntos de muestreo para los análisis de textura



#### 4.1.5 Sistema de drenaje y distancias de los flujos de agua

Para la eliminación del excedente de agua requerida por el cultivo tanto del perfil como de la superficie durante y después de cada evento de precipitación, se construyeron cinco **canales terciarios** en orientación este oeste, los cuales desembocan en uno secundario existente y con orientación norte sur. Los canales en su parte mas alta se hicieron a una profundidad promedio, relativa a la superficie promedio del lote de 110 cm y en su parte mas baja a 160 cm, ancho superior e inferior promedio de 120 y 40 cm respectivamente, longitud promedio de 45 m y pendiente de 1.4; ver figuras 4.2, 4.3 y 4.5.

**Figura 4.5:** Sección de corte del canal (diagrama tomado de soto 2000)



Las aguas superficiales, se recolectaron, identificando visualmente las pequeñas áreas de micro relieve y construyendo canales cuaternarios o superficiales entre la micro-depresión y el canal terciario. En la figura 4.4 se

aprecia claramente la orientación, número y distribución de los canales construidos de este tipo.

## 4.2 El cultivo de banano

### 4.2.1 Manejo agronómico

**La preparación del terreno**, consistió de limpieza de la vegetación y una arada, rastrillada y nivelación del terreno. **Siembra**, el sistema empleado fue en cuadro; en hoyos con una separación de 2.5 x 2.5 m entre plantas e hileras respectivamente y 60 cm de profundidad; a cada uno de estos, se incorporó 1 kg de materia orgánica. Como semilla se utilizó plantas pertenecientes al subgrupo Cavendish tipo gran enano, obtenidas por cultivo *in vitro* de meristemas, las cuales estaban aclimatadas y tenían en promedio 4 hojas abiertas por planta; adquiridas a través de un distribuidor local. La siembra propiamente dicha se efectuó en la semana 9 del 2004.

**Fertilización**, del muestreo efectuado para el análisis de textura (ver numeral 4.1.1 textura), se obtuvo una muestra compuesta, la cual fue enviada al laboratorio de suelos de la Universidad nacional para su análisis químico. De acuerdo con estos resultados y con los requerimientos del banano consultados en la literatura, se diseñó el plan de fertilización que aparece en la tabla 4.1.

**Tabla 4.1:** Programa de fertilización por fecha, compuesto y cantidad a aplicar

FECHA	Urea	DAP	Cloruro de potasio	Dolomita	Sulfato de Amonio	Quelato de hierro	Agrototal (ml)			
							Cu	Zn	Mn	B
							gr/ planta			
							ml			
Feb-28	27	2.76	59.4	8.0	0.34	2.63				1
Mar-20	24	1.88	79.0	22.7	0.67	0.75				1
Apr-09	20	0.54	6.1	18.0	0.82	1				1
May-29	141	9.40	198.8	192.0	1.66	1.66				1
Jun-19	141	9.40	198.8	192.0	1.66	1.66				1
Jul-09	141	9.40	198.8	192.0	1.66	1.66				1
Aug-30	141	9.40	198.8	192.0	1.66	1.66				1
Sep-20	141	9.40	198.8	192.0	1.66	1.66				1

**Manejo de plagas y enfermedades**, no se presentó ningún problema de plagas de consideración, durante el periodo de evaluación. En lo relacionado a enfermedades, la única enfermedad presentada fue la de sigatoka negra, enfermedad ampliamente distribuida en la región de estudio y con mayor impacto económico, su manejo es básicamente químico, complementado con medidas culturales, como se describe a continuación.

**Manejo de la Sigatoka negra**, la decisión de controlar o no químicamente la enfermedad se fundamentó en el método de Stover modificado por Gauhl, de evaluación de la incidencia de la sigatoka negra. El método consiste en la cuantificación del estado de desarrollo de la enfermedad, según los síntomas



que causa en las plantas afectadas (tipo y número de lesiones, número de hojas afectadas, porcentaje de área foliar afectada y hoja más joven infectada). Empleando este método, semanalmente se estimó visualmente el área foliar afectada en todas las hojas de las plantas en evaluación, en este caso 16 plantas por parcela según se indica adelante en el numeral 4.1.2 muestreo. En la evaluación se consideró los seis grados que incluye la escala de Stover modificada por Gauhl (Stover, 1971; Gauhl, 1994), ver tabla 4.2.

**Tabla 4.2:** Escala de los grados de infección y área foliar afectada; para evaluar la Sigatoka negra (según Stover y Dickson 1970 y modificada por Gauhl 1989)

<i>Grado</i>	<i>Descripción del daño en la hoja</i>
1	Hasta 10 manchas por hoja
2	Menos del 5 % de área foliar enferma
3	De 6 a 15 % de área foliar enferma
4	De 16 a 33 % de área foliar enferma
5	De 34 a 50 % de área foliar enferma
6	Mas del 50 % de área foliar enferma

Se tuvo en cuenta todas las hojas presentes en cada planta con excepción de la hoja cigarro o candela y las hojas agobiadas o dobladas. Se enumeraron las hojas de cada planta de arriba hacia abajo; correspondió el número 1 a la hoja más cercana a la hoja cigarro, es decir la primera hoja completamente expandida, el número 2 a la segunda hoja y así sucesivamente hasta que se llegó a la hoja más cercana al suelo.

En la determinación del **área foliar enferma**, se estimó visualmente el área foliar cubierta por todos los síntomas de sigatoka negra en cada hoja y se calculó el porcentaje de la hoja cubierta por la enfermedad. Se anotó en la hoja de registro el número del grado que correspondió a cada hoja según la escala. Las hojas sin síntoma se consideraron como sanas y se registraron con un cero.

Se obtuvo el número promedio de hojas por planta, contabilizando el total de hojas y dividiéndolo por el número de plantas evaluadas o sea 16. El número de hojas por planta se extrajo de la última hoja evaluada en cada una; lo cual se indicó en el formato de evaluación. Para el cálculo de la **hoja más joven afectada** (HMJA), se sacó el promedio de las hojas más jóvenes que mostraron síntomas visibles de sigatoka negra. Se sumó el total del valor de la HMJA en cada planta y se dividió entre las 16 plantas evaluadas.

El **porcentaje total de hojas infectadas**, subestima la severidad de la enfermedad, no obstante el **promedio ponderado de infección** (PPI), permite una estimación más precisa. El PPI se obtuvo de la sumatoria de los productos del porcentaje de hojas en cada grado por su respectivo valor del grado en la escala de Stover modificada por Gauhl, y todo dividido entre 100.

El valor así calculado fue un indicativo de la incidencia y severidad de la Sigatoka negra en la plantación y se empleó como método de decisión para el control químico de sigatoka negra en todas las parcelas.

**Control químico de la sigatoka negra**, los productos empleados en el control de esta enfermedad, fueron: **funguicidas sistémicos** pertenecientes al grupo químico de los triazoles (tebuconazole, propiconazol, bitertanol, haxaconazol, fenbuconazole), pirimidinas (fenarimol), morfolininas (tridemorph) y estrobilurinas (azoxystrobin); **Protectantes** del grupo de los ditiocarbamatos (mancozeb) y derivados del isoftalonitrilo (clorotalonil). Estos se rotaron para evitar la selección de cepas resistentes a los productos. Las aplicaciones fueron terrestres con bomba de espalda impulsada con un motor a gasolina.

El control químico de la enfermedad estuvo complementado con prácticas como deshoje fitosanitario, despunte de las áreas foliares en estadios avanzados de la enfermedad y manejo de arvenses. Se anota aquí que estas prácticas tienen un impacto directo sobre el área foliar de las plantas de banano y muy posiblemente también sobre las características de los objetos visualizados en las imágenes como las áreas de estos. Sin embargo tres aspectos justifican estas actividades: 1- son labores que no pueden ser evitadas dada la severidad de la enfermedad; 2- usadas ampliamente en la zona como una herramienta de manejo de la sigatoka negra; 4- todos los métodos de evaluación fueron igualmente afectados.

**Prácticas culturales**, el manejo de **arvenses** se realizó durante los primeros tres meses mecánicamente con mache y luego químicamente con herbicidas para plantas de hoja ancha y angosta. Sobre las plantas de banano se efectuó también el **deshoje**, de aquellas hojas agobiadas o senescentes y el **deshije** o eliminación de yemas. Respecto al deshoje, como en el caso anterior, afecta características de las plantas como el área foliar, pero de nuevo son labores, indispensables para mantener la plantación en un estado fitosanitario aceptable, además de ser ampliamente usadas en la zona y todos los métodos en evaluación estuvieron igualmente afectados

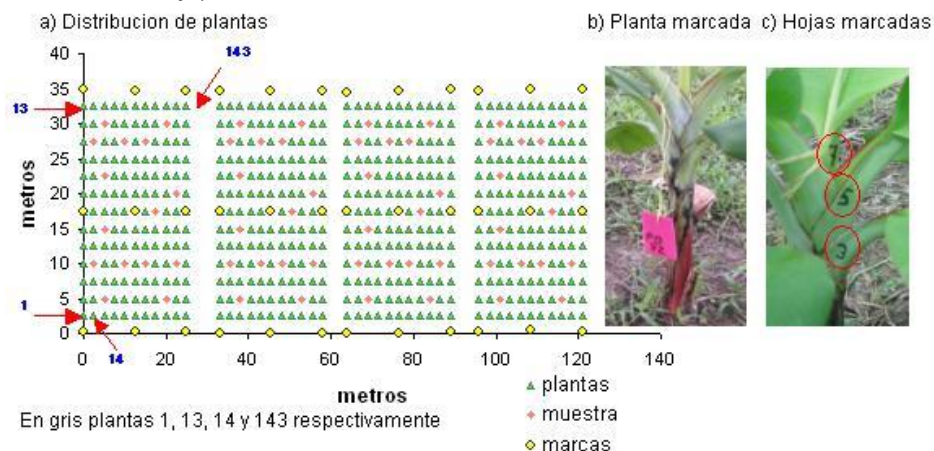
#### 4.2.2 Muestreo y métodos de evaluación del crecimiento

**Enumeración de plantas**, por convención a cada planta de cada parcela le correspondió un número de 1 a 144. Este se asignó en un solo sentido del eje **y**, e iniciando en el extremo izquierdo inferior de cada parcela y finalizando en el extremo derecho superior de esta, ver figura 4.6a.

**Muestra**, Se seleccionó una muestra de 16 plantas de manera aleatoria, patrón que se repitió en todas las parcelas, ver figura 4.6a puntos rojos. Cada planta se etiquetó con el número y la parcela que le correspondió ver figura 4.6b.

**Evaluación de hojas**, en cada medición se consideró, la mitad del total de hojas que tenía la planta al momento de la evaluación, para esto se marcó cada hoja alterna emitida como se aprecia en la figura 4.6c y sobre estas se efectuó la medición, según el método.

**Figura 4.6:** Distribución a escala en el lote experimental de plantas en evaluación (puntos en color rojo)



**Mediciones**, a partir de la siembra, la cual se efectuó en la semana 9 del 2003, se realizaron 4 mediciones, sin embargo 3 pudieron ser efectuadas satisfactoriamente para todos los métodos de medición y correspondieron con las semanas 20, 28 y 41 del mismo año. En cada medición se evaluó cada una de las variables contempladas por cada uno de los tres métodos propuestos y en validación, para la estimación del crecimiento de las plantas durante el establecimiento de un sistema de banano

**Métodos de medición**, se denominaron, imágenes, tradicional, y munsell, los cuales se describen a continuación con sus respectivas variables.

### ➤ Imágenes

El método, utilizó un equipo de adquisición de imágenes para la captura de escenas, con una **resolución** de 2048 por 1546 píxeles, a una **altura** entre 60 y 70 m de cada una de las parcelas. Las imágenes se **georeferenciaron** de acuerdo con el sistema local de coordenadas adoptado, para lo cual se hizo corresponder en cada una de estas, las coordenadas locales tanto de las marcas como de algunas plantas.

La **extracción de la información**, se basó en el análisis de imágenes orientado a objetos. El procedimiento consistió en la **segmentación** total de la imagen en regiones separadas y se basó en el método patentado de **segmentación multiresolución**, utilizado por eCognition®. Este emplea la técnica de fusión de regiones de menos a más, iniciando con objetos de un solo píxel, que en numerosos pasos, genera objetos de mayor tamaño. El procedimiento de optimización local empleado, minimiza la heterogeneidad



ponderada  $nh$  de los objetos resultantes; donde:  $n$  es el tamaño del objeto y  $h$  es una definición arbitraria de heterogeneidad. El valor de  $h$ , se constituye en un umbral y determina, si dos objetos se fusionan o no. Para lograr objetos adyacentes de tamaño similar comparables, el procedimiento simula idéntica y simultáneamente, el crecimiento de los segmentos sobre la escena en cada paso y así hasta obtener el resultado final.

Los criterios de heterogeneidad considerados por el método de segmentación son, la **heterogeneidad espectral**, que se calcula a partir de la sumatoria del producto de las desviaciones estándar por los valores espectrales ponderados de cada capa  $Wc$ .

$$(1) \quad h = \sum_c w_c \cdot \sigma_c$$

y la **heterogeneidad espacial**, criterio que reduce la desviación de acuerdo a la forma, específicamente por la optimización de la compactación y la suavización de los objetos resultantes .

La **heterogeneidad por compactación**, se describe por la relación entre el perímetro  $l$  y la raíz cuadrada del número  $n$  de píxeles que forman el objeto.

$$(2) \quad h = \frac{l}{\sqrt{n}}$$

La **heterogeneidad por suavización**, se describe por la relación entre el perímetro  $l$  del objeto y el perímetro  $b$  del cuadrado que circunscribe el objeto.

$$(3) \quad h = \frac{l}{b}$$

Los criterios de heterogeneidad son aplicados de manera conjunta. La función global  $f$  que integra tanto los parámetros espectrales como los de forma es:

$$(4) \quad f = w h_{color} + (1-w)h_{forma}$$

donde  $W$  es el **peso** definido por el usuario inicialmente para color y luego para forma entre 0 y 1.

**El criterio espectral** evalúa la variación en la heterogeneidad, para dos objetos fusionados, respecto a cuando no lo están, debido al cambio de las desviaciones estándar de los valores espectrales respecto a sus ponderaciones.

$$(5) \quad h_{color} = \sum w_c (n_{fusión} \sigma_c^{fusión} - (n_{obj1} \sigma_c^{obj1} + n_{obj2} \sigma_c^{obj2} ))$$

**El criterio de forma**, es entonces un valor que evalúa el acondicionamiento de esta respecto a dos modelos diferentes, compactación y suavización, describiendo una forma ideal.

$$(6) \quad h_{forma} = w_{compact} h_{compact} + (1 - w_{compact}) h_{suav}$$

Como en el caso espectral, la heterogeneidad de forma tanto para **compactación** como para **suavización**, causada por la fusión, se evalúa calculando la diferencia entre la situación después y antes de esta, de la siguiente manera:

$$(7) \quad h_{suav} = n_{fusion} \frac{l_{fusion}}{b_{fusion}} - (n_{obj1} \frac{l_{obj1}}{b_{obj1}} + n_{obj2} \frac{l_{obj2}}{b_{obj2}})$$

$$(8) \quad h_{compact} = n_{fusion} \frac{l_{fusion}}{(n_{fusion})^{1/2}} - (n_{obj1} \frac{l_{obj1}}{(n_{obj1})^{1/2}} + n_{obj2} \frac{l_{obj2}}{(n_{obj2})^{1/2}})$$

donde n: tamaño del objeto, l perímetro de la caja que lo circunscribe.

Las técnicas de segmentación en eCognition ®, permitieron la construcción jerárquica de objetos pudiendo representar la información de la imagen a diferentes resoluciones espaciales simultáneamente.

Cada objeto una vez terminado el proceso de segmentación queda caracterizado, tanto por atributos espectrales, como de forma, los cuales son evaluados a la escala de plantas para la estimación del crecimiento de las plantas existentes en lote experimental.

**La Clasificación**, de los objetos generados por el proceso de segmentación, se basa en el método de **clasificación difusa**, el cual transforma los valores de la característica de rango arbitrario en valores difusos entre 0 y 1 indicando el grado o probabilidad de pertenencia a una **clase** determinada. Cada clase se describió con un conjunto de características evaluadas a través de expresiones difusas. Al final del proceso cada objeto fue asignado exactamente a una clase.

**Tabla 4.3:** Descripción de las características evaluadas por el método de imágenes en cada una de las plantas.

Características de los objetos	Característica	Código
Valores de las capas	Brillo	Br
	Media del azul	Mean 1
	Desviación estándar del azul	SD 1
	Ratio del azul	Ratio 1
	Media del verde	Mean 2
	Desviación estándar del verde	SD 2
	Ratio del verde	Ratio 2
	Media del rojo	Mean 3
	Desviación estándar del rojo	SD 3
Características genéricas de forma	Ratio del rojo	Ratio 3
	Largo	L
	Ancho	W
	Largo / ancho	L/A
	Borde izquierdo	BL
	Índice de forma	SI
	Densidad	Den
Dirección principal	Mdir	
Forma basada en los polígonos	Asimetría	Asy
	Área	A
	Perímetro	Per
	Compactación	spComp
	Número de bordes	Noedges
	SD de la longitud de los bordes	SDLedg
	Promedio de la longitud de los bordes	AveLedg
Longitud del borde más largo	LenLEdg	

En la tabla 4.3 se detalla las características espectrales y de forma obtenidas para cada uno de los objetos al nivel de planta en todo el lote y para las tres mediciones, realizadas durante el periodo de evaluación del crecimiento de las plantas.

#### ➤ Tradicional

Este método emplea, altura de las plantas, número total de hojas emitidas (NHE), número de hojas por planta (NHP), diámetro del pseudotallo a 20 cm del suelo (DST20) y largo y ancho de las hojas (LHn y AHn respectivamente), para la evaluación del crecimiento de las plantas. Las variables relacionadas con las hojas se evaluaron, según se describió en evaluación de hojas y como se observa en la figura 4.6c.

#### ➤ Munsell

El método de medición empleado se basó en el sistema munsell, y básicamente para contrastarlos con las características de los objetos o plantas obtenidos en las imágenes. Para especificar el color de las hojas, tanto en su parte inferior como superior de la muestra de plantas, en cada una de las mediciones, las variables capturadas fueron, el matiz, la claridad y la pureza.

Para facilitar el análisis de los datos obtenidos con el método munsell, estos se pasaron al modelo CIE X Y Z desarrollado por la commission internationale de l'Eclairage). La CIE generó un nuevo conjunto de colores,

usando combinaciones tanto positivas como negativas de los primarios rojo, verde y azul. En este modelo un color es entonces especificado por sus coeficientes tricromáticos

$$(9) \quad x = \frac{X}{X + Y + Z}$$

$$(10) \quad y = \frac{Y}{X + Y + Z}$$

$$(11) \quad z = \frac{Z}{X + Y + Z}$$

Donde X: Rojo, Y: Verde, Z: Azul

### 4.2.3 Equipo

**Sistema de Adquisición de imágenes**, el sistema empleó una **cámara** fotográfica digital olimpus D40Z, ajustada a los siguientes parámetros: tiempo de exposición de 1/500 seg, apertura 8.0, ISO 200, longitud focal 33 mm, resolución radio métrica de 32 bits por píxel y espectral de tres bandas RGB. Se trabajó en formato no comprimido TIFF ya que es uno de los mas universales, soportado en la mayoría de las plataformas, mac, windows y unix. Este tiene también implementado la mayoría de los espacios de color, RGB, CMYK, YCbCr, entre otros. TIFF fue inicialmente diseñado para la descripción, almacenamiento e intercambio de datos (imágenes) tipo raster; aunque aún tiene limitaciones en aplicaciones cartográficas, si es soportado por algunas aplicaciones de procesamiento de imágenes entre ellos Ecognition® y Erdas®. Estas se almacenaron temporalmente en la cámara durante la adquisición, posteriormente se descargaron a un computador portátil en campo y finalmente son almacenadas en la base de datos.

La cámara estuvo acoplada a una **plataforma** fabricada en aluminio la cual tenía cuatro servomotores, uno para el accionamiento de la cámara y tres para su orientación. Estos fueron guiados desde tierra a través de un control remoto Tower Hobbies. La cámara se elevó entre 50 y 70 m sobre el cultivo, empleando un **globo** de helio o una **cometa**; según fueron las condiciones climáticas, principalmente de velocidad del viento.

La cámara se conecta a un transmisor de video el cual envía imágenes al operador en tierra. A un control remoto se le acopla un televisor y un receptor de video con el que se captan dichas imágenes. Con esta señal de video, el operador observa la plantación y realiza la selección de las tomas más adecuadas de esta.

Las imágenes con formato TIFF fueron georreferenciadas usando el modulo Imagine OrthoBase de Erdas®; el cual soporta la ortorectificación de

fotografías e imágenes de varios tipos de sensores, en este caso una cámara digital Olympus D40Z. Este tipo de sensores tiene acoplado un dispositivo de carga - CCD- el cual contiene un arreglo de celdas que permite registrar la intensidad de la energía electromagnética asociada con las características del terreno u objeto en cuestión.

Se adopto un sistema local de coordenadas en metros, en la referenciación de las imágenes. Para esto se empleó una colección de puntos con coordenadas conocidas sobre el terreno, los cuales se utilizaron como referencia en la imagen haciendo corresponder las coordenadas en pixeles de cada uno de estos puntos con las coordenadas locales reales  $x$  e  $y$  expresada en metros en la imagen. Al final del proceso se generaron imágenes con características planimétricas y cartográficas similares a las del sistema real representado.

**Tablas de color munsell**, El sistema de color desarrollado por el profesor Albert H. Munsell, especifica precisamente los colores, a si como sus relaciones. En este, cada color tiene tres atributos, el matiz, la claridad y la pureza. Munsell, estableció escalas numéricas, con su equivalente visual para cada uno de estos, además cada color conserva una relación lógica respecto a los demás.

**El matiz**, distingue entre el rojo, amarillo, verde, azul y púrpura; también permite generar un gradiente de matices de un color a otro por la combinación de estos. La variación entre el púrpura y el rojo, regresa la serie al punto inicial, volviéndola circular. El matiz es identificado con un número entre 0 y 100, en donde los matices principales están a intervalos iguales. No obstante es mas utilizado la división de la separación de dos matices principales en una escala entre 0 y 10, número antepuesto a las iniciales del matiz o de la combinación según el caso.

**La claridad**, indica el grado de oscuridad de un color, en términos de la cantidad de negro o blanco que tenga. Su escala oscila entre, 0 para el negro puro y 10 para el blanco puro.

**La pureza**, determina la dilución que tiene un color, por la presencia de colores grises. Colores con un alto valor de pureza se dice, son altamente saturados y viceversa. La escala se inicia en cero, pero no tiene un fin arbitrario. La mayoría de materiales reflectantes tienen una pureza menor o igual a 20, no obstante materiales fluorescente pueden tener valores de pureza tan altos como 40.

#### 4.2.4 Estadística

En el análisis de los datos se siguieron diversos enfoques: estadística univariada, multivariada y análisis espacial de los datos, según el caso. A continuación se describe de manera general cada uno de estos enfoques, haciendo énfasis en los modelos implementados.

##### ➤ Estadística univariada

Las técnicas **univariadas** se basaron en la comprobación de la siguiente hipótesis:  **$H_0$**  son las medias de cada variable evaluada (micro topografía, textura y variables tradicionales) en las cuatro parcelas iguales contra la hipótesis alterna  **$H_1$**  que son diferentes. Por análisis de varianza se establece si existen o no diferencias y empleando una prueba pareada se determino específicamente que grupos son diferentes y cuales no, estadísticamente.

##### ➤ Estadística multivariada

Las técnicas del **análisis multivariado** tienen varios objetivos así por ejemplo:

- **Simplificación de la estructura de datos.** Encontrar una representación reducida del espacio de las variables en estudio mediante la transformación de algunas variables a un conjunto de menor dimensión.
- **Clasificación.** Considera los individuos y las variables dispersos en un multi-espacio para encontrar una ubicación espacial de estos.
- **Interdependencia.** Estudia la interdependencia total de las variables hasta la dependencia de alguna respecto a un subconjunto de variables.
- **Dependencia.** Se busca la asociación entre dos conjuntos de variables, donde uno es considerado como la realización de mediciones dependientes de otro conjunto de variables.
- **Formulación y pruebas de hipótesis.** Para un campo de estudio específico se postula un modelo estadístico, este queda definido por unos parámetros que deben ser estimados y verificados de acuerdo con la información recopilada.

#### **Análisis de varianza multivariado**

Como en nuestro caso práctico no se conoce la matriz de **varianzas covarianzas**, ni el vector de **medias**; entonces a partir de una muestra aleatoria de la población normal p variante se puede obtener los estimadores del vector de medias poblacional ( $\mu$ ) y la matriz de varianzas covarianza ( $\Sigma$ ).

Se desarrolla un contraste de hipótesis y una estimación de regiones de confianza para el vector de medias  $\mu$  de una población normal p variante con matriz de varianzas covarianzas desconocida (Diaz, 2002, Anderson, 1984; Rencher, 1995; )

En el caso univariado el problema de verificar si la media es igual a cierto valor específico, cuando se desconoce la varianza, se realiza mediante la variable aleatoria  $t$  la cual tiene distribución t- Student.

En el caso multivariado se tiene una expresión análoga, esta se conoce como la estadística  $T^2$  de Hotelling.

La hipótesis que se contrasta es:

$$(12) \quad H_0 = \mu = \mu_0$$

La estadística  $T^2$  puede ser obtenida mediante la **razón de máxima verosimilitud**, usada en nuestro caso o mediante el principio de unión **intersección**. Para mas detalles consultar, Diaz, 2002.

Aquí se quiere estudiar variables relacionadas con el crecimiento en cuatro poblaciones o parcelas (A, B, C, D), entonces, dos o mas poblaciones pueden ser comparadas a través de los respectivos vectores de medias, verificando a través de un análisis de varianza multivariado (ANAVAMU), la igualdad o no de los vectores de medias ligados a cada población. La diferencia entre los modelos lineales multivariados y los modelos univariados radica en que el modelo multivariado involucra mas de una variable dependiente o respuesta.

El modelo lineal multivariado se escribe de la siguiente manera:

$$(13) \quad Y = X\beta + \varepsilon$$

Donde: Y, conforma la matriz de variables regresadas; X, la matriz de diseño o la matriz de variables regresoras;  $\beta$  es la matriz de parámetros desconocidos y  $\varepsilon$  la matriz aleatoria que contiene los errores.

Como en el modelo lineal clásico, los estimadores de máxima verosimilitud para  $\beta$  y  $\Sigma$  son:

$$(14) \quad \hat{\beta} = \left( \sum_{\alpha=1}^n x'_{\alpha} x_{\alpha} \right)^{-1} \left( \sum_{\alpha=1}^n x'_{\alpha} y_{\alpha} \right)$$

$$(15) \quad \hat{\Sigma} = 1/n \sum_{\alpha=1}^n (y_{\alpha} - x_{\alpha} \hat{\beta}) (y_{\alpha} - x_{\alpha} \hat{\beta})'$$

Si se particiona la matriz de parámetros  $\beta$  como:

$$(16) \quad \beta = (\beta_1 : \beta_2)$$

con  $\beta_1$  de  $q_1$  columnas y  $\beta_2$   $q_2$  columnas ( $q_2 + q_1 = q$ ). La razón de máxima verosimilitud para probar la hipótesis

$$(17) \quad H_0 \beta_1 = \beta_2$$

Se obtiene en forma semejante a como se procede con la estadística  $T^2$  de Hotelling esto es,

$$(18) \quad \lambda = \frac{|\hat{\Sigma}_{\Omega}|^{n/2}}{|\hat{\Sigma}_{\Omega_0}|^{n/2}}$$

La matriz  $\hat{\Sigma}_{\Omega}$  corresponde al estimador máximo verosímil en el espacio global de parámetros. La matriz  $\hat{\Sigma}_{\Omega_0}$  es el estimador de máxima verosimilitud en el espacio de parámetros restringido por la hipótesis nula.

Se rechaza la hipótesis  $H_0$  si  $\lambda < \lambda_0$  para  $\lambda_0$  un número escogido adecuadamente de acuerdo con la distribución de  $\lambda$  y el nivel de significancia  $\alpha$ .

Un caso especial es la estadística de Hotelling, la cual se obtiene al hacer  $q = q_1 = 1, q_2 = 0, X_{\alpha} = 1$ , para  $\alpha = 1, \dots, n$  y  $\beta = \beta_1 = \mu$

Bajo la hipótesis nula, la razón de máxima verosimilitud puede transformarse en,

$$(19) \quad \Lambda = \lambda^{2/n}$$

La variable  $\Lambda$  es el cociente de dos varianzas generalizadas, las cuales están ligadas a la distribución  $\omega$  de **Wishart** esto es:

$$(20) \quad \Lambda = \frac{|E|}{|E+H|}$$

donde:

$E = n \hat{\Sigma}$ , se distribuye de acuerdo con una  $\omega(\Sigma, n-q)$  y  $E + H = n \Sigma_{\Omega_0}$ , con  $H$  distribuida  $\omega(\Sigma, q)$ . La estadística  $\Lambda$  se conoce con el nombre de lambda de Wilks, es el equivalente a la estadística F para contrastar la igualdad de las medias asociadas a varias poblaciones independientes con distribución normal univariada.



Desde un punto de vista práctico, el análisis de varianza multivariado es una técnica con la cual se puede verificar la igualdad de los vectores de medias ligados a las cuatro poblaciones multivariadas, estudiadas. A diferencia del análisis univariado, en el multivariado se consideran las **relaciones** que puedan existir entre las variables, de manera que hay información adicional en los datos que se aprovecha.

Otras estadísticas aproximadas para el ANAVAMU son:

- La traza de Lawley – Hotelling
- La traza de Bartlett – Nanda – Pillai y
- Criterio del máximo valor propio de Roy

Para mayor detalle de cada una de estas estadísticas consultar a Díaz, 2002

### Medidas repetidas

Nuestra investigación fue conducida de manera que a la misma unidad experimental se le aplicaron sucesivamente varios tratamientos de donde resultaron valores repetidos de una respuesta sobre la misma unidad u objeto, generándose un perfil para cada unidad.

### Análisis de perfiles

Si  $X \sim N_p(\mu, \Sigma)$ , y las variables de  $X$  están en la mismas unidades de medición (conmensurables) con varianza aproximadamente igual, el modelo asociado para **varios grupos** corresponde a un ANAVAMU, de una vía de clasificación balanceado, como fue nuestro caso; es decir

$$(21) \quad Y_{ij} = \mu + \varepsilon_{ij}, \text{ para } i = 1, \dots, q \text{ y } j = 1, \dots, n$$

Como las plantas de banano se midieron en puntos sucesivos en el tiempo, resultó necesario buscar el grado del polinomio que mejor se ajustara a los datos, mediante la técnica de **curvas de crecimiento**.

Se quiere verificar la hipótesis  $H_0 \mu_1 = \dots \mu_q$ . con variables conmensurables la hipótesis anterior puede orientarse más específicamente a los **q** perfiles generados al graficar los vectores  $\mu_i$ . El interés se dirigió entonces sobre las siguientes hipótesis:

- $H_{01}$ : **Los q perfiles son paralelos**, se denominan perfiles paralelos a los que corresponden a las líneas poligonales que no se cruzan o intersecan (isoclinos), significa que la tasa (pendiente) de variación entre las dos medias particulares es la misma, cualquiera que sea la población. El paralelismo es declarado por la estadística con la cual se verifique esta hipótesis en términos del rechazo o no de la hipótesis con cierto grado de incertidumbre.

$$(22) \quad H_{01}: C\mu_1 = \dots = C\mu_q$$

- $H_{02}$ : **Los q perfiles están en el mismo nivel (coinciden)**, los perfiles de los grupos pueden ser paralelos, pero son estos coincidentes?, esto es, necesita determinarse que grupos son o no uniformemente mejores que otro u otros en términos de su medias

$$(23) \quad H_{02}: 1'\mu_1 = \dots = 1'\mu_q$$

- $H_{03}$ : **Los q perfiles son planos**, lo que se establece es si la media de las p variables es la misma. Esto equivale a establecer la hipótesis de que el promedio de las medias en los q grupos es el mismo para cada variable, es decir,

$$(24) \quad H_{04} = \frac{\mu_{11} + \dots + \mu_{q1}}{q} = \dots = \frac{\mu_{1p} + \dots + \mu_{qp}}{q}$$

No es el interés desarrollar aquí la parte matemática de cada una de estas pruebas, si el lector tiene interés puede remitirse a, Díaz 2002; Anderson, 1984 o Rencher, 1995, para mayor detalle.

### Curvas de crecimiento

Los modelos de curvas de crecimiento se consideran para datos registrados en varias ocasiones, sobre individuos que reciben diferentes tratamientos o que están divididos en varios grupos. En nuestro caso contamos con 4 grupos o parcelas (A, B, C y D), 3 periodos de medición que denominamos medición 1, medición 3 y medición 4, y con 16 individuos sobre los cuales se registro las variables usadas por cada método. Se considera entonces aquí el problema de estimación y prueba de hipótesis sobre la forma de la curva para el caso de varias muestras.

La aproximación o ajuste de la curva se hace a través de un polinomio en función del tiempo; como en nuestro caso los puntos en el tiempo no estuvieron igualmente espaciados, se procedió con el ajuste de polinomios de grado k (con  $k < p$ ). Supóngase que todos lo vectores  $Y_{ij}$  con  $i = 1, \dots, q, j = 1, \dots, n_i$ , tienen la misma matriz de covarianzas. Si un polinomio de grado k se ajusta a la curva de crecimiento, se tiene una representación matricial como la siguiente,

$$(25) \quad A = \begin{pmatrix} 1 & t_1 & t_1^2 & \dots & t_1^k \\ 1 & t_2 & t_2^2 & \dots & t_2^k \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & t_p & t_p^2 & \dots & t_p^k \end{pmatrix} \quad \text{y} \quad \beta_j = \begin{pmatrix} \beta_{j0} \\ \beta_{j1} \\ \vdots \\ \beta_{jp} \end{pmatrix}$$

un estimador de  $\beta_i$  es,

$$(26) \quad \hat{\beta}_i = (A'S_p^{-1}A)^{-1} (A'S^{-1}\bar{Y}),$$

donde

$$(27) \quad S_p = \frac{1}{N-q} ((n_1 - 1)S_1 + \dots + (n_q - 1)S_q) = \frac{1}{N-q} E$$

con  $N = \sum_{i=1}^q n_i$ , es el estimador de la matriz de covarianzas común  $\Sigma$ ;  $S_p$  y  $S$  son las matrices de varianza covarianza conjunta y global respectivamente.

Una estadística tipo lambda de Wilks, para verificar que un polinomio de grado  $k$  se ajusta adecuadamente a las curvas de crecimiento de las  $p$  variables, se obtiene mediante la razón máxima verosimilitud.

Esta es.

$$(28) \quad \Lambda = \frac{|E|}{|E_k|}$$

donde:

$$(29) \quad E_k = \sum_{i=1}^q (Y_{ij} - 1'(A\beta_i))' (Y_{ij} - 1'(A\beta_i)), \quad A\beta_i = \mu_i$$

Para mayor detalle consultar a Díaz, 2002.

### **Análisis de componentes principales (ACP)**

El ACP tiene como objetivo la estructuración de un conjunto de datos multivariado mediante la reducción del número de variables. Esta es una metodología de tipo matemático, para la cual no es necesario asumir distribución probabilística alguna. El ACP transforma el conjunto de variables originales en un conjunto más pequeño de variables las cuales son combinaciones lineales de las primeras, que contienen la mayor parte de la variabilidad presente en el conjunto inicial.

En resumen con el ACP se persiguió:

- Generar nuevas variables que expresen la información contenida en un conjunto de datos.
- Reducir la dimensión del espacio donde están inscritos los datos.
- Eliminar las variables que aporten poco al estudio del problema.
- Facilitar la interpretación de la información contenida en los datos.

En nuestro caso, el procesamiento de las imágenes permitió la generación de 16 variables, las cuales describen cada uno de los objetos o plantas en estas; en cada una de las tres mediciones realizadas al lote experimental.

Entonces, el ACP dice que, en un estudio sobre n-individuos mediante p-variables  $X_1, \dots, X_p$  es posible encontrar nuevas variables notadas por  $Y_k$ , que sean combinaciones lineales de las variables originales  $X_j$  y sujetas a ciertas condiciones. El desarrollo del ACP es semejante a una regresión lineal del componente principal sobre las variables originales.

En tal sentido se determina la primera componente principal  $Y_1$ , la cual sintetiza la mayor cantidad de variabilidad total contenida en los datos. Así:

$$(30) \quad Y_1 = \gamma_{11}X_1 + \gamma_{12}X_2 + \dots + \gamma_{1p}X_p$$

Donde las ponderaciones  $\gamma_{11}, \gamma_{12}, \dots, \gamma_{1p}$  se escogen de tal forma que maximicen la razón de la varianza de  $Y_1$  a la variación total, con la restricción:

$$(31) \quad \sum_{j=1}^p \gamma_{1j}^2 = 1.$$

La segunda componente principal  $Y_2$  es una combinación lineal ponderada de las variables observadas, la cual no está correlacionada con la primera componente principal y reúne la máxima variabilidad restante de la variación total contenida en la primera componente principal  $Y_1$ . De manera general, la k-esima componente es una combinación lineal de las variables observadas  $X_j$ , para  $j = 1, \dots, p$ .

$$(32) \quad Y_k = \gamma_{k1}X_1 + \gamma_{k2}X_2 + \dots + \gamma_{kp}X_p$$

La cual tiene la varianza más grande entre todas las siguientes. De otra manera, los  $Y_k$  sintetizan en forma decreciente la varianza del conjunto original de datos.

Para generar las componentes principales, dos son las formas más comunes. La primera es a partir de la matriz de varianzas y covarianzas y la segunda a través de la matriz de correlación, en nuestro caso se trabajó con la matriz de **correlación**, para evitar problemas de escala y de unidades de las variables.

No hay criterios estrictamente formales para la determinación del número de componentes principales. Los criterios son de tipo **empírico**, y se basan en la variabilidad (información) que en una situación particular se quiere mantener.

Existen algunas ayudas gráficas con las cuales se decide acerca del número adecuado de componentes.

La suma de las varianzas originales, es la **traza** de la matriz de varianzas covarianzas (**S**) y es igual a la suma de los **valores propios** de **S**. La varianza de cada componente principal es igual al valor propio que la generó. Es decir,

$$(33) \quad \sum_{j=1}^p = \sum_{k=1}^p l_k \text{ con } j, k = 1, \dots, p;$$

Cada componente explica una proporción de la variabilidad total, tal proporción se puede calcular mediante el cociente entre el valor propio ( $l_k$ ) y la traza de **S**

$$l_k / \text{tra}(\mathbf{S})$$

El cociente se denomina la **proporción de la variabilidad total** explicada por el k-ésimo componente.

De acuerdo con lo anterior un criterio consiste en tomar un número de componentes igual al número de valores propios que están por encima de la media; en nuestro caso como las componentes se generaron desde la matriz de correlaciones, se seleccionan entonces las componentes cuyos valores propios asociados sean mayores a 1.0.

Como la motivación es encontrar un subconjunto de las variables originales que mejor capturen la variación interna y la covariación de las variables. Un procedimiento consiste en asociar una variable a cada una de las primeras componentes y retener estas, por ejemplo de 50 variables seleccionar un subconjunto de 10. Otra aproximación consiste en asociar una variable a cada una de las últimas componentes y excluirlas. Para asociar una variable con una componente principal, se escoge la variable correspondiente al coeficiente de la componente mas grande (en valor absoluto), siempre que la variable no se haya seleccionado previamente (Díaz, 2002, Anderson, 1984; Rencher, 1995)

### ➤ **Análisis espacial de datos**

En la literatura una **función aleatoria (FA)** es también llamada un **proceso estocástico** cuando **x** (denota un punto en un espacio n-dimensional) varía en un espacio **D** y puede ser interpretado como tiempo y un campo aleatorio cuando **x** varía en un espacio de más de una dimensión (Florax, et al, 2002).

La noción de un proceso espacial según Cressie (1994), es la realización de una variable aleatoria en una localización particular y distingue tres situaciones diferentes dependiendo del tipo de datos disponibles: 1- en el caso de puntos espaciales, se puede definir un patrón espacial para los puntos. 2- Se requieren datos geo-referenciados para describir un atributo que varíe continuamente sobre el espacio, como las propiedades químicas

del suelo por ejemplo. En nuestro caso se adopto un sistema de referenciación coordinado local. 4- Los datos tomados en cuadrícula suministran una colección fija de puntos finitos y contables, los cuales, por ejemplo la producción total, el área foliar entre otros pueden ser observadas (Cressie, 1994).

Aquí se usó la estadística espacial como herramienta para determinar la dependencia o no espacial de características de los objetos o plantas obtenidos a partir de las imágenes a si como de características físicas (textura) del suelo. Otro aspecto relevante es el de evaluar la heterogeneidad espacial esto es, lo frecuente del valor de un atributo en una localidad dada. Por ejemplo, si la producción no se distribuye aleatoriamente en el espacio, podría observarse que grupos de alta o baja producción coinciden con localizaciones específicas cerradas unas con otras sobre la superficie.

La característica típica de la dependencia espacial o auto-correlación espacial, es que es bi-dimensional y multidireccional. La herramienta principal para la visualización de la dependencia espacial es el **variograma** (Chilés y Delfines, 1999; Fotheringham, et al, 2002).

### **Funciones aleatoria estacionaria**

**Estacionaria en el sentido estricto**, Un caso particular de gran importancia práctica es cuando distribuciones de dimensiones finitas son invariantes bajo una traslación arbitraria de los puntos por un vector **h**:

$$(34) \Pr\{ Z(x_1) < z_1, \dots, Z(x_k) < z_k \} = \Pr\{ Z(x_1 + h) < z_1, \dots, Z(x_k + h) < z_k \},$$

Tal FA es llamada estacionaria. Físicamente esto significa que el fenómeno es homogéneo en el espacio y se dice que se repite por si mismo.

**Estacionariedad de segundo orden**: cuando la FA es estacionaria, sus momentos si existen, es obviamente invariante bajo traslaciones. Si se consideran los primeros dos momentos, se tienen para los puntos **x** y **x + h** de  $R^n$

$$(35) \begin{cases} EZ(x) = m \\ E [ Z(x) - m ] [ Z(x + h) - m ] = C(h) \end{cases}$$

La media es constante y la función de covarianza solo depende de la separación **h**.

Una Función aleatoria estacionaria de segundo orden (FAE) es **isotrópica** , si su función de covarianza solo depende de la longitud  $|h|$  y no de su orientación y es **Anisotrópica** en caso contrario.

**Covarianza de una función aleatoria estacionaria:** Una FAE  $Z(\mathbf{x})$  es caracterizada por su media

$$(36) \quad m = E [ Z(\mathbf{x}) ]$$

y su función de covarianza, la cual devuelve el valor de la covarianza  $C(\mathbf{h})$  entre un par de variables localizados en puntos separados por una distancia  $\mathbf{h}$ .

$$(37) \quad C(\mathbf{h}) = E [ Z(\mathbf{x}) - m ] [ Z(\mathbf{x} + \mathbf{h}) - m ]$$

Una función relacionada es el **correlograma**,

$$(38) \quad \rho(\mathbf{h}) = C(\mathbf{h}) / C(\mathbf{0}),$$

el cual está representado como el coeficiente de correlación entre  $Z(\mathbf{x})$  y  $Z(\mathbf{x} + \mathbf{h})$ . La covarianza y el correlograma muestran cómo esta correlación evoluciona con la separación,  $\mathbf{h}$ . Note que  $\mathbf{h}$  es un vector. Estas funciones por lo tanto dependen tanto de su longitud la cual es la distancia entre  $\mathbf{x}$  y  $\mathbf{x} + \mathbf{h}$  y de su dirección.

Además la covarianza es una función definida positivamente,

$$(39) \quad C(\mathbf{h}) = C(-\mathbf{h}) \quad | C(\mathbf{h}) \leq C(\mathbf{0}) |$$

**Variograma de una función aleatoria intrínseca:** una función aleatoria intrínseca (FAI) es una función cuyos incrementos son **estacionarios de segundo orden**. Es caracterizada por su tendencia lineal

$$(40) \quad m(\mathbf{h}) = E [ Z(\mathbf{x} + \mathbf{h}) - Z(\mathbf{x}) ] = (a, \mathbf{h})$$

y su variograma

$$(41) \quad \gamma(\mathbf{h}) = \frac{1}{2} \text{var}[Z(\mathbf{x} + \mathbf{h}) - Z(\mathbf{x})]$$

El variograma muestra cómo la disimilaridad entre  $Z(\mathbf{x})$  y  $Z(\mathbf{x} + \mathbf{h})$  evoluciona con la separación  $\mathbf{h}$ . Igualmente el variograma es una función definida positivamente.

$$(42) \quad \gamma(\mathbf{h}) = \gamma(-\mathbf{h}) \quad \gamma(\mathbf{h}) \geq 0 \quad \gamma(\mathbf{0}) = 0$$

Una FAE obviamente es también una FAI y por lo tanto tiene un variograma. En ese caso el variograma está unido a la covarianza por la relación

$$(43) \quad \gamma(\mathbf{h}) = C(\mathbf{0}) - C(\mathbf{h})$$

Así el variograma de una FAE esta definido por  $2C(0)$ . La ecuación anterior muestra además que si la covarianza es conocida el variograma también es conocido.

Dos razones favorecen el uso de los variogramas sobre la covarianza: la primera es teórica, dado que las clases de FAls incluyen las FAEs, lo que hace a los variogramas una herramienta mas general que la covarianza. La segunda razón es práctica, los variogramas a diferencia de la covarianza, no requieren el conocimiento de la media; en la práctica no se conoce y debe ser estimada de los datos.

**Interpretación física del variograma:** El gráfico de un variograma  $\gamma(h)$  y de nuevo para  $|h|$  ploteado para una dirección de  $h$  o para todas las direcciones, generalmente muestra el siguiente comportamiento:

- inicia en cero (**para  $h = 0, z(x + h) - z(x) = 0$** )
- incrementa con  $|h|$
- continua incrementándose o se estabiliza en cierto nivel

**Rango y Sill,** La tasa de incremento del variograma, refleja el grado de disimilaridad en todas la muestras mas distantes. El variograma puede incrementar indefinidamente si la variabilidad del fenómeno no tiene límite a grandes distancias. Inversamente si el variograma alcanza un limite llamado **sill**, significa que hay una distancia mas allá de la cual  $Z(x)$  y  $Z(x + h)$  son incorrelacionados; esta distancia es llamada **rango**.

Es interesante también examinar el comportamiento cerca al origen ya que esta relacionado con la continuidad y regularidad espacial de variables regionalizadas; comportamientos:

- **parábólico:** caracteriza una variable regionalizada altamente regular
- **Linear:** La variable regionalizada es continua
- **discontinua en 0 (efecto nugget):** Parece no tender a **0** cuando  $h \rightarrow 0$ , esto significa que la variable regionalizada no es continua y es muy irregular (Sun, et al, 1975).

#### **Variogramas modelos:**

Se han realizado una serie de ensayos para generar modelos teóricos en los que la dependencia espacial sea tenida en cuenta. Estas aproximaciones puede ser descritas como modelos de correlaciones espaciales. Las salidas de estos modelos consiste básicamente de un conjunto de parámetros globales estimados.

Algunas de la expresiones probadas son las siguientes:

- Modelos **esféricos** y modelos derivados
  - o Modelo triangular, válido en  $R^1$



- Modelo circular, Valido en  $R^2$
  - Modelo esférico, valido en  $R^4$
  - Modelo cúbico
- Modelos **exponenciales** y modelos derivados
  - Modelo **Gaussiano**
  - Modelo de **Cauchy** generalizado
  - Modelo **K-Bessel**
  - Modelo  $|h|^\alpha$
  - Modelo **Logarítmico**

**Ajuste del variograma modelo:** Los variogramas modelos también presentan algunas fluctuaciones; por esto debieron ser ajustados a los variogramas empíricos.

Varios enfoques pueden seguirse para el ajuste:

**Ajuste manual**, este ajuste es artificioso y puede introducir hipótesis auxiliares basadas en el conocimiento que se tenga del problema y por esto no fue seguido.

**Ajuste automático**, varios son los enfoques usados:

En nuestro caso se siguió el enfoque de **mínimos cuadrados**, el cual evalúa el variograma dentro de una familia  $\gamma(\mathbf{h}, \mathbf{b})$ , donde  $\mathbf{b}$  representa un vector de  $k$  parámetros,  $b_1, \dots, b_k$ , perteneciente a un subconjunto  $\mathbf{B}$  de  $R^n$ . los parámetros son por ejemplo el efecto nugget, el sill y el rango y puede ser denotado por:

$$(44) \quad \{\hat{\gamma}_i(h_j) : j = 1, \dots, j\}$$

Los valores tomados por el modelo para los valores de  $j$  del vector  $\mathbf{h}$ , cada uno son calculados de los pares  $\mathbf{N}(h_j)$  disponibles.

En nuestro caso el vector  $\mathbf{b}$  fue seleccionado por el método de **mínimos cuadrados ordinario**.

$$(45) \quad Q(\mathbf{b}) = \sum_{j=1}^j [\hat{\gamma}_i(h_j) - \gamma(h_j; \mathbf{b})]^2$$

Otros métodos existentes pero no seguidos son el método de **mínimos cuadrados generalizado**, el método de **máxima probabilidad** y el método **bayesiano**.

### Interpolación espacial

Uno de los problemas en geoestadística es la reconstrucción de un fenómeno sobre un dominio con la base de los valores observados de un número limitado de puntos. Matemáticamente el problema puede ser mirado

como una interpolación. Una aproximación denominada Kriging comienza con un modelo de naturaleza espacial mas que un modelo de la función de interpolación. En nuestro caso solo se interpolaron los datos de las variables físicas del suelo analizadas, en el caso de las variables generadas a partir de las imágenes, estas permitieron obtener información de toda la población, limitándonos entonces a la determinación de la existencia o no de estructura espacial de los datos.

En el caso de la textura como no se detectó una estructura espacial en los datos, se siguió entonces el método denominado ***inverso de la distancia ponderada (IDW)***. Este método asume que en la superficie de interpolación tienen mayor influencia puntos cercanos que puntos distantes.

La expresión más simple del método de interpolación IDW es:

$$(46) \quad F(x, y) = \sum_{i=1}^n w_i f_i$$

Donde:  $n$  es el número de puntos muestreados,  $f_i$  es la función que describe los valores en los puntos de muestreo y  $w_i$  es la función de ponderación asignada a cada uno de estos puntos.

$$(47) \quad w_i = \frac{h_i^{-P}}{\sum_{j=1}^n h_j^{-P}}$$

Donde:  $P$ , es un número real positivo denominado parámetro de ponderación (típicamente,  $P = 2$ ) y  $h_i$ , es la distancia desde el punto muestreado al punto de interpolación ó

$$(48) \quad h_i = \sqrt{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2}$$

Donde:  $(x, y)$  son las coordenadas del punto de interpolación y  $(x_i, y_i)$  son las coordenadas de cada punto de muestreo.

En el caso de las características de los objetos o plantas obtenidos a partir de las imágenes, como es una variable discreta y además se tenía toda la población de plantas no fue necesario seguir ningún método de interpolación. El interés únicamente se concentro en la existencia o no de estructura espacial para cada una de las variables.

### ➤ Regresiones lineales

Se investigó las relaciones lineales existentes entre los indicadores tomados de manera tradicional y los obtenidos a través de las imágenes, empleando

la técnica estadística de análisis de regresión, con miras a la obtención de modelos que permitan la estimación de los indicadores tradicionales a partir de las imágenes.

El modelo lineal probabilístico supone que el valor esperado de  $Y$  es una función lineal de  $x$ , pero que el valor real de  $Y$  para un valor fijo de  $x$  se determina por la función del valor medio más un término del error aleatorio, esto es:

$$(49) \quad Y = \beta_0 + \beta_1 x + \varepsilon$$

Donde,  $\beta_0$  es el intercepto,  $\beta_1$  la pendiente y  $\varepsilon$  es el término del error aleatorio, con media cero y varianza  $\sigma^2$ .

Las estimaciones de  $\beta_0$  y  $\beta_1$  deberán dar como resultado una recta que presente en algún sentido el mejor ajuste para los datos. El criterio para estimar los coeficientes de regresión se le llama el método de **mínimos cuadrados**.

No es objeto de este trabajo demostrar como se obtienen los estimadores de  $\beta_0$  y  $\beta_1$ , si el lector tiene interés puede remitirse a (Montgomery y Runger, 2002)

### Pruebas de hipótesis

Para evaluar la adecuación de un modelo de regresión lineal se usa la prueba de hipótesis estadística acerca de los parámetros del modelo y la construcción de ciertos intervalos de confianza. Para probar la hipótesis acerca de la pendiente y el intercepto al origen del modelo de regresión, debe establecerse el supuesto adicional de que el componente del error del modelo,  $\varepsilon$ , sigue una distribución normal e independiente.

Las hipótesis que se probaron fueron, Es la pendiente igual a una constante, por ejemplo  $\beta = \beta_{1,0}$ , contra la alterna que son diferentes, esto es

$$(50) \quad \begin{aligned} H_0: \beta_1 &= \beta_{1,0} \\ H_1: \beta_1 &\neq \beta_{1,0} \end{aligned}$$

El estadístico de prueba sigue la distribución  $t$  con  $n-2$  grados de libertad, bajo  $H_0: \beta = \beta_{1,0}$ , se rechazaría la hipótesis nula si

$$(51) \quad |t_0| > t_{\alpha/2, n-2}$$

De manera similar se probó la hipótesis acerca de la ordenada al origen

$$(52) \quad \begin{aligned} H_0: \beta_0 &= \beta_{0,0} \\ H_1: \beta_0 &\neq \beta_{0,0} \end{aligned}$$

De nuevo el estadístico de prueba sigue la distribución  $t$ , y se rechazará la hipótesis nula si el valor calculado del estadístico de prueba es tal que satisfaga las condiciones planteadas en la ecuación 51.

Un caso especial de las hipótesis planteadas en 50, es:

$$(53) \quad \begin{aligned} H_0: \beta_1 &= 0 \\ H_1: \beta_1 &\neq 0 \end{aligned}$$

Estas hipótesis están relacionadas con la significación de la regresión, y aquí se siguió el método denominado análisis de varianza. El procedimiento se hizo con la partición de la variabilidad total de la variable de respuesta en componentes significativos como base de la prueba.

El análisis de identidad de la varianza es el siguiente:

$$(54) \quad \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2 = \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2 + \sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - \bar{y})^2$$

El estadístico de prueba (la relación entre el cuadrado medio de regresión y el cuadrado medio del error), sigue una distribución  $F_{1, n-2}$  y  $H_0$  se rechazará si:

$$(55) \quad f_o > f_{\alpha, 1, n-2}$$

El procedimiento de prueba suele ordenarse en una tabla de análisis de varianza.

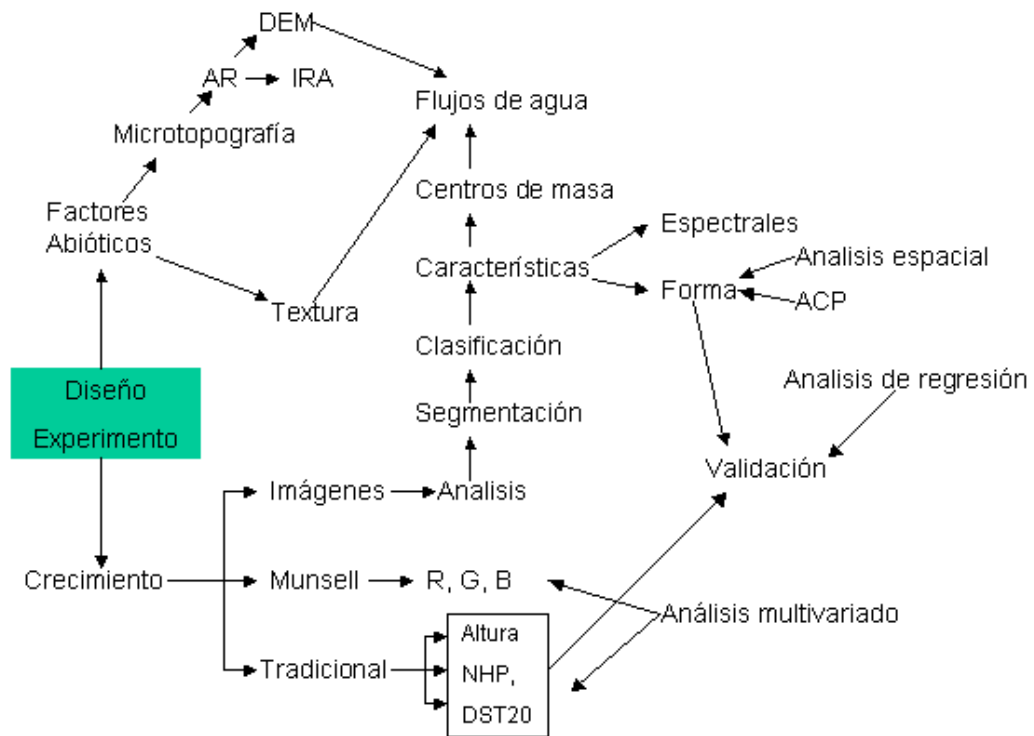
No se detalla aquí el procedimiento matemático para obtener los estadísticos de prueba, si el lector tiene interés consultar a, Montgomery y Runger, 2002

Se anota que, todos los análisis estadísticos se efectuaron con el software GNU, R Project for statistical computing (R); en el análisis de componentes principales se usó la función princomp implementada en el modulo stats (Mardia, et al 1979, Venable y Rippley, 2002). Los análisis espaciales se realizaron con diferentes funciones implementadas en el paquete geoR (Ribeiro y Diggle, 2001).

### 4.3 Resumen metodología

En la figura 4.7 se resume esquemáticamente y de manera relacional los diferentes aspectos desarrollados y descritos en la metodología.

**Figura 4.7:** Diagrama resumen de la metodología



donde: AR: alturas relativas, DEM: modelo de elevación digital, IRA: índice de rugosidad aleatoria, Altura: altura de las plantas, NHP: número de hojas por planta, DST20: diámetro del pseudotallo a 20 tomado a 20 cm del suelo.

## 5 Resultados y análisis

### 5.1 Análisis de la información del sitio experimental

#### 5.1.1 Microtopografía

##### ➤ Alturas relativas

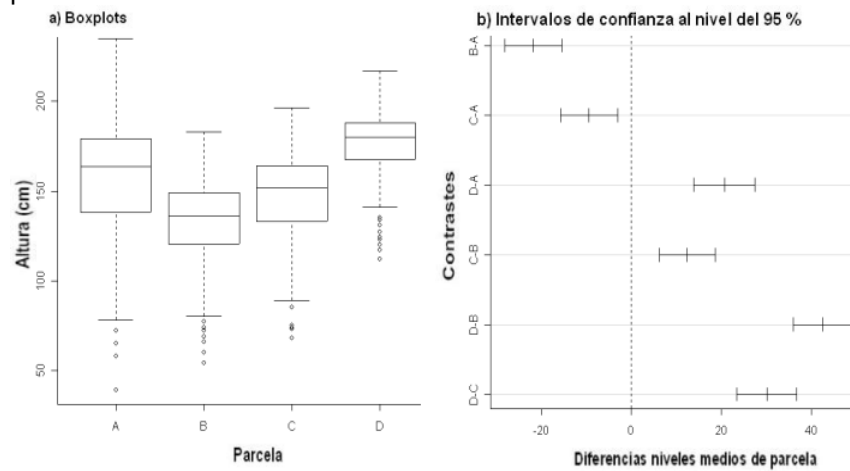
La altura relativa (AR) media expresada en cm, para cada una de las superficies de las parcelas A, B, C y D fue de 155, 144, 146 y 176 cm, respectivamente, con valores mínimos de 49, 54, 68 y 122 cm y máximos de 245, 184, 196 y 217 y un rango inter-cuartílico (RIC) de 196, 129, 128.5 y 105 en el mismo orden (ver tabla 5.1.1 y figura 5.1.1a). La parcela A tiene los valores de AR mas bajo y mas alto, sin embargo en promedio la parcela mas alta es la D y la mas baja es la B. En cuando a la desviación estándar la parcela D es la que presenta el menor valor, la A el mas alto y son intermedias las B y C. Los boxplots muestran valores bajos de AR que son extremos y que corresponden básicamente con aquellos sitios que provocan el encharcamiento del terreno ver figura 5.1.1a. Se aclara que solo se tuvieron en cuenta las AR correspondientes a los sitios de las plantas excluyéndose canales tanto superficiales como terciarios, por lo que el sitio mas bajo o 0 esta ubicado en uno de los canales terciarios. En la tabla 5.1.1 y figura 5.1.1a se resume el comportamiento de esta variable a través de algunos estadísticos.

**Tabla 5.1.1:** Estadísticos descriptivos de la variable altura relativa (AR) en cada una de las parcelas del lote experimental expresados todos en cm.

Estadísticos	Parcela			
	A	B	C	D
n	206	232	218	176
Media	155	133	146	176
RIQ	196	129	128.5	105
mínimo	39	54	68	112
1er cuartil	138	120	133	167
Mediana	163	136	151	180
3er cuartil	178	149	163	188
máximo	235	183	196	217
Sd	31.79	23.9	25.5	19.3
Kurtosis	0.84	0.54	0.48	1.5

En resumen la parcela con mayor AR promedio es la D, sin embargo la mayor variabilidad se presenta en la parcela A y son intermedias la B y la C, para variabilidad de AR. Además, los intervalos de confianza para las diferencias entre las medias de las AR de cada parcela, indican que pertenecen a poblaciones de AR diferentes, ver tabla 5.1.2 y figura 5.1.1 b.

**Figura 5.1.1:** Boxplot, e intervalos de confianza para las medias de las alturas relativas por parcela.



**Tabla 5.1.2:** Análisis de varianza para las alturas relativas de las plantas

Fuente de variación	df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr (>F)
Parcela	3	191185	63728	96.617	<2.2e-16***
Residuales	828	546150	660		

Signif. codes: 0 '\*\*\*' 0.001 '\*\*' 0.01 '\*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

### ➤ Índice de rugosidad aleatoria

El índice de rugosidad aleatoria (IRA), entendido este como la desviación estándar de las ARs, ha sido utilizado como indicador de la configuración o rugosidad de la superficie de un terreno (Vidal y Vazquez, 2004 a, b, c); esto es, valores altos de IRA indican una mayor rugosidad de la superficie del suelo.

$$(56) \quad IRA = \left( \frac{\sum_{i=1}^n (z_i - \bar{z})^2}{n} \right)^{1/2}$$

donde:  $Z_i$ : altura de cada punto,  $\bar{z}$ : media de altura para cada parcela, N: numero de puntos.

En el lote experimental el IRA osciló entre 19 y 41.7. El valor mas bajo correspondió a la parcela D y e mas alto con la D y los valores intermedios con la B y la C. Lo anterior indica que la parcela con la superficie mas rugosa es la A y la mas uniforme es la D. En la tabla 5.1.3, se detallan los valores del IRA para cada una de estas. A la luz, del comportamiento de las medias de AR en cada una de las parcela, puede decirse entonces que las cuatro parcelas trabajadas presentan IRAs diferentes, es decir rugosidades diferentes.

**Tabla 5.1.3:** Índice de rugosidad aleatoria para cada una de las parcelas

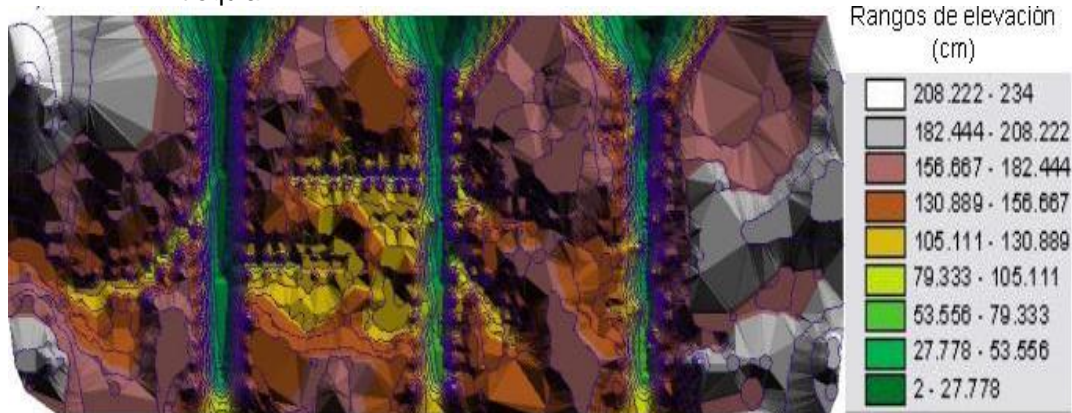
Parcela	Rugosidad Aleatoria (IRA)
A	31.71
B	23.89
C	25.46
D	19.24

En la figura 5.12 se muestra el modelo de elevación digital del lote experimental. Este modelo permite apreciar la distribución espacial por rangos de altura presentados en cada una de las parcelas.

El blanco y el gris corresponde con los sitios mas altos, el magenta con los valores alrededor del 4 cuartil, el amarillo los valores de altura alrededor de la media y el color verde corresponde con los sitios mas bajos, esto es los canales de drenaje terciarios, el punto mas bajo relativo o 0 está ubicado en uno de estos canales.

De manera general se aprecia que la parcela mas variable respecto a la ARs es la A, la parcela D es la parcela mas homogénea y tiende a tener los rangos mas altos. Las AR en la parcela B tienden a concentrarse alrededor de la media y en la C alrededor del 4 cuartil.

**Figura 5.1.2:** Modelo topográfico de elevación digital, basado en las alturas relativas de las plantas y canales de drenaje, lote experimental, Tulenapa Carepa-Antioquia.



### 5.1.2 Textura

Se anota que una muestra de suelo en cuanto a textura queda caracterizada por la proporción en que se encuentre cada uno de los separados arena, limo y arcilla en esta, las que en total representan la unidad o el 100 % según sea expresada en proporción o porcentaje. Entonces cualquiera de los separados se puede obtener por combinación lineal de los otros dos.



El comportamiento de las cantidades relativas en que se encuentran los separados de la fracción sólida e inorgánica del suelo, en cada una de las parcelas del lote experimental se describe a continuación:

**Arena**, los valores promedios de este agregado fueron de 54.6, 50.7, 50.7 y 49 % para las parcelas A, B, C y D respectivamente, con un valor mínimo de 45, 44, 49 y 49 % y máximo de 64, 64, 66 y 65 % en el mismo orden para las parcelas A, B, C y D, ver tabla 5.1.3, y no se presentaron valores, ni mínimos, ni máximos extremos en ninguna de ellas, ver figura 5.1.3a. Además se puede decir que la arena es el separado mas abundante respecto a la arcilla y el limo en todo el lote experimental si se tiene en cuenta que su valor promedio esta alrededor del 50 %.

Los valores expresados en porcentaje del RIC fue de 18, 20, 27 y 16 %; para las parcelas A, B, C y D, y los de desviación estándar fueron de 5.84, 5.79, 8.41 y 4.92 en el mismo orden, ver tabla 5.1.4, de lo anterior se deduce que la parcela C es la parcela mas variable, seguida por la B, la C y la menos variable resultado ser la D en cuanto al contenido de arena; sin embargo los valores promedio de los porcentajes de arena de las cuatro parcelas, de acuerdo con el análisis de varianza no son diferentes estadísticamente, (ver tabla 5.1.5).

**Limo**, el contenido promedio de este separado para cada una de las parcelas A, B, C y D fue de 28.1, 40, 29.5 y 41.5 % respectivamente. Los valores mínimos fueron de: 21, 18, 20, y 28 % y los máximos de: 44, 44, 41 y 45 % para cada una en el mismo orden anterior y no se dieron valores mínimos, ni máximos extremos, ver figura 5.1.3 b. El valor mas alto para el RIC se presento en la B con un valor de 26 %, seguido por la C con 21 %, la A con 4.15 y la D con 2.44 % en orden descendente (ver tablas 5.1.4), los valores de desviación estándar en orden descendente fueron de: 5.94 la A, 5.92 la C, 4.15 la A y 2.44 la D, presentando el mismo comportamiento que para el RIC, ver tabla 5.1.4. De acuerdo con el análisis de varianza tampoco las medias de los porcentajes de este separado son estadísticamente diferentes, (ver tabla 5.1.5).

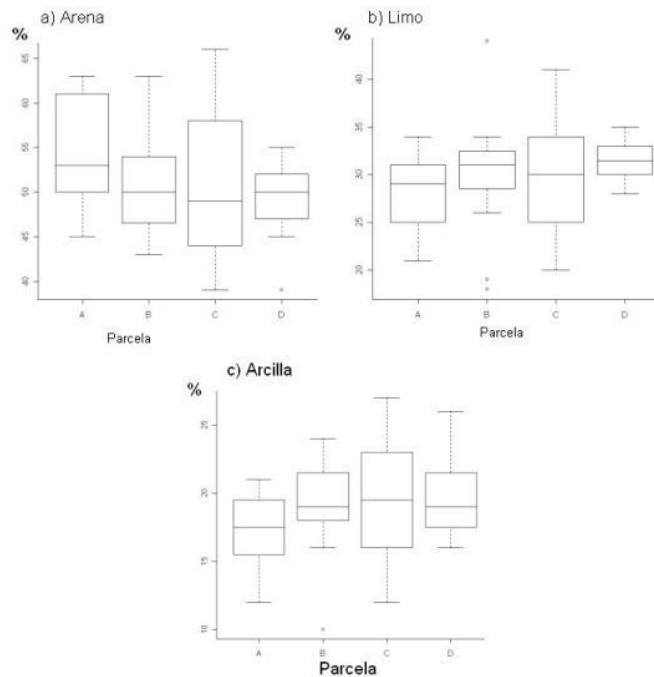
**Arcilla**, este separado es el que en mas baja proporción se encuentra respecto a los demás en todas las parcelas A, B, C y D con promedios de 17.5, 19.25, 19.75, y 19.44 (ver 5.1.4 y figura 5.1.3c). Todos los datos se encuentran muy ajustados alrededor de la media, con valores mínimos de 12, 10, 12 y 16, valores máximos de 21, 24, 27 y 26 y un RIC de 9, 14, 15 y 10; tampoco se presentaron valores mínimos, ni máximos extremos. La desviación estándar en orden descendente se presento así: 4.42 la C, 4.54 la B, 2.76 la D y 2.54 la A, indicando también el orden de variabilidad de los datos. De nuevo el análisis de varianza indicó la no existencia de diferencias en los niveles promedios de este separado de cada una de las parcelas, (ver tabla 5.1.5).

En resumen, la arcilla es el separado que se encuentra en mas baja proporción en todo el lote experimental con un promedio alrededor del 20 %, en segundo lugar se encuentra el limo con un promedio del 40 % y los valores mas altos corresponden a la Arena con valores promedio alrededor del 50 %, en cada una de estas. En la parcela A se encuentran los valores mas altos de Arena y los mas bajos de limo y arcilla respecto a las demás, lo que quiere decir que hay predominio de la fracción gruesa.

**Tabla 5.1.4:** Estadísticos descriptivos de la distribución de los separados del suelo en las cuatro parcela, expresado en porcentajes (%).

Agregado	Estadístico	Parcela			
		A	B	C	D
Arena	Media	54.63	50.75	50.75	49.00
	RIC	18.00	20.00	27.00	16.00
	Mínimo	45.00	43.00	39.00	39.00
	1er cuartil	50.00	46.75	44.50	47.00
	Mediana	53.00	50.00	49.00	50.00
	3er cuartil	60.50	54.00	57.50	51.50
	Máximo	63.00	63.00	66.00	56.00
	Sd	5.84	5.79	8.41	3.92
	curtosis	-1.38	-0.41	-1.40	0.31
	normtest.p	0.09	0.18	0.44	0.27
Limo	Media	26.13	30.00	29.50	31.56
	RIC	13.00	26.00	21.00	7.00
	Mínimo	21.00	18.00	20.00	28.00
	1er cuartil	25.00	28.75	25.00	30.50
	Mediana	29.00	31.00	30.00	31.50
	3er cuartil	31.00	32.25	33.50	32.50
	Máximo	34.00	44.00	41.00	35.00
	Sd	4.15	5.93	5.92	2.34
	curtosis	-1.24	0.76	-1.13	-1.19
	normtest.p	0.22	0.05	0.74	0.13
Arcilla	Media	17.50	19.25	19.75	19.44
	RIC	9.00	14.00	15.00	10.00
	Mínimo	12.00	10.00	12.00	16.00
	1er cuartil	15.75	18.00	16.50	17.75
	Mediana	17.50	19.00	19.50	19.00
	3er cuartil	19.25	21.25	22.50	21.25
	Máximo	21.00	24.00	27.00	26.00
	Sd	2.54	3.53	4.42	2.76
	curtosis	-1.03	0.64	-1.17	-0.32
	normtest.p	0.59	0.09	0.84	0.23

**Figura 5.1.3:** Boxplot para la distribución de las partículas del suelo



**Tabla 5.1.5:** Análisis de varianza para los separados del suelo por parcela

Separado	Fuente de variación	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
Arena	Parcela	3	271.19	90.4	23.502	0.08135
	Residuals	60	2307.75	38.46		
Limo	Parcela	3	96.67	32.22	13.873	0.2554
	Residuals	60	1393.69	23.23		
Arcilla	Parcela	3	61.67	20.56	17.852	0.1596
	Residuals	60	690.94	11.52		
Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1						

Bivariadamente, esto es combinando los separados arena y arcilla como variables respuesta en los análisis de varianza, tampoco se presentó diferencias significativas entre los promedios de las parcelas (ver tabla 5.1.6).

**Tabla 5.1.6:** Análisis bi-variado de los separados arena y arcilla del suelo por parcela.

Fuente de variación	Df	Pillai	Aprox F	num Df	den Df	Pr(>F)
Parcela	3	0.13326	1.42775	6	120	0.2095
Residuals	60					

En general las texturas encontradas con base en el valor medio de cada uno de los separados en cada parcela, fue franco arenosa para la A y franca para las demás. Esto corrobora aunque no significativa estadísticamente, que el contenido de arena si fue levemente mayor en la A, respecto a las demás. De acuerdo con lo anterior el contenido de arena es el separado predominante en todo el lote experimental, con un porcentaje alrededor del 50 %, y la arcilla presenta los valores mas bajos con porcentajes alrededor del 20 %.

### 5.1.3 Longitud de los flujos de agua

El comportamiento de la longitud de los flujos de agua, obtenidos para cada planta a partir de las alturas y los centros de masa de estas, con el paquete ArcGis®, se resume en la tabla 5.1.7.

El valor medio es de 4.9, 4.4, 4.7, y 4.1 para cada una de las parcelas A, B, C y D, con un valor mínimo de 0.42, para todas y máximo de 17.68, 15.06, 12.17 y 16.94 en el orden enunciado anteriormente. En todas se presentan valores máximos extremos, ver figura 5.1.4. Los RIC presentados por cada parcela son: la A de 17.26 m, la B de 14.64 m, C de 11.75 m y la D de 16.51 m. En todos los casos los RICs fueron amplios, sin embargo la mayoría de los datos tienden a concentrarse hacia el extremo izquierdo (valores bajos) y muy pocos hacia el extremo derecho o con valores de longitud altos, ver tabla 5.1.7, rangos intercuartílicos RICs y los boxplots de la figura 5.1.4 a.

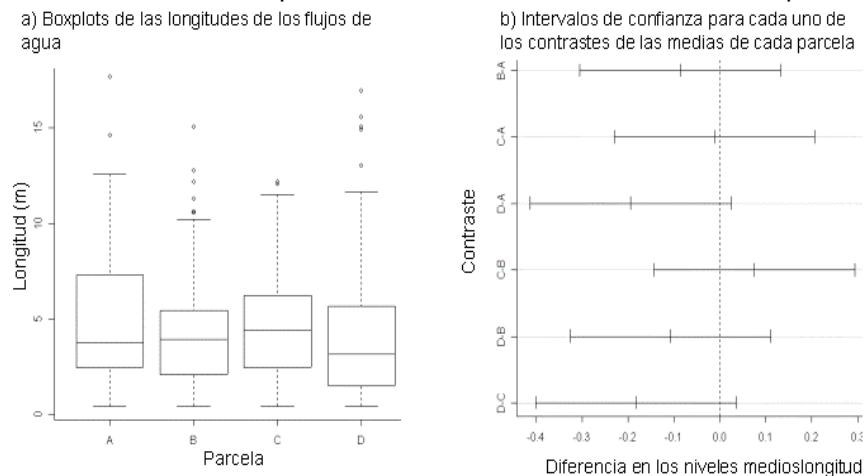
Los datos no se distribuyen normal por lo que fue necesario transformarlos para que su distribución se aproximara a una normal. Esto se logró elevando cada uno de los datos a la 1/4. Con los datos transformados se realizó un

análisis de varianza (ANAVA). Las diferencias con un alfa del 0.05 de los valores medio de longitud de los flujos de agua de las diferentes parcelas son débiles ver tabla 5.1.8. El mayor contraste se presenta entre las parcelas D – A, y la D – C, aunque de nuevo son levemente significativas, ver figura 5.1.4 b.

**Tabla 5.1.7:** Estadísticos descriptivos para evaluar el comportamiento y distribución de la longitud expresada en metros de los flujos de agua obtenidos en cada uno de las cuatro parcelas.

Estadísticos	Parcela			
	A	B	C	D
n	143	143	143	143
Media	4.93	4.369	4.721	4.183
RIC	17.26	14.64	11.75	16.51
mínimo	0.42	0.42	0.42	0.42
1er cuartil	2.47	2.095	2.47	1.5
Mediana	3.74	3.92	4.41	3.14
3er cuartil	7.3	5.43	6.21	5.685
máximo	17.68	15.06	12.17	16.93
Sd	3.42	2.756	2.78	3.36
Kurtosis	4.29	1.62	-0.22	2.168

**Figura 5.1.4:** Distribución la longitud de los flujos de agua (boxplots) y intervalos de confianza para los contrastes de las medias de cada parcela.



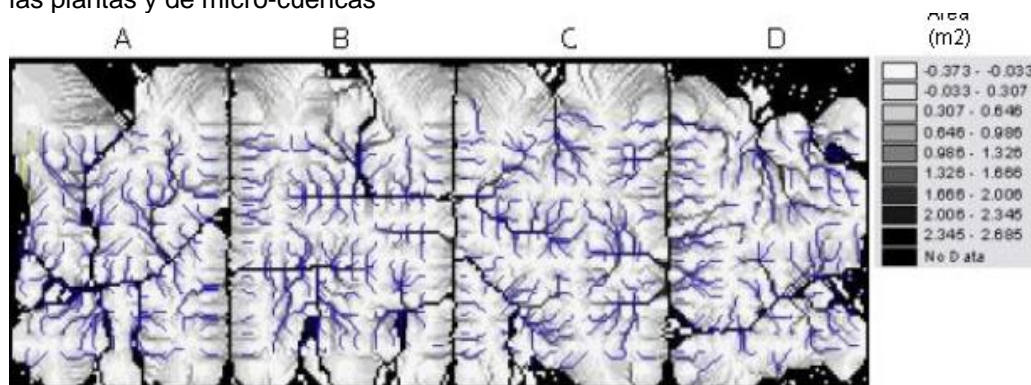
**Tabla 5.1.8:** Análisis de varianza para los flujos de agua en las parcelas A, B, C y D

ANAVA FLUJOS DE AGUA					
Fuente de variación	df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr (>F)
Parcela	3	0.841	0.28	2.5587	0.05428
Residuales	568	62.263	0.11		
Signif. codes: 0 '****' 0.001 '***' 0.01 '**' 0.05 '*' 0.1 '.' 1					

#### 5.1.4 Descripción del drenaje

En la figura 5.1.5 se muestra tanto la distribución espacial de los flujos de agua así como la distribución de micro-cuencas formadas en cada una de las parcelas del lote experimental. Como se dijo anteriormente los flujos de mayor longitud promedio se encuentran en las parcelas A y C. Se aprecia además en la figura 5.1.5, la formación de canales o micro-cuencas (líneas oscuras) los cuales recogen los flujos de agua dentro de las parcelas, se nota además la mayor cantidad de estos canales en la parcela A, los cuales se distribuyen interconectadamente por toda esta, desembocando en el canal terciario que se encuentra entre las parcelas A-B. En la parcela B básicamente se forman dos micro-cuencas una en la parte inferior de la figura 5.1.5B que desemboca en el canal terciario ubicado entre A-B y la otra formada en la parte superior que desemboca en el canal terciario B-C. En la C se observa básicamente el mismo patrón anterior, dos micro-cuencas conduciendo los flujos hacia el terciario B-C y dos pequeñas desembocando en el terciario C-D; en la parte superior de la parcela C se observa además una pequeña micro-cuenca que no esta conectada con ninguno de los canales terciarios. Finalmente en la parte inferior de la parcela D, una micro-cuenca atraviesa en el sentido contrario al eje x, desembocando en el terciario C-D; esta recoge los flujos de agua de este sector. Las demás micro-cuencas formadas en esta parcela no están conectadas con ninguno de los canales terciarios, por lo que la evacuación del agua acumulada en estas es predominantemente por infiltración, ver figura 5.1.5D.

**Figura 5.1.5:** Distribución espacial de la longitud de los flujos de agua de cada una de las plantas y de micro-cuencas



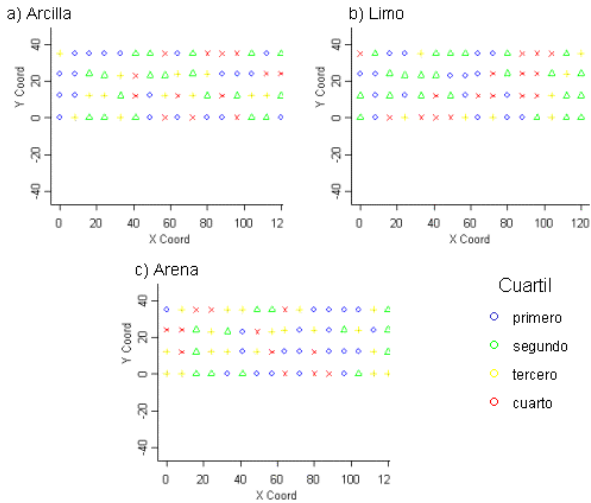
#### 5.1.5 Comportamiento espacial de la textura

La distribución por cuartiles de cada uno de los separados arcilla, limo y arena, no presentan una tendencia o patrón espacial apreciable ver figuras 5.1.6 a, b y c. Lo anterior es corroborado por los semi-variogramas calculados para cada uno de los separados ver figuras 5.1.7 a, b y c en las direcciones de  $0^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $90^\circ$  y  $145^\circ$ , en los cuales para ninguno de los

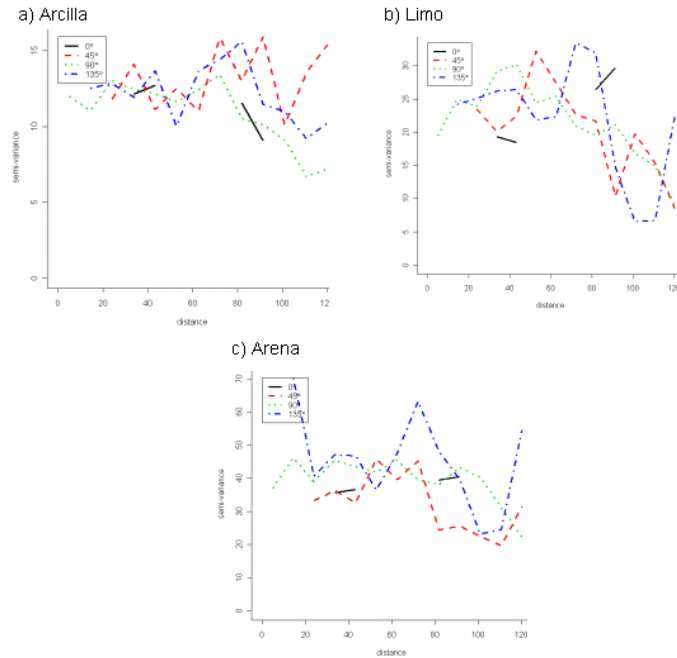
separados arena, limo y arcilla, existe un grado de covariación que este influenciado por la distancia y/o la dirección.

Entonces bajo las condiciones de escala y área muestreada los separados arcilla, limo y arena se comportan aleatoriamente, no presentado ningún patrón de distribución espacial. Tendrá que evaluarse si predomina este comportamiento a diferentes escalas y áreas de muestreo.

**Figura 5.1.6:** Distribución por cuartiles de los separados: arcilla, limo y arena, lote experimental

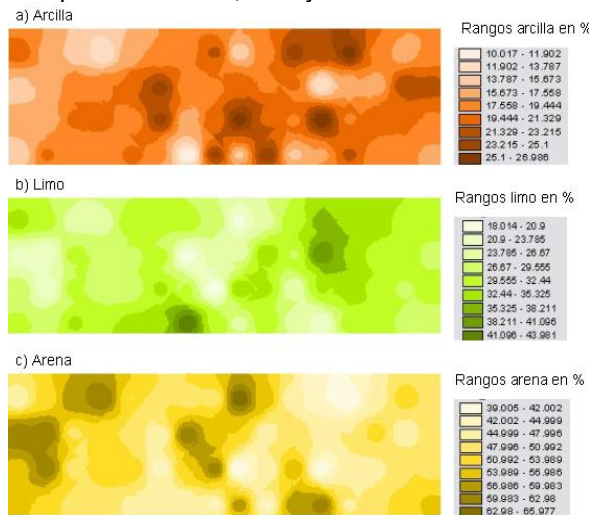


**Figura 5.1.7:** Semi-variogramas, de cada uno de los separados arena, limo y arcilla, calculados para las direcciones 0° 45° 90° y 145°.



En las figuras 5.18 a, b y c, se muestran los mapas resultado de la interpolación espacial siguiendo el método IDW para cada uno de los separados del suelo: arcilla, limo y arena.

**Figura 5.1.8:** Interpolación espacial, empleando el método IDW para cada uno de los separados arcilla, limo y arena



Aunque no se evidenció un modelo de distribución espacial, en el caso de la arena si se aprecia que los mayores porcentajes corresponden con la parcela A y los valores mas bajos de arena se encuentran en la parcela D ver figuras 4.2 y 5.1.7 c. En el caso del limo y la arcilla la diferenciación es menos evidente, sin embargo los mayores contenidos tienden a estar en las parcelas C y D. Se anota que estos resultados son concordantes con los obtenidos en el numeral 5.1.2 textura.

## 5.2 Análisis de la información de las plantas obtenidas por métodos tradicionales

### 5.2.1 Relación entre las variables de medición tradicional

En la tabla 5.2.1 se detallan las correlaciones presentadas entre las variables de uso tradicional empleadas en la estimación del crecimiento de las plantas de banano. Con excepción del diámetro del pseudotallo a 20 cm, todas las demás presentaron una correlación mayor a 0.8, indicando una fuerte relación obvia entre ellas, puesto que están determinando características morfológicas que varían proporcionalmente con el desarrollo de las plantas.

En el caso del diámetro del pseudotallo a 20 cm, la mayor relación se presentó con la variable altura, con una correlación de 0.52, con las demás variables esta fue menor.



**Tabla 5.2.1:** Matriz de correlaciones entre cinco variables usadas tradicionalmente para determinar el crecimiento de las plantas de banano

	hp	Lhp	Ahp	DST20	ALTO
hp	1	0.84	0.86	0.31	0.89
Lhp		1	0.99	0.47	0.97
Ahp			1	0.46	0.97
DST20				1	0.52
ALTO					1

hp: hojas por planta; Lhp: largo de las hojas por planta en cm; Ahp: Ancho de la hoja por planta en cm; DST20: diámetro del pseudotallo a 20 cm del suelo en cm; ALTO: altura de la planta en cm.

En el análisis del crecimiento que se describen en los numerales siguientes, se realizaron con las variables número de hojas por planta, diámetro del pseudotallo y altura. No se tuvo en cuenta el largo y ancho de las hojas, por la dinámica que estas características tienen; por ejemplo dependen de la posición de la hoja en la planta y no es posible medir una misma hoja desde la siembra hasta la floración por la renovación y muerte hojas dada en la planta, existen algunas alternativas como evaluar siempre la hoja de una misma posición en la planta y generalmente se recomiendan las posiciones intermedias de la planta; sin embargo en el numeral 5.5 validación de la metodología, se analizará el área de las plantas y la metodología usada en la obtención de esta, emplea el largo de las hojas, estudiándose en este punto esta característica aunque de manera indirecta.

## 5.2.2 Evaluación del crecimiento

### ➤ Número de hojas por planta (NHP)

El NHP varió en todo el lote entre: 3 y 7, 7 y 11 y 6 y 14 para la medición 1, 3, y 4 respectivamente, con promedios de 5, 9 y 12 hojas por planta en el mismo orden. La desviación estándar fue de 1.1, 0.9 y 1.3, para las mediciones en el mismo orden anterior, indicando una leve mayor variabilidad en la ultima medición, se anota que para esta las plantas estaban próximas a la floración, ver tabla 5.2.2.

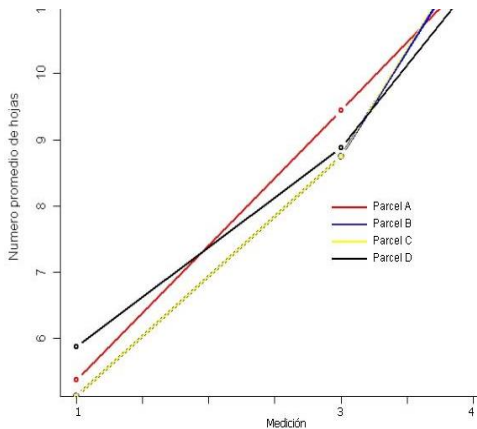
En la figura 5.2.1 se muestran las curvas promedio de crecimiento por parcela, del seguimiento realizado entre la semana 20, 28 y 41, durante el crecimiento de las plantas. La aproximación o ajuste de la curva de crecimiento se hizo a través de un polinomio en función del tiempo con separación diferente, considerando cada parcela como un grupo. La forma de crecimiento que mejor se ajusta es la lineal. La estadística tipo lambda de Wilks, que verifica que el polinomio de grado 1 se ajusta adecuadamente al crecimiento es:

Lambda de wilks calculado	25.47
Chicadrado (0.05, p-k-1)q	7.81
Chicadrado (0.01, p-k-1)q	11.34
Pr	0.05> 2.940104e-06

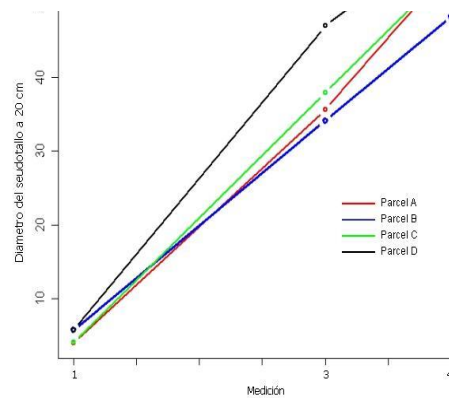


Al comparar los perfiles obtenidos por la conexión de los puntos se probó las siguientes tres hipótesis: paralelismo, perfiles en el mismo nivel, y perfiles planos.

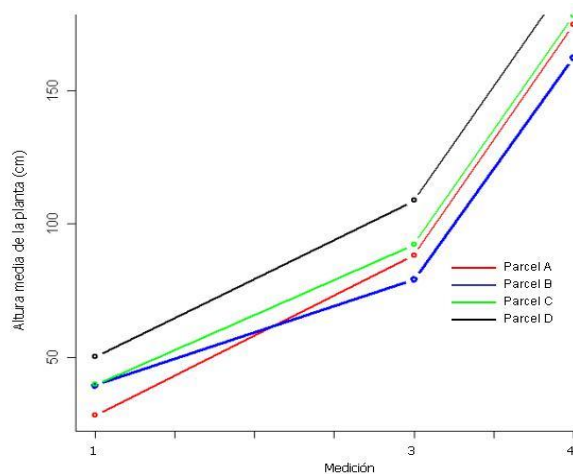
**Figura 5.2.1:** Número de hojas (NHP) promedio por parcela y por medición



**Figura 5.2.2:** Diámetro promedio del seudo tallo a 20 cm (DS20 cm) y por medición



**Figura 5.2.3:** Altura promedio cm de la plantas del suelo promedio por parcela y por medición



**Tabla 5.2.2:** Estadísticos descriptivos para tres mediciones de las variables número de hojas por planta (NHP), diámetro del pseudo tallo a 20 cm (DST20) y altura de la planta.

Estadísticos	NHP			DST20 (cm)			ALTO (cm)		
	1	3	4	1	3	4	1	2	3
n	64.0	64.0	64.0	64	64.0	64.0	64.0	64.0	64.0
Media	5.4	9	11.7	4	38.7	54.4	39.6	92.2	177.2
RIQ	4.0	4.0	8.0	6	52.0	51.0	57.0	101.0	145.0
mínimo	3.0	7.0	6.0	1.4	12.0	22.0	13.0	36.0	85.0
1er cuartil	5.0	8.0	11.0	3	33.0	48.0	33.0	75.0	160.5
Mediana	5.0	9.0	12.0	4	37.0	57.5	38.5	96.0	186.0
3er cuartil	7.0	10.0	13.0	5	44.0	63.0	46.3	106.5	203.3
máximo	7.0	11.0	14.0	8	64.0	73.0	70.0	137.0	230.0
Sd	1.119	0.9665	1.329	1.347	9.85	11.61	12.84	24.204	35.5
curtosis	-0.2	-0.261	3.5	4.59	0.461	-0.548	-0.054	-0.645	-0.3

Según la estadística lambda de Wilks, estos son paralelos y están en el mismo nivel y según la estadística  $T^2$  de Hotelling, los perfiles son no planos, ver tabla 5.2.3. En otras palabras, el número promedio de hojas cambió en igual proporción de una medición a otra en las cuatro parcelas y ninguna de estas fue uniformemente mejor respecto a las demás; por lo que se puede decir que el incremento en el NHP fue uniforme para todas las parcelas entre las mediciones.

Tabla 5.2.3: Pruebas de hipótesis para los perfiles de NHP

Hipotesis	Lambda de Wilks		parámetros
	calculado	tabulado	
Perfiles paralelos	0.81	0.81	(0.05 2 60 3)
Perfiles en el mismo nivel	0.99	0.87	(0.05 1 60 3)
T2 de Hotelling			
Perfiles planos	855.50	8.5	(0.05 3 60)

### ➤ Diámetro del seudo tallo a 20 cm del suelo (DST20)

Los DST20 de las plantas en todo el lote oscilaron entre, 1.4 y 8; 12 y 64; y 22 y 73 cm para las mediciones 1, 2 y 4 respectivamente, con promedios en este mismo orden de 4, 38.7 y 54.4 respectivamente. La desviación estándar fue de 9.85, 11.6, y 12.8, indicando un aumento de la variabilidad con el crecimiento de las plantas.

El DST20 como variable indicadora de crecimiento de las plantas de banano, presenta un comportamiento muy similar y lógico con el NHP. Ambas variables son expresión directa del crecimiento de las plantas, de ahí su relación. La estadística lambda de Wilks, verifica que las cuatro parcelas presentan una tendencia de crecimiento figura 5.2.2 y que el modelo que mejor se ajusta nuevamente es el lineal.

```

Lambda de wilks calculado          69.09
Chicadrado (0.05, p-k-1)q         7.81
Chicadrado (0.01, p-k-1)q        11.34
Pr                                0.05 > 9.904802e-16

```

De nuevo la estadística lambda de Wilks, dice que son paralelas las tendencias en el incremento de los diámetros de las plantas entre parcelas, además que estas son similares o coincidentes. La estadística de Hotelling corrobora nuevamente la tendencia de crecimiento o sea un incremento entre mediciones y uniforme entre parcelas de los diámetros de los seudo tallos, ver tabla 5.2.4.

Tabla 5.2.4 Pruebas de hipótesis para los perfiles de DST20

Hipótesis	Lambda de Wilks		parámetros
	calculado	tabulado	
Perfiles paralelos	0.7107237	0.81	(0.05 2 60 3)
Perfiles en el mismo nivel	0.8056266	0.87	(0.05 1 60 3)
T2 de Hotelling			
Perfiles planos	1475.24	8.5	(0.05 3 60)

### ➤ Altura de la planta

La altura de planta osciló en todo el lote experimental entre 13 y 70, 36 y 137, y entre 85 y 230 en las mediciones 1, 3 y 4 respectivamente con promedios en el mismo orden de 39.6, 92.2 y 177.2 cm. En cuanto a la desviación estándar esta fue de 12.8, 24.2, y 35.5 en cada una de las mediciones en el mismo orden anterior. Se destacan dos aspectos el primero que al igual que con la variable DST20, la variabilidad se incrementa con el crecimiento, pero además la altura captura mayor variabilidad, ver tabla 5.2.2.

Los datos de nuevo se ajustan mejor a una forma de crecimiento lineal, aunque al inicio se observa una fase de lento incremento en las alturas promedios de las plantas, con un considerable aumento de la pendiente a partir de la medición 4. En la figura 5.2.3 se muestran las curvas de incremento de altura para las cuatro parcelas. A pesar de que la forma de incremento no se observa completamente lineal, según la estadística de Lambda de Wilks dice que un polinomio lineal se ajusta significativamente mejor respecto a uno cuadrático o cualquier otro de grado superior.

Lambda de wilks calculado	76.11
Chicadrado (0.05, p-k-1)q	7.81
Chicadrado (0.01, p-k-1)q	11.34
Pr	0.05 > 2.972326e-17

En la figura 5.2.4, se evidencia el paralelismo en los perfiles de altura, lo cual es corroborado por la estadística Lambda de Wilks, ver tabla 5.2.5. La parcela D tiende a tener un perfil aunque paralelo en un nivel mas alto, en cada medición respecto a los demás, sin embargo no es estadísticamente significativa esta diferencia.

Tabla 5.2.5: prueba de hipótesis para los perfiles de altura

Hipótesis	Lambda de Wilks		parámetros
	calculado	tabulado	
Perfiles paralelos	0.8545941	0.81	(0.05 2 60 3)
Perfiles en el mismo nivel	0.8112029	0.87	(0.05 1 60 3)
T2 de Hotelling			
Perfiles planos	1271.71	8.5	(0.05 3 60)

En general puede decirse que el desarrollo de las plantas en cada una de las cuatro parcelas es uniforme, ninguna parcela es mejor respecto a las demás.

Además estas variables presentan una alta relación por lo que cualquiera de ellas pueden ser usadas en la estimación del crecimiento de las plantas de banano.

### 5.3 Método de evaluación con las tablas de color Munsell

El comportamiento de cada uno de los coeficientes tricromáticos obtenidos por la transformación de las variables matiz, claridad y pureza propuestos en el sistema munsell para describir el color de un objeto, en este caso las hojas de las plantas de banano tanto en su parte inferior (i) como superior (s) se detallan en la tabla 5.3.1.

Los valores oscilaron entre 7.9, 6.9 y 5.8 y 18.1, 15 y 14.5 para Xi y entre 7.4, 6.8 y 6.6 y 18.4, 14.2 y 11.1 para Xs, en las mediciones 1, 3 y 4. En el caso de Xi el valor promedio fue de 9.9, 9.8 y 8.8 para las mediciones 1, 3 y 4 respectivamente y en la parte superior de la hoja los valores promedios de Xs fueron de 9.4, 9.2 y 8.8 en cada una de las mediciones en el mismo orden.

Lo valores promedios para Yi fueron de 12.7, 12.5, y 11.1 y para Ys fueron de 12, 11.8, y 11.1 en las mediciones 1, 3 y 4 respectivamente; oscilando Yi entre 10.2 – 22.4, 8.7-19.1 y 7.4 -16.5 y Ys entre 9.3 – 22.4, 8.7- 18.3 y 8.4 – 13.8 en cada una de las mediciones 1, 3 y 4.

El valor promedio para Zi en cada una de las mediciones 1, 3 y 4 fue de 5.3, 5.5 y 6.1 respectivamente con valores mínimos de 3, 4.1 y 3.6 y máximos de 9, 6.8 y 9 en el mismo orden. El valor promedio de Zs fue de 5.6, 5.5 y 6.1, con valores mínimos de 2.1, 3.6 y 6.2 y máximos de 10.3, 7.1 y 7.4 en cada una de las mediciones en el orden anterior (ver tabla 5.3.1).

**Tabla 5.3.1:** Estadísticos descriptivos de cada una de las características **x**, **y** y **z** generadas por la transformación de los valores munsell tomados a las hojas de las plantas, tanto en su parte inferior como superior.

Característica	medición	Media	RIQ	mínimo	1er cuartil	Mediana	3er cuartil	máximo	sd	curtosis
Xi	1	9.9	10.2	7.9	9.1	9.4	9.8	18.1	1.6	10.5
	3	9.8	8.1	6.9	9.2	9.7	10.4	15.0	1.2	3.0
	4	8.8	7.7	5.8	8.1	8.9	9.5	13.5	1.4	1.6
Yi	1	12.7	12.2	10.2	12.0	12.0	12.1	22.4	1.9	10.1
	3	12.5	10.4	8.7	12.0	12.0	13.3	19.1	1.6	3.5
	4	11.1	9.2	7.3	10.1	11.1	12.0	16.5	1.7	1.3
Zi	1	5.3	6.0	3.0	4.4	5.2	6.1	9.0	1.4	0.0
	3	5.5	2.7	4.1	5.0	5.5	6.1	6.8	0.7	-0.9
	4	6.0	5.4	3.6	5.5	6.1	6.6	9.0	1.0	0.3
Xs	1	9.4	11.0	7.4	8.8	9.3	9.5	18.4	1.4	26.9
	3	9.2	7.4	6.8	8.5	9.4	9.8	14.2	1.2	2.6
	4	8.8	4.5	6.6	8.2	8.9	9.5	11.1	0.9	-0.2
Ys	1	12.0	13.1	9.3	12.0	12.0	12.0	22.4	1.6	2.3
	3	11.8	9.6	8.7	10.8	12.0	12.6	18.3	1.6	2.6
	4	11.1	5.4	8.4	10.4	11.2	12.0	13.8	1.1	-0.4
Zs	1	5.6	8.2	2.1	4.8	5.7	6.4	10.3	1.3	1.4
	3	5.5	3.5	3.6	5.0	5.6	6.1	7.1	0.8	-0.7
	4	6.1	3.2	4.2	5.6	6.1	6.6	7.4	0.8	-0.6

Las variables X, Y, y Z no presentan distribución normal por lo que fue necesario la transformación de los datos, para los análisis de estimación y prueba de hipótesis sobre la forma de la curva que mejor se ajusta a cada una de las cuatro parcelas.

El análisis de varianza multivariado realizado para las cuatro muestras considerando las tres mediciones hechas no igualmente espaciadas en el tiempo, verifica que las parcelas presentan cambios en los niveles de X, Y y Z de una medición a otra y que la forma de la curva que mejor se ajusta en todos los casos es la lineal, ver tabla 5.3.2. Se anota que el cambio presentado por Xs es estadísticamente débil.

**Tabla 5.3.2:** ANAVAMU, evaluación del crecimiento de las plantas empleando el color de las plantas según el sistema CIE X,Y yZ

Fuente de Variación	Lambda de wilks calculado	Chic cuadrado (0.05, p-k-1)q	Chic cuadrado (0.01, p-k-1)q	Pr
Xi	24.66	9.49	13.28	5.9E-05
Xs	9.63			0.05
Yi	35.37			3.9E-07
Ys	16.89			0.0020
Zi	13.18			0.0104
Zs	16.70			0.0022

Los coeficientes  $\beta_1$  y  $\beta_2$ , estimados se muestran en la tabla 5.3.3, con los cuales se obtienen las curvas de crecimiento estimadas en función del tiempo esto es:  $\beta_1 + \beta_2 t$ , tanto en la parte superior como inferior de la hojas.

Se observa que para las variables Xi, Xs, Yi y Ys,  $\beta_2$  es negativo, esto es, las curvas son decrecientes, de otra manera, los niveles en cada una de las anteriores variables decrecen con el tiempo a partir de un cierto valor inicial, tanto en la parte inferior como superior de la hoja.

En el caso de Z,  $\beta_2$  con excepción de la parcela A, parte inferior de la hoja,  $\beta_2$  es positivo, esto es, los niveles de Z son crecientes, entre mediciones, ver tabla 5.3.2.

**Tabla 5.3.3:** Coeficientes  $\beta_1$  y  $\beta_2$ , con los cuales se estima el cambio en los niveles X, Y y Z tanto en la parte inferior como superior de la hoja durante el crecimiento de las plantas de banano.

variable		A	B	C	D	promedio
Xi	$\beta_1$	12.71	10.27	10.53	9.29	10.70
	$\beta_2$	-1.25	-0.41	-0.53	-0.04	-0.56
Xs	$\beta_1$	11.01	9.66	9.54	9.66	9.97
	$\beta_2$	-0.66	-0.32	-0.28	-0.31	-0.39
Yi	$\beta_1$	16.43	13.47	14.04	12.00	13.99
	$\beta_2$	-1.72	-0.75	-1.01	-0.13	-0.90
Ys	$\beta_1$	14.03	13.47	12.33	11.25	12.77
	$\beta_2$	-0.85	-0.76	-0.37	0.06	-0.48
Zi	$\beta_1$	5.70	4.98	4.48	3.60	4.69
	$\beta_2$	-0.11	0.26	0.55	1.06	0.44
Zs	$\beta_1$	5.15	5.25	4.70	4.74	4.96
	$\beta_2$	0.27	0.13	0.42	0.58	0.35

En las tablas 5.3.4 a, b y c, se muestran los resultados de las siguientes tres hipótesis: 1- los perfiles son paralelos contra la alterna que no lo son tabla 5.3.4a; 2- los perfiles se encuentran en el mismo nivel contra que están en niveles diferentes, tabla 5.3.4b, y 3- los perfiles son planos contra la alterna que no, tabla 5.3.4c.

**Tabla 5.3.4:** Análisis de los perfiles para cada una de las variables de color X, Y y Z tanto en la parte inferior como superior de las hojas, para probar las hipótesis nulas de: paralelismo, perfiles en el mismo nivel y perfiles planos, contra que no lo son.

a) Los perfiles son paralelos

Paralelismo		
Fuente de Variación	Lambda de wilks calculado	Lambda de wilks tabulado (0.05, 2,3,60)
Xi	0.66	0.81
Xs	0.76	
Yi	0.66	
Ys	0.70	
Zi	0.79	
Zs	0.93	

b) Los perfiles estan en el mismo nivel

Perfiles en el mismo nivel		
Fuente de Variación	Lambda de wilks calculado	Lambda de wilks tabulado (0.05, 1,3,60)
Xi	0.93	0.67
Xs	0.88	
Yi	0.93	
Ys	0.89	
Zi	0.96	
Zs	0.92	

c) Los perfiles son planos

Perfiles planos		
Fuente de Variación	T2 de Hotelling calculado	T2 de Hotelling tabulado (0.05,3,60)
Xi	31.54	8.5
Xs	12.88	
Yi	67.12	
Ys	23.70	
Zi	17.55	
Zs	21.68	

En cuanto al **paralelismo** puede decirse que en todas las componentes de color X, Y y Z pueden considerarse como paralelos; esto es que los cambios en los niveles de X, Y y Z son proporcionales de una medición a otra tanto en la parte superior como inferior de la hoja, con excepción de Zs, donde se presenta una diferencia pero esta es muy débil, ver tabla 5.3.4 a.

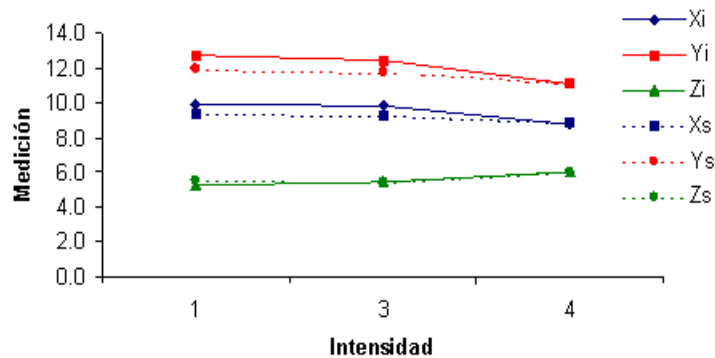
En el caso de **perfiles en el mismo nivel**, se puede comentar que existen diferencias pero estas de nuevo son muy débiles y se recomienda mejor considerarlos como que están en el mismo nivel, esto es que los promedios de cada una de las parcelas A, B, C y D además de cambiar proporcionalmente, ninguno es mas alto o mas bajo que los demás en ninguna de las mediciones. Se anota además que no existen diferencias entre si la medición se realiza en la parte inferior o superior de la hoja, por lo que es indiferente el sitio de medicion, recomendándose entonces efectuarla en la parte central de la hoja.



La hipótesis de perfiles planos prácticamente es una corroboración de las curvas de crecimiento y en este caso se rechaza la hipótesis nula, es decir que los perfiles no son planos.

En la figura 5.3.1, se muestra gráficamente los perfiles para cada una de las componente de color según el sistema CIE X, Y, y Z.

**Figura 5.3.1:** Perfiles promedio para cada una de las componentes de color X, Y y Z tanto en la parte inferior como superior de la hojas de las plantas de banano.



## 5.4 Análisis de imágenes

### 5.4.1 Extracción de la información

#### ➤ Segmentación

Cada una de las imágenes se segmenta en tres **niveles** de escala, empleando el método de **segmentación multiresolución**, implementado por Ecognition. En todos se usa el modo **normal**, con un parámetro de escala o máxima heterogeneidad permitida de 5, 10 y 25 para el primer, segundo y tercer nivel respectivamente. Se ponderan los criterios de **color** y **forma** y dentro de este último para **compactación** y **suavidad** de los objetos a generar, con los mismos valores para todos los niveles. Los valores dados a estos parámetros aparecen en la tabla 5.4.1.

**Tabla 5.4.1:** Parámetros de escala y criterios de heterogeneidad usados en cada nivel de segmentación

Criterio de Heterogeneidad	Nivel		
	1	2	3
Parámetro de escala	5	10	25
Color	0.8	0.8	0.8
Forma	0.2	0.2	0.2
Suavidad	0.1	0.1	0.1
Compactación	0.9	0.9	0.9

En la figura 5.4.1 se muestra un fragmento de imagen antes y después del proceso de segmentación, empleando un parámetro de escala de 10 y una ponderación de 0.8 para color y 0.2 para forma. A su vez el criterio de forma con sus dos criterios de suavidad y compactación con una ponderación asignada a cada uno de 0.1 y 0.9 respectivamente.

**Figura 5.4.1:** fragmento de imagen adquirida en la medición 4 y este mismo fragmento después del proceso de segmentación

a) Fragmento de imagen original



b) Fragmento de imagen segmentada, con un parámetro de escala de 10



Parámetros y ponderaciones usadas en la segmentación: color: 0.8, forma: 0.2 (suavidad: 0.1 y compactación: 0.9)

Al final del proceso de segmentación, se generaron imágenes con objetos independientes en tres diferentes niveles de heterogeneidad o escalas de contraste local de acuerdo a la similitud de color y forma.

### ➤ Clasificación

El objetivo de la clasificación es agrupar los objetos generados del proceso de segmentación en **categorías** que pueden tener o no una estructura **jerárquica**, según los intereses del investigador.

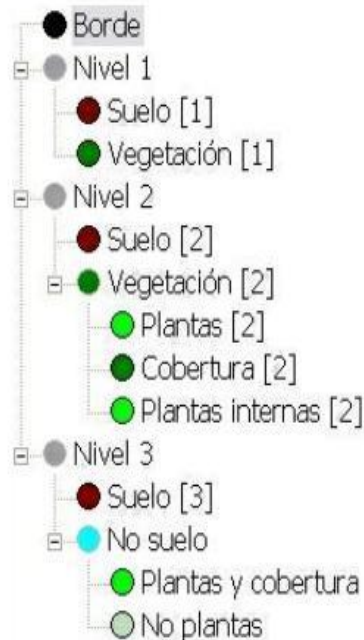


En este caso el propósito es el de separar las plantas de banano de los demás tipos de cobertura del suelo. En la figura 5.4.2a se muestra las categorías por nivel de segmentación y jerarquías empleadas para la agrupación de objetos.

Los objetos se asignan a las clases según su homogeneidad respecto a una o varias características **espectrales** y/o de **forma**. Para la asignación se usa una función de pertenencia empleando operadores de **lógica difusa** o **booleana**.

**Figura 5.4.2:** Clases jerárquicas de acuerdo con el nivel de segmentación y característica relación del azul.

a) Jerquia de clases



b) Relación de la banda azul



Relación del azul:  $B / (R+G+B)$ , donde B: azul, G: verde, R: rojo

La figura 5.4.2b muestra la relación de la banda azul ( $B / (R+G+B)$ , donde: R = Rojo, G = verde y B = azul), de un segmento de una imagen tomada a la parcela experimental con plantas de banano al inicio de la floración. En esta se aprecia que es una buena característica para la separación de las plantas de los demás tipos de cobertura del suelo, en esta fase de desarrollo.

Las características empleadas en la asignación de los objetos de cada nivel de segmentación a cada una de las clases mostradas en la figura 5.4.2a, se detallan en la tabla 5.4.2. En la figura 5.4.4a se muestra una imagen aérea de una parcela de cuatro meses de sembrada y en la 5.4.4b la misma imagen clasificada. En esta última se aprecia que los elementos según su

comportamiento para cada una de las características empleadas, se han asignado a una de tres clases: plantas, coberturas y suelo desnudo, obteniéndose una imagen mucho mas simple.

**Tabla 5.4.2:** Características por clase utilizadas para la clasificación de las plantas

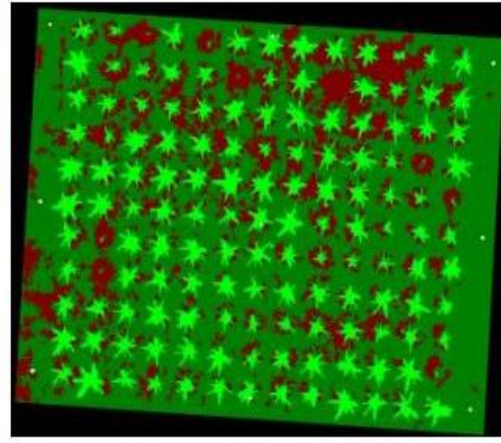
CLASE	CARACTERISTICA	CLASE	CARACTERISTICA
Borde	Brillo	Plantas intemas	Borde relativo a plantas [2] objetos vecinos
Suelo [1]	Brillo	Cobertura interna	Clasificado como planta
Suelo [2]	Existencia de suelo [1] sub-objetos(1)		No existencia de plantas [2] objetos vecinos (0)
	Existencia de suelo [3] super-objetos(1)	No existencia de plantas internas objetos vecinos (0)	
Marca [2]	No clasificados como marca [2]	Marca 3	Área
	Vecinos del verde		Brillo
Vegetación	Existencia de marca [3] super-objetos (1)	Suelo [3]	Ajuste elíptico
	No clasificados como suelo [2]		Razón del verde
Plantas [2] y cobertura vegetal [2]	Ratio del blue	Plantas y coberturas	Diferencia media AL vecino mas oscuro
	Ratio del verde		No clasificado como suelo [3]
	Ratio del rojo		No existencia de objetos vecinos a bordes
	Razón del azul		
	Razón del verde		
	Razón del rojo Verde/azul Vecinos del verde		

**Figura 5.4.3:** Imagen aérea de la parcela D, correspondiente con la tercera medición y esta misma imagen clasificada.

a) Imagen aérea lote parcela banano



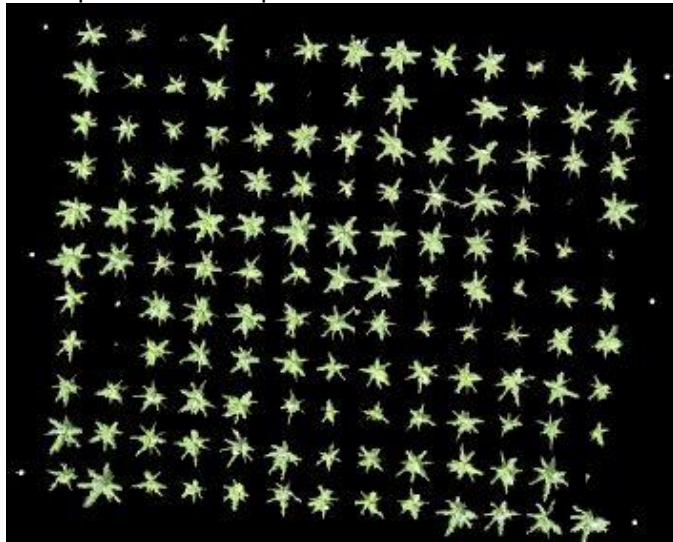
b) Imagen clasificada



● Suelo ● Cobertura ● Plantas

La imagen clasificada puede emplearse como **máscara** para aislar en la original cualquiera de los tipos de cobertura según el interés. Esto permite trabajar con una sola clase de elementos conservando las características que tenían en la imagen inicial. En este sentido cada una de las imágenes adquiridas de cada una de las parcelas en cada medición fueron segmentadas, clasificadas y aisladas las plantas de banano como aparece en la figura 5.4.4.

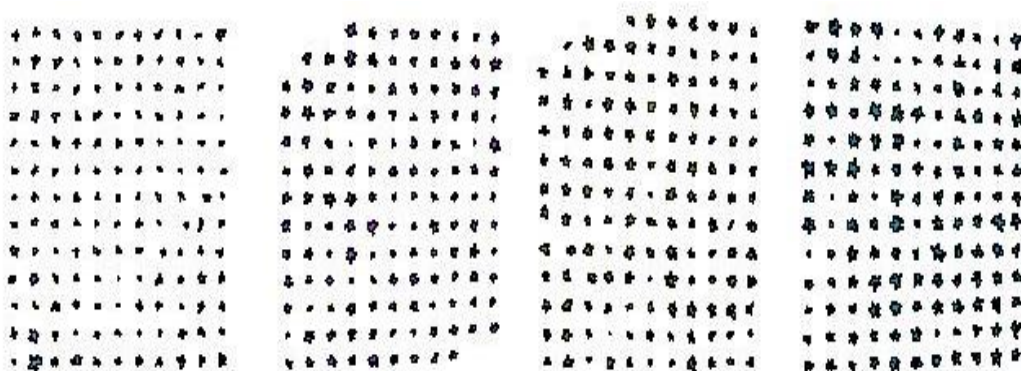
**Figura 5.4.4:** Imagen de la parcela D con plantas separadas, resultado final del procesamiento para la extracción de información de las imágenes



#### 5.4.2 Características de crecimiento a partir de las imágenes

Las imágenes con las plantas aisladas nuevamente se segmentan usando un parámetro de escala de 50. Como resultado se obtienen imágenes con objetos del tamaño de planta o más precisamente del tamaño del área proyectada por las hojas sobre un plano. Ecognition permite simultáneamente representar los objetos de la imagen en formato tipo raster o vector, teniendo en cuenta la estructura topológica de estos. Entonces aprovechando la última posibilidad y a partir de las imágenes con las plantas segmentadas, se generan los polígonos para cada una de estas ver figura 5.4.5.

**Figura 5.4.5:** Polígonos de plantas de banano de las cuatro parcelas con cuatro meses de sembradas



Finalmente cada polígono queda descrito tanto por características **espectrales** como de **forma**. Las espectrales básicamente son los promedios obtenidos de los valores de intensidad de los píxeles que

conforman el objeto para cada una de las bandas, incluyendo el brillo y las **desviaciones estándar** para cada banda. Las características de forma, son características **geométricas** sencillas usadas para describir los polígonos y con estos los objetos o plantas.

En la tabla 5.4.3 se detallan las características tanto espectrales como de forma usadas en la descripción de las plantas.

**Tabla 5.4.3:** Características espectrales y de forma exportadas de cada uno de los objetos

Característica General	Característica	Código
Valores de las capas	Brillo	Br
	Media del azul	Mean 1
	Desviación estándar del azul	SD 1
	Ratio del azul	Ratio 1
	Media del verde	Mean 2
	Desviación estándar del verde	SD 2
	Ratio del verde	Ratio 2
	Media del rojo	Mean 3
	Desviación estándar del rojo	SD 3
Genéricas de forma	Ratio del rojo	Ratio 3
	Largo	L
	Ancho	W
	Largo/ancho	L/A
	Borde izquierdo	BL
	Índice de forma	SI
	Densidad	Den
	Dirección principal	Mdir
Asimetría	Asy	
Basada en los polígonos	Área	A
	Perímetro	Per
	Compactación	spComp
	Número de bordes	Noedges
	SD de la longitud de los bordes	SDLedg
	Promedio de la longitud de los bordes	AveLedg
	Longitud del borde mas largo	LenLEdg

### 5.4.3 Análisis de las características espectrales y de forma en la determinación del crecimiento de las plantas de banano.

#### ➤ Características espectrales

Las características espectrales de la imagen están altamente influenciadas por factores como: condiciones de iluminación, hora del día, tipo de sensor, parámetros de calibración y la distorsión presentada por la altura de captura de la imagen, en el siguiente ejemplo se sustenta porque no pudieron ser empleadas las características espectrales en la evaluación del crecimiento de las plantas.

En la tabla 5.4.4 aparece la hora del día en la que se tomaron cuatro imágenes de la parcela C y los intervalos de tiempo entre estas, expresado en segundos. En las figuras 5.4.6 a y b se muestran dos de estas imágenes, la 1 y 2 respectivamente, en las cuales se aprecia diferentes condiciones de



iluminación. La imagen 1, presenta una combinación de iluminación: difusa en el sector superior derecho, básicamente por la presencia de una nube y directa en la mitad inferior de la imagen; mientras que en la imagen dos, la iluminación es predominantemente directa.

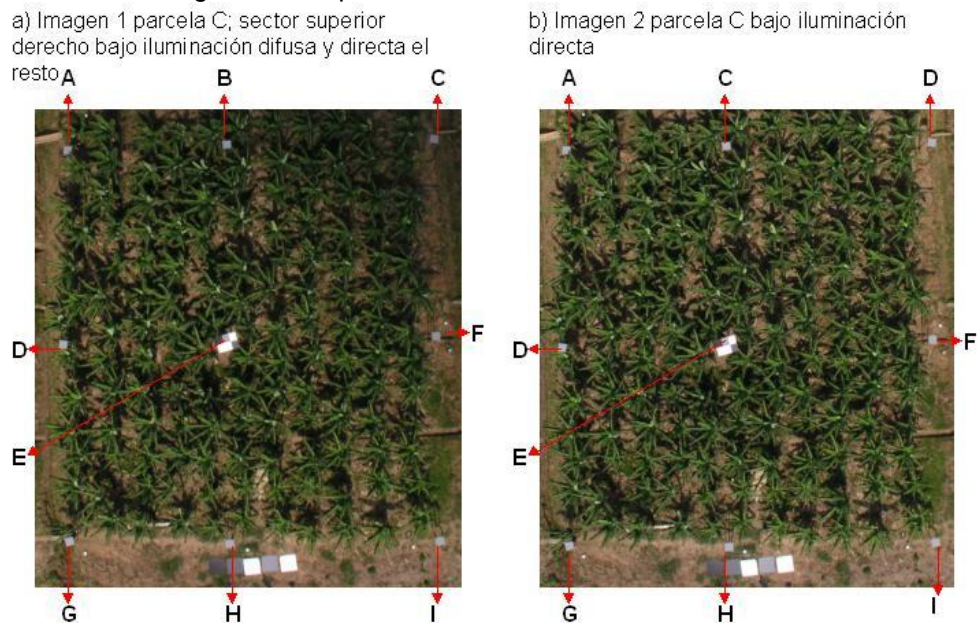
**Tabla 5.4.4:** Hora en la cual se realizo la captura de 4 imágenes adquiridas de la parcela C

Medición	Hora de captura	Diferencia (segundos)
1	10:03:34	
2	10:04:11	34
3	10:04:40	29
4	10:06:38	138

Las placas A, B, C, D, E, F, G, H e I, distribuidas en maya en la parcela C, como se aprecia en las figuras 5.4.6.a y b, fueron pintadas con el mismo nivel de gris, esto para tener objetos con las mismas características reflectantes.

Cada una de las placas en cada una de las 4 tomas o mediciones fueron aisladas. Los valores de intensidad para el R, G, y B del grupo de píxeles que conforma cada placa se usaron para comparar la iluminación dentro y entre imágenes.

**Figura 5.4.6:** Dos imágenes de la parcela C, ilustrando dos condiciones de iluminación

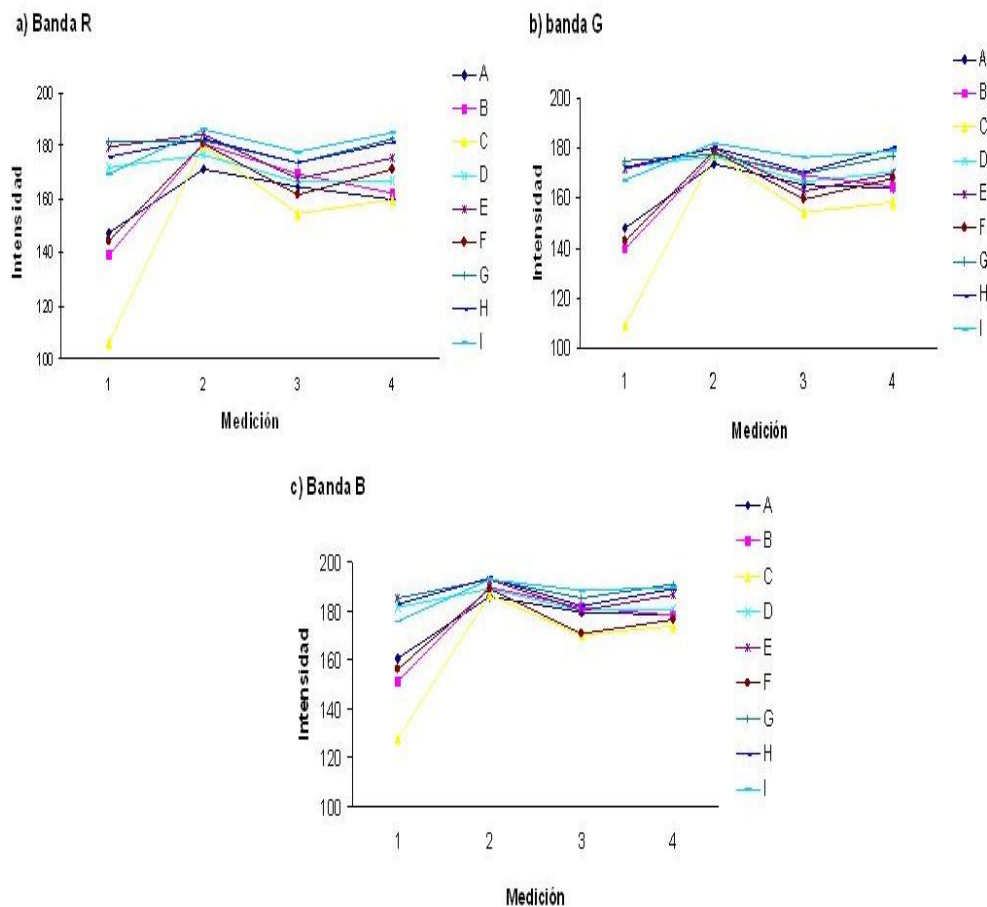


Las placas reflectantes A, B, C, D, E, F, G, H e I, pintadas con el mismo nivel de intensidad de gris y distribuidas en malla por toda la parcela C.

La intensidad media reflejada por cada una de las placas presentan diferencias tanto dentro de las imágenes como entre estas, ver tabla 5.4.5. Aunque en este experimento no se evalúan todas las fuentes que inducen tal

variación en las características espectrales de las imágenes, si podemos decir en este caso que la mayor variabilidad dentro de una misma imagen se da cuando en esta se presentan áreas que fueron iluminadas difusa y otras directamente, esto conlleva a tener diferentes sectores con iluminación uniforme, pero altamente contrastantes entre ellos. En las figuras 5.4.7 a, b, c y 5.4.8a se aprecia la formación de tres niveles de intensidad, que a su vez corresponden con tres condiciones de iluminación (directa, difusa y la zona limite entre la difusa y directa) dentro de la imagen. Cuando toda la imagen es iluminada predominantemente bajo un mismo tipo de iluminación, difusa o directa, la variabilidad en la intensidad es baja, en este caso se trabajo con el mismo tipo de sensor y con los mismos parámetros de iluminación, deberá investigarse que tan significativos son estas variaciones en los cambios de reflectancia presentados por las plantas cuando cambian las condiciones fisiológicas de estas. Las variaciones entre imágenes, si son considerables, así parezcan haber sido tomadas bajo las mismas condiciones de iluminación, ver figura 5.4.8b.

**Figura 5.4.7:** Comportamiento promedio de la intensidad de las bandas R, G y B (verde) en campo, parcela C.



Las letras A, B, C, D, E, F, G, H e I, identifican los valores promedio para cada una de las placas ubicadas en la parcela C.

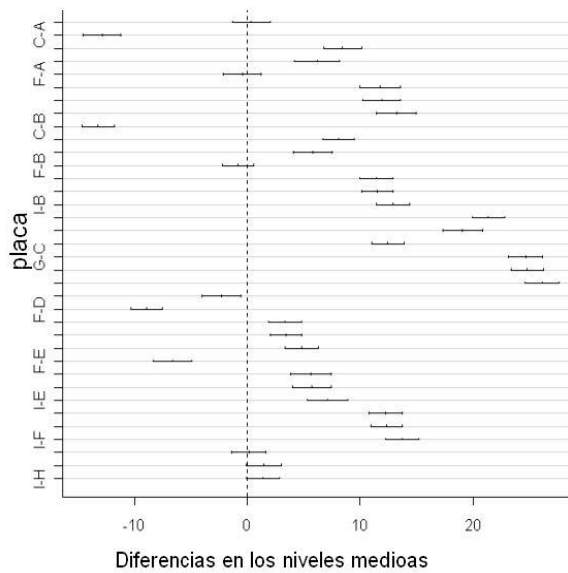
**Tabla 5.4.5:** Análisis de varianza para los niveles de intensidad de la banda R

ANOVA					
Fuente de variación	df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr (>F)
Imagen	3	595318	198439	1830.8	<2.2e-16***
placa	8	540717	67590	623.34	<2.2e-16***
Residuales	8047	872551	108		

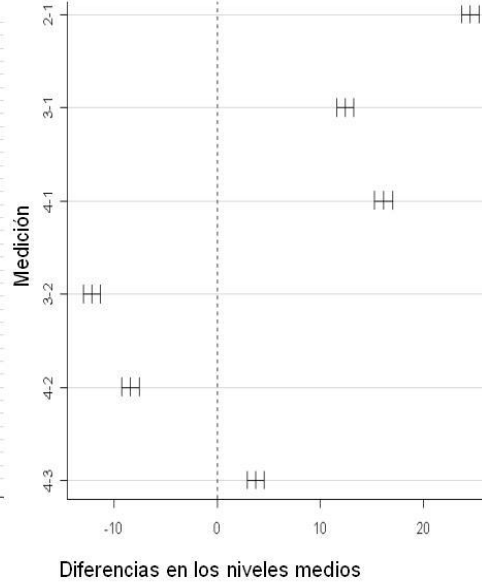
Signif. codes: 0 '\*\*\*' 0.001 '\*\*' 0.01 '\*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

**Figura 5.4.8:** Diferencias en los niveles medios de intensidad del verde

a) Niveles de confianza para las diferencias en la intensidades medias del verde de las placas



b) Niveles de confianza para las diferencias en la intensidades medias de verde entre imágenes



Las diferentes formas de iluminación, parecen no afectar la composición espectral de la luz reflejada por el objeto. Las variaciones en la intensidad son proporcionales para todas la bandas, ver figura 5.4.7, siempre y cuando las características del objeto no cambien, esto indica que las variaciones en la composición espectral reflejada por los objetos en una imagen se deben mas a las diferencias en las características propias o a los cambios en las propiedades de estos, que a las variaciones de intensidad. Esto sin embargo es materia de nuestro estudio, el desarrollo de un método para la normalización de la iluminación, tanto dentro de una imagen como entre imágenes, de tal manera que puedan usarse las características espectrales para hacer seguimiento a diferentes aspectos del sistema banano.

Por lo anterior hasta tanto no se tenga este método que permita la normalización de las imágenes, no se usarán las características espectrales, para el seguimiento de problemas fisiológico o patológico en las plantas de banano.

### ➤ **Características de forma obtenidas de las imágenes**

Algunas de las características que describen la forma de los objetos (correspondientes a plantas), se obtienen como combinaciones lineales de otras, por lo que estas variables presentan una estrecha relación. Se destaca además que estas características son independientes de las condiciones de iluminación en las que fue capturada la imagen.

En la tabla 5.4.6, se muestra la matriz de correlaciones para las características de forma de los polígonos de 64 plantas en tres mediciones, echas durante la fase de crecimiento de las plantas de banano. En esta tanto las características de los objetos como de los valores de correlación están clasificados con colores por categorías así: **verde**, aquellas variables cuya correlación es superior a 0.85, con al menos otra de las variables o para los valores de correlación superior a este valor; **azul**, aquellas variables en las que su correlación esta entre 0.55 y 0.74, con al menos otra variable o para los valores de correlación en este rango; **amarillo**, para las variables que presentan una correlación con valores entre 0.35 y 0.54 con al menos otra de las variables, o para los valores de correlación en este rango; y se clasificaron con el color **rojo**, todas aquellas variables cuya correlación con todas las demás variables es menor a 0.35 o para los valores de correlación menores a este valor.

Se puede apreciar entonces la alta relación presentada entre varias de las características. El área de los objetos o plantas es la característica de forma que mas relación presenta con las demás, situación obvia puesto que en su obtención implica el uso directo de otras características como el largo o el ancho del objeto o su cambio implica una relación directa con otras características como por ejemplo con el perímetro, el numero de bordes entre otras.

Las característica que menor relación presentan con las demás es la dirección principal de los objetos, seguida por la relación largo ancho de los objetos, la asimetría y la densidad.

Lo anterior sugiere que para evitar redundancia en la información puede reducirse el número de características a usar, sin perdida de información por su exclusión o ganancia por la inclusión de estas.

Por análisis de componentes principales, como se describe en el numeral 5.4.4, se seleccionó un grupo de variables las cuales retenían la mayor variabilidad de los objetos o plantas.



**Tabla 5.4.6:** Matriz de correlaciones de las características de forma de las plantas obtenidas a partir de las imágenes

	L	W	BL	L/A	SI	Den	Mdir	Asy	A	Per	Comp	NoEd	SDLedg	AveLedg	LenLEdg
L	1.0	0.9	0.9	0.0	0.6	0.3	-0.1	0.1	1.0	0.9	-0.6	0.6	0.8	0.9	0.9
W		1.0	0.9	-0.4	0.6	0.5	-0.1	-0.4	1.0	0.9	-0.6	0.7	0.8	0.8	0.8
BL			1.0	-0.1	0.8	0.3	-0.1	-0.1	1.0	1.0	-0.7	0.8	0.8	0.8	0.9
L/A				1.0	-0.1	-0.5	0.1	1.0	-0.1	-0.2	0.2	-0.3	-0.1	0.0	-0.1
SI					1.0	-0.1	-0.1	-0.2	0.6	0.8	-0.9	0.8	0.6	0.5	0.6
Den						1.0	-0.1	-0.5	0.4	0.3	0.0	0.3	0.1	0.2	0.2
Mdir							1.0	0.1	-0.1	-0.1	0.1	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1
Asy								1.0	-0.1	-0.1	0.3	-0.3	-0.1	0.0	-0.1
A									1.0	1.0	-0.5	0.6	0.8	0.9	0.8
Per										1.0	-0.7	0.8	0.8	0.8	0.9
Comp											1.0	-0.8	-0.5	-0.4	-0.5
NoEd												1.0	0.4	0.4	0.5
SDLedg													1.0	0.9	1.0
AveLedg														1.0	0.9
LenLEdg															1.0

Rangos de correlación    ■  $\geq 7.5$ ;    ■  $5.5 - 7.4$ ;    ■  $3.5 - 5.4$ ;    ■  $< 3.5$

donde: **L**: longitud, **W**: ancho, **BL**: borde izquierdo, **L/W**: largo / ancho, **SI**: índice de forma, **Den**: densidad, **Mdir**: dirección principal, **Asy**: asimetría, **A**: área, **Per**: perímetro, **Comp**: compactación, **NoEdg**: número de bordes, **SDLedg**: desviación estandar de la longitud de los bordes, **AveLedg**: longitud promedio de los bordes, **LenLEdg**: longitud del borde mas largo

#### 5.4.4 Análisis de interdependencia de las características de forma seleccionadas a partir de las imágenes

Se generaron las componentes principales (CP) mediante los valores y vectores propios de la matriz de varianza-covarianza obtenida a partir de los datos estandarizados. De las 15 características de forma generadas, se proponen 5, las cuales retienen la mayor variabilidad de los objetos o plantas, estas características son: el área, el índice de forma, la densidad, la dirección principal y la asimetría.

Matemáticamente el **índice de forma (SI)** está definido por la relación entre la longitud del borde del objeto y cuatro veces la raíz cuadrada de su área.

$$(57) \quad SI = \frac{e}{4\sqrt{A}}$$

donde: **e** longitud del borde del objeto y **A**: área del objeto

**La densidad (Den)**, expresa la relación entre el área cubierta por el objeto y su radio. eCognition® trabaja con la relación entre el número de píxeles que forma el objeto de la imagen y el radio aproximado obtenido a partir de la matriz de covarianza.

$$(58) \quad d = \frac{\sqrt{n}}{1 + \sqrt{Var(X) + Var(Y)}}$$

donde: **n** número de píxeles

**La dirección principal (Mdir)**, es considerada por eCognition® como la dirección del vector propio correspondiente al mayor de los dos valores propios generados de la matriz de covarianza de la distribución espacial del objeto, el valor de la característica oscila entre [0, 180].

**La asimetría (Asy)**, se entiende como la aproximación de los objetos a una elipse y se expresa como la relación entre la longitud del eje menor y el eje mayor de esta elipse.

$$(59) \quad \kappa = 1 - \frac{n}{m}$$

donde: **k**: asimetría, **n** eje menor, **m** eje mayor

**El área** de los polígonos correspondientes a los objetos o plantas se basa en el teorema de Green. Dado los puntos  $(x_i, y_i)$ ,  $i= 0, \dots, n$ , con  $x_0 = x_n$  y  $y_0 = y_n$ , entonces el área se obtiene según la siguiente formula:

$$(60) \quad Area = \frac{1}{2} \sum_{i=0}^{n-1} a_i \quad \text{donde} \quad a_i = x_i y_{i+1} - x_{i+1} y_i$$

En la tabla 5.4.7 se detalla la proporción de variabilidad retenida por cada CP, mediante la matriz varianza covarianza de los datos estandarizados de estas 5 características.

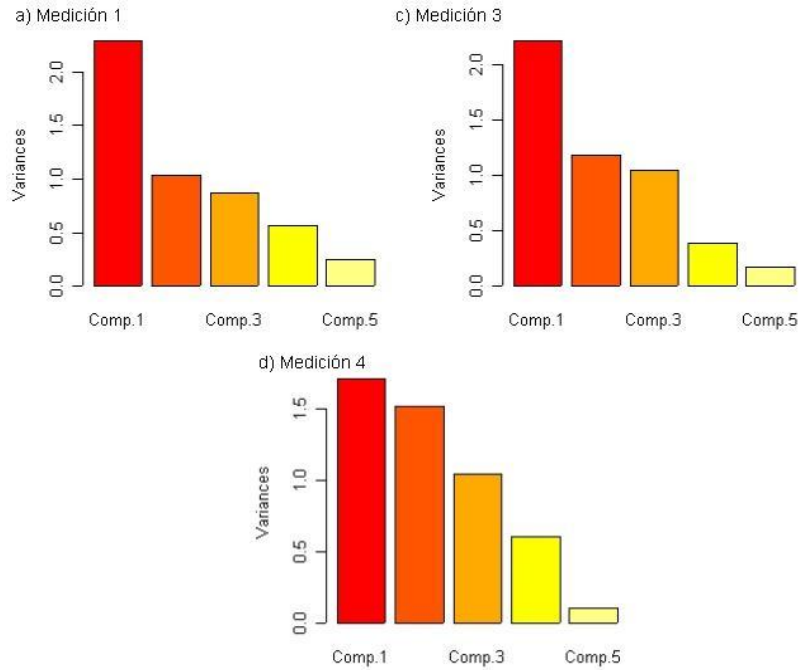
En promedio en las tres mediciones, las dos primeras CPs retienen alrededor del 66 % de la variabilidad total y con las tres primeras el 86 % .

**Tabla 5.4.7:** Proporción de variabilidad retenida por cada componente principal en cada medición.

Medición	Proporción retenida				
	CP1	CP2	CP3	CP4	CP5
M1	0.46	0.21	0.17	0.11	0.05
M3	0.44	0.24	0.21	0.08	0.03
M4	0.34	0.30	0.21	0.12	0.02

Uno de los criterios para la selección de las CPs consiste en, tomar aquellas cuyos valores propios asociados estén por encima de la media y como los datos fueron estandarizados entonces se recomienda seleccionar aquellas con valores propios mayores que 1. En la figura 5.4.9, se aprecia que las tres primeras componentes tienden a cumplir con este criterio.

**Figura 5.4.9:** Valores propios asociados a cada una de las componentes principales en cada una de las tres mediciones efectuadas.



Las componentes de los vectores propios suministran las ponderaciones o grados de importancia de cada variable con el respectivo CP. En la tabla 5.4.8 se muestran cada uno de estos valores para cada una de las 5 variables. Las figuras 5.4.10 a, b y c muestran gráficamente la importancia de cada variable respecto a las CPs 1 y 2.

**Tabla 5.4.8:** Vectores propios, grados de importancia de cada variable respecto a las componentes principales, para cada una de las tres mediciones.

Medición	Variable	Comp1	Comp2	Comp3	Comp4	Comp5
M1	SI	-0.40	-0.41	0.69	0.07	-0.43
	Den	-0.49	0.45	-0.41	0.03	-0.62
	Mdir	0.23	0.74	0.54	0.33	0.01
	Asy	0.51	-0.29	-0.22	0.65	-0.43
	A	-0.54	-0.06	-0.11	0.67	0.49
M3	SI	0.07	0.80	0.44	-0.14	0.37
	Den	0.58	-0.29	-0.22	-0.25	0.69
	Mdir	-0.01	0.47	-0.82	0.32	0.07
	Asy	-0.55	0.02	-0.28	-0.78	0.10
	A	0.59	0.22	-0.12	-0.46	-0.61
M4	SI	-0.11	0.78	0.08	0.06	-0.60
	Den	0.65	-0.33	-0.11	-0.32	-0.60
	Mdir	0.02	-0.04	0.94	-0.33	0.04
	Asy	-0.57	-0.09	-0.26	-0.77	-0.11
	A	0.49	0.52	-0.17	-0.44	0.52

Donde: **SI**: índice de forma, **Den**: densidad, **Mdir**: dirección principal, **Asy**: asimetría y **A**: área



adoptada por las hojas de las plantas en un momento dado, pero que es afectada por diversos factores como por ejemplo la iluminación directa o difusa que regula la apertura y cierre de la lamina foliar de las plantas para la captación de luz, la misma variación del ángulo de iluminación a lo largo del día puede estar induciendo configuraciones particulares de la planta, alteraciones fisiológicas entre otros aspectos que afectan la geometría del canopy de la planta.

Básicamente la **dirección principal** describe el ángulo formado entre el eje principal del objeto y la línea vertical paralela al eje **y** de la imagen que pasa por el centro de cada objeto. Esta variable se ajusta mejor con la CP2 sin embargo su importancia disminuye a medida que las plantas crecen y básicamente es por que las plantas van adoptando una forma circular, no existiendo una dirección principal dominante a medida que estas llegan a la floración.

El **índice de forma** se relaciona con la suavidad de los bordes de los objetos o plantas en la imagen, su mayor ajuste se presenta con la CP2 en la mediciones 4 y 4, y parece ser otra buena característica para describir las configuraciones que pueda adoptar el canopy de las plantas de banano frente a diferentes condiciones.

La **densidad** en todas las mediciones tiende a comportarse de forma inversa a la asimetría, la densidad describe la compactación de un objeto entonces entre mas denso también tiende a ser menos asimétrico.

En resumen el área es la característica que mejor describe el crecimiento de las plantas, la asimetría y la densidad retienen buena variabilidad incluso cuando las plantas han detenido su crecimiento; tendrá que evaluarse hasta donde pueden ser usadas para describir los cambios morfológicos en las plantas y la relación de estos con alteraciones fisiológicas. El índice de forma es una característica que se ajusta bien a la CP2, sin embargo debe investigarse mas su relación con la morfología y/o fisiología de la planta de banano (Figuras 5.4.10 a, b y c).

Finalmente las variables propuestas para evaluar los cambios entre las mediciones de las plantas a través de las imágenes son: el área, el índice de forma, la densidad, la dirección principal y la asimetría.

#### **5.4.5 Estadísticos descriptivos de las características de forma de los objetos o plantas extraídos de las imágenes**

**Índice de forma**, en los objetos o plantas extraídos de cada una de las imágenes en las mediciones 1, 3, y 4, el SI osciló entre 1.29 – 2.88, 1.13 - 3.96 y 1.25 – 4.54 respectivamente, con promedios de 2.07, 2.48, y 2.79 en

el mismo orden. La desviación estándar de SI fue de 0.27 para las mediciones 1 y 3 y de 0.53 en la medición 4. Se observa dos aspectos interesantes, el primero está relacionado con el incremento en los valores promedios y el segundo está relacionado también con un incremento de la variabilidad entre los periodos de evaluación, ver tabla 5.4.9.

Respecto a la **densidad los objetos** o plantas variaron entre 1.41 - 2.2, 1.32 - 2.25 y de 1.1 - 2.26, con promedios de 1.94, 1.99 y 2.0 para las mediciones 1, 3 y 4. La desviación estándar fue 0.1, 0.12 y 0.11 en cada una de las mediciones en el orden anterior, ver tabla 5.4.9. Aparentemente son leves los cambios en los promedios de la densidad de los objetos o plantas, aunque estos son ascendentes de una medición a otra. La desviación estándar en este caso no se incrementa con el tiempo.

Los objetos o plantas oscilaron respecto a la **dirección principal** con ángulos entre 0.39 - 179, 0.61 - 179 y 0.58 - 179 en las mediciones 1, 3 y 4. Los valores promedios fueron de 90.7, 93, y 90 para cada una de las mediciones en el mismo orden anterior y una desviación estándar de 48, 55, y 47, ver tabla 5.4.9. Los promedios de esta variable no muestran una tendencia entre mediciones, lo mismo parece indicar la desviación estándar, aunque si la variabilidad si es alta.

**La asimetría** presento como valor mínimo 0.01 en todas las mediciones y valores máximos 0.89, 0.82 y 0.9 en las mediciones 1, 3 y 4 respectivamente. Los promedios presentados en cada una de las mediciones en el orden anterior fueron de 0.28, 0.21, 0.25, indicando un decrecimiento leve entre mediciones. Las desviaciones estándar fueron de 0.12, 1.29 y 0.11 en cada medición en el orden anterior. La mayor variabilidad correspondió con la medición 3, ver tabla 5.4.9.

**El área de los objetos** o plantas expresada en metros cuadrados presenta valores mínimos de 0.03, 0.02 y 0.14 en las mediciones 1, 3 y 4 respectivamente y valores promedios de 0.36, 1.17 y 4.26 m<sup>2</sup> en cada una de las mediciones en el orden indicado anteriormente. Los valores de desviación estándar fueron de 0.2, 0.53 y 1.26, ver tabla 5.4.9. Los valores promedios de área de los objetos o plantas, tienen una tendencia creciente entre mediciones, al igual que la variabilidad.

En la tabla 5.4.9, aparecen algunos estadísticos con los cuales se pueden examinar gruesamente el comportamiento de cada una de las cinco características de forma descritas anteriormente y obtenidas de los objetos o plantas a partir de las imágenes.

**Tabla 5.4.9:** Estadísticos para las características de forma de los objetos (plantas obtenidas a partir de las imágenes).

Característica	medición	n	Media	RIQ	mínimo	1er cuartil	Mediana	3er cuartil	máximo	sd	curtosis
Índice de forma (IS)	1	561	2.07	1.59	1.29	1.90	2.07	2.24	2.88	0.27	0.41
	3	564	2.48	2.83	1.13	2.28	2.48	2.67	3.96	0.27	-0.33
	4	663	2.79	3.29	1.25	2.45	2.78	3.08	4.54	0.53	-0.10
Densidad (Den)	1	561	1.94	0.80	1.41	1.87	1.95	2.03	2.21	0.10	-0.68
	3	564	1.99	0.93	1.32	1.94	2.02	2.07	2.25	0.12	-0.42
	4	563	2.01	1.15	1.11	1.95	2.04	2.11	2.26	0.11	0.34
Dirección principal (Mdir)	1	561	90.73	135.35	0.39	44.35	92.57	138.90	179.70	48.00	-7.54
	3	564	93.17	178.69	0.61	51.08	95.80	134.90	179.30	55.00	-1.39
	4	663	90.73	179.22	0.58	46.29	89.29	135.30	179.80	47.09	-0.93
Asimetría (Asy)	1	561	0.28	0.88	0.01	0.16	0.25	0.36	0.89	0.12	-0.12
	3	564	0.21	0.81	0.01	0.12	0.19	0.28	0.82	1.29	0.12
	4	663	0.25	0.89	0.01	0.15	0.23	0.33	0.90	0.11	-0.31
Área (A)	1	561	0.36	1.10	0.03	0.21	0.32	0.48	1.13	0.20	0.34
	3	564	1.17	3.38	0.02	0.75	1.16	1.53	3.40	0.53	-0.84
	4	663	4.26	14.14	0.14	3.50	4.44	5.22	14.28	1.26	-0.14

Donde: **SI**: índice de forma, **Den**: densidad, **Mdir**: dirección principal, **Asy**: asimetría y **A**: área

Como cada una de las anteriores características se registra en tres ocasiones sobre 16 plantas en cada una de cuatro parcelas que conforman el lote experimental, entonces la verificación de la utilidad de estas características obtenidas de las imágenes para determinar el crecimiento de las plantas de banano se realiza a través de la estadística lambda de Wilks. Dado que los periodos de tiempo no son igualmente espaciados la aproximación o ajuste de la curva se realiza a través del ajuste de polinomios de grado k con K menor que el número de periodos y considerando cada parcela como un grupo, esto para verificar simultáneamente diferencias entre estas.

**Tabla 5.4.10:** Estadística lambda de Wilks para verificar tendencia de crecimiento en cada una de las características de forma usadas.

Fuente de Variación	Lambda de Wilks calculado	Chi cuadrado (0.05, p-k-1)q	Chi cuadrado (0.01, p-k-1)q	Pr
Área	110.9375	7.81	11.34	0.05 > 2.113063e-23
IS (Índice de forma)	21.87869			0.05 > 1.774612e-05
Densidad	30.52016			0.05 > 2.358482e-07
Mdir (dirección ppal)	4.894614			0.05 > 0.08652629
Asy (Asimetría)	12.36601			0.05 > 0.002064214

Según lo anterior el área de los polígonos u objetos correspondientes a las plantas es la característica que más fuertemente describe el cambio de estas entre mediciones y el polinomio que mejor ajuste presenta es el lineal ( $-0.54 + 0.97t$  donde t es el tiempo en semanas).

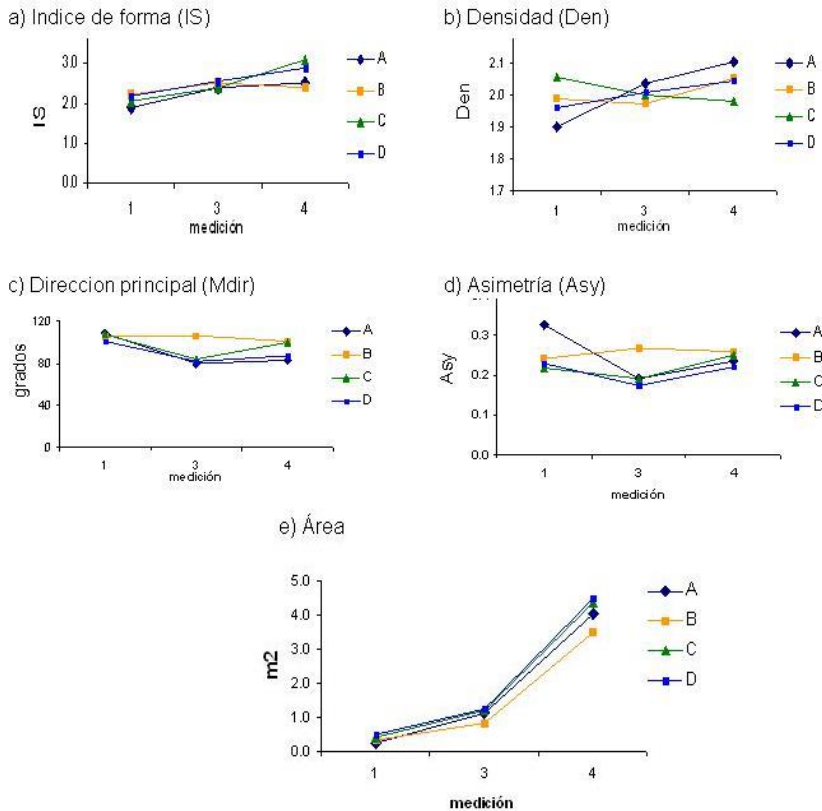
El índice de forma y la densidad también presentan una tendencia significativa sin embargo no es tan fuerte como el área, (ver tabla 5.4.10), concluyéndose entonces que el área de los polígonos es un buen parámetro para estimar el crecimiento de las plantas de banano a partir de las imágenes.

La comparación de los perfiles entre las parcelas (ver figura 5.4.10 a,b,c,d y e), que no es mas que la comparación del patrón geométrico, obtenido por la conexión de los promedios de cada medición para cada una de las características anteriores, indica que estos son paralelos y que ninguna de las parcelas es uniformemente mejor que las demás, para ninguna de ellas, esto es que están en el mismo nivel. De nuevo el área es la característica que con mayor fuerza indica que los perfiles no son planos en los cuatro grupos. La dirección principal y la asimetría son características cuyos perfiles pueden considerarse como planos (ver tabla 5.4.11).

De acuerdo con el ACPs, otras características que presentan un fuerte cambio entre mediciones y que pueden ser usadas para registrar el crecimiento de las plantas de banano son el largo, el ancho, desviación estándar de la longitud de los bordes, longitud promedio de los bordes, longitud del borde izquierdo, número de bordes, y la longitud del borde mas largo.

Estos resultados también son concordantes con los obtenidos a través de las variables de medición por métodos tradicionales, en el sentido que a través de ninguna de ellas se detecto diferencias estadísticamente apreciables en el crecimiento de las plantas entre cuatro parcelas estudiadas.

**Figura 5.4.11:** Perfiles medios para cinco características de forma usadas en la descripción de los objetos o plantas en las imágenes.





**Tabla 5.4.11:** Estadística lambda de wilks y T2 de Hotelling para verificación del comportamiento de los perfiles de cinco características obtenidas a partir de las imágenes.

Hipótesis	Lambda de Wilks						
	calculado					tabulado	parámetros
	IS	Dens	Mdir	Asy	Área		
Perfiles paralelos	0.65	0.58	0.97	0.85	0.87	0.81	(0.05 2 60 3)
Perfiles en el mismo nivel	0.76	1.00	0.95	0.93	0.87	0.87	(0.05 1 60 3)
	T2 de Hotelling						
Perfiles planos	112.20	18.98	3.23	6.31	5268.39	8.5	(0.05 3 60)

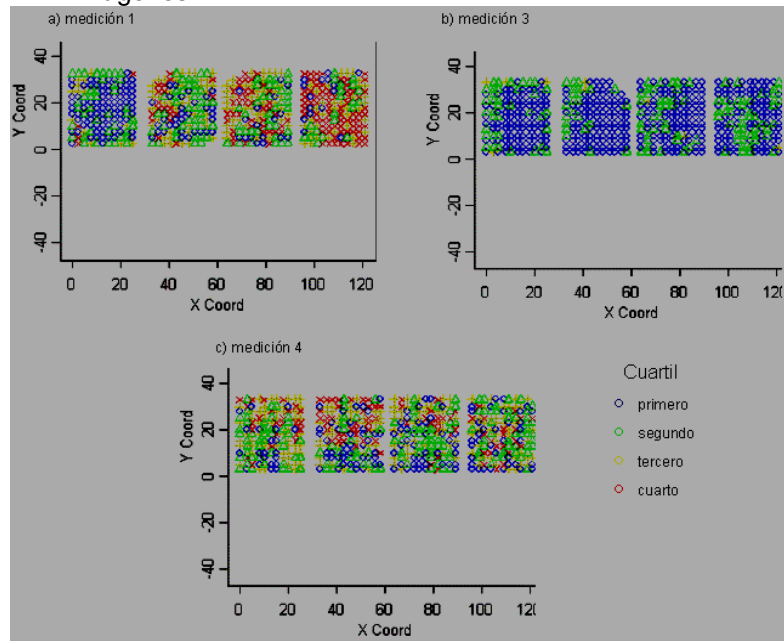
Donde: **IS**: índice de forma, **Dens**: densidad, **Mdir**: dirección principal, **Asy**: asimetría y **A**: área

### 5.4.6 Comportamiento espacial de las características de las imágenes

#### ➤ Área de las plantas obtenidas a partir de imágenes

Las figuras 5.4.12 a, b y c, muestran la distribución espacial por cuartiles, para las áreas de las plantas obtenidas de las imágenes en todo el lote experimental en cada una de las tres mediciones. En la medición 1 figura 5.4.12 a, se observa un aumento claro de las áreas en el sentido positivo del eje coordenado x; en la medición tres, figura 5.4.12 b, no se observa ninguna tendencia clara y en la medición cuatro si se aprecia una tendencia pero con un ángulo de 45 grados, ver figura 5.4.12 c.

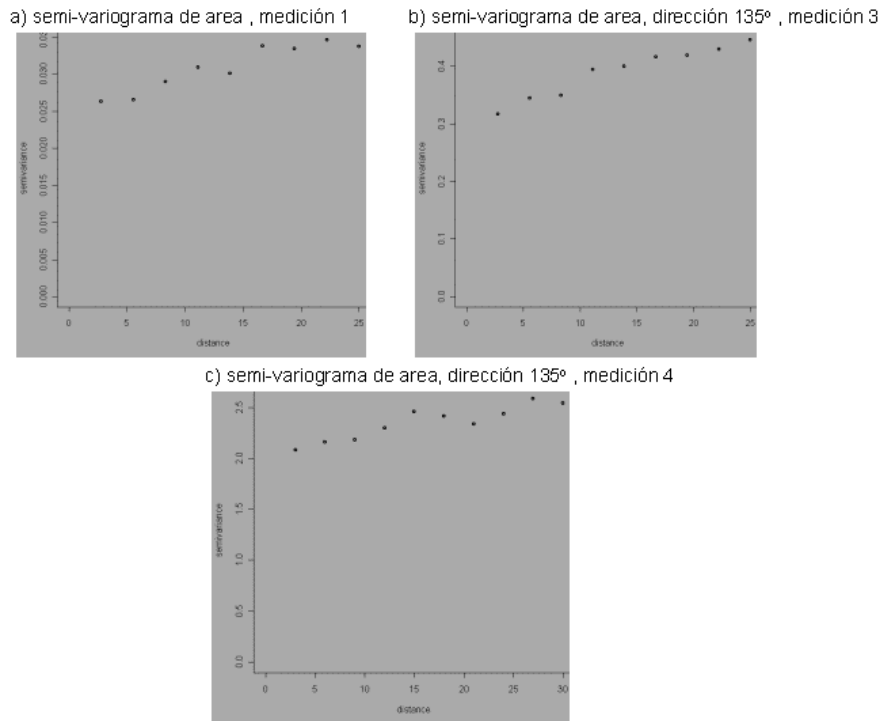
**Figura 5.4.12:** Distribución espacial por cuartiles del área de los objetos obtenidas de las imágenes.



En las figuras 5.4.13 a, b y c se presentan los semi-variogramas para las áreas en las tres mediciones. En todos los casos se evidencia una diferencia en las áreas que se relaciona con la distancia, sin embargo en la medición 1 la covarianza parece estar influenciada únicamente por la distancia (isotrópico), mientras que en las mediciones dos y tres además de la distancia influye la dirección (anisotrópica).

Parece observarse también para la primera medición la existencia de grupos, pero muy probablemente este comportamiento está relacionado con las diferencias entre los lotes de plantas usados como semilla para la siembra de cada parcela, puesto que a medida que van creciendo las plantas, este desaparece, presentándose únicamente la tendencia reflejo de la variabilidad probablemente de las características del suelo.

**Figura 5.4.13:** Semi-Variogramas para la áreas de las plantas obtenidas de las imágenes.



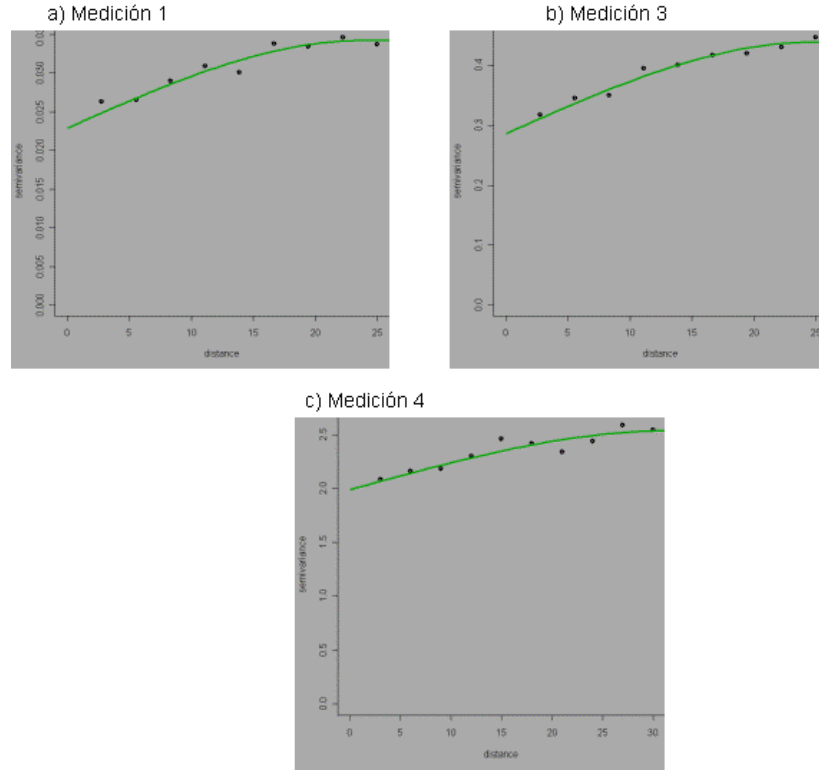
Para las predicciones espaciales (mapeo), se ajustó a todos los semi-variogramas empíricos estimados de los conjuntos de datos, un modelo de semi-variograma. Una de las expresiones de las funciones de covarianza que mejor ajuste presentó para esta característica en las tres mediciones fue la de “*matern*” (exponencial), ver figura 5.4.14.

$$(61) \rho(h) = (1/(2^{kappa-1} \times \gamma(kappa))) \times ((h/\pi)^{kappa}) \times K_{kappa}(h/\pi)$$

Donde  $\pi$  es el parámetro básico de la función de correlación, esta función tiene adicionalmente un parámetro extra denominado **kappa** y el parámetro de suavización **K\_kappa(x)**, el cual básicamente denota la función Bessel de tercera clase.

En la tabla 5.4.12 se detallan los parámetros de los modelo de semi-variogramas, ajustados a los semi-variogramas empíricos obtenidos a partir del área de los polígonos de los objetos o plantas en las imágenes adquiridas en cada una de las tres mediciones.

**Figura 5.4.14:** Modelos de Semi-variogramas ajustados (exponencial) a los semivariogramas empíricos, para las áreas de los objetos obtenidos de las imágenes.

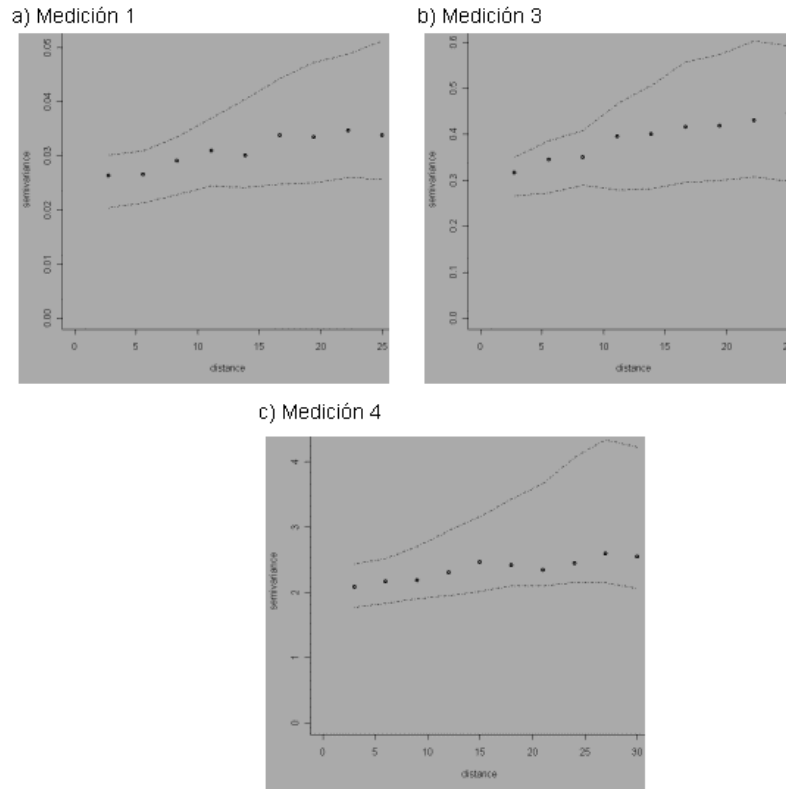


**Tabla 5.4.12:** Parámetros de los modelos de semi-variogramas para las mediciones 1,4 y 4, usando la función de correlación “matern” (exponencial)

Parámetro	Medición		
	1	3	4
nugget	0.02	0.32	2.00
kappa	0.50	0.50	0.50
Sill parcial (estimado)	0.17	0.38	3.62
Rango (estimado)	20.45	70.70	156.92
sum.cuad pond minimizada	983.63	65.15	25.38

Los variogramas envolventes basados en las simulaciones de los parámetros estimados del modelo de semi-variograma ajustado, muestran que todos los semi-variogramas empíricos tienen un buen ajuste al inicio, el cual se va perdiendo a medida que se incrementa la distancia, ver figura 5.4.15.

**Figura 5.4.15:** Semi-variogramas envolventes obtenidos a partir del modelo ajustado a los semi-variogramas empíricos para las áreas obtenidas en la medición 1, 4 y 4.

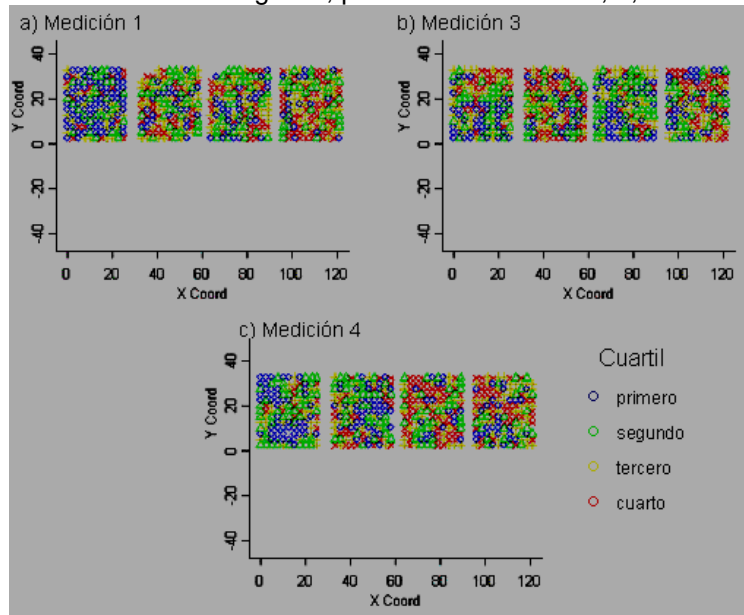


Los mapas muestran para la primera medición primero la existencia de grupos de área y una tendencia clara a incrementar el área de las plantas obtenidas de las imágenes en el sentido del eje x. Como se dijo la conformación de grupos muy probablemente se debe a las diferencias en los lotes de plantas que se usaron para sembrar cada una de las parcelas. Un aspecto importante es la capacidad que tienen las plantas de recuperarse morfológicamente y es así como desaparecen las diferencias entre parcelas con el crecimiento de las plantas.

➤ **Índice de forma de los objetos de las plantas**

El comportamiento en el espacio y en el tiempo del índice de forma (SI) se muestra por cuartiles en las figuras 5.4.16 a, b y c. En términos espaciales las plantas con valores mas altos de SI tienden a pertenecer a la parcela D, plantas con valores bajos a la A y con valores intermedios a ubicarse entre la B y la C. Teniendo presente el tiempo, esto es entre mediciones, se observa que las parcelas A y D tienden a conservar las plantas con los SI mas bajos y altos respectivamente, sin embargo las plantas de la parcela C, tienen a una tendencia hacia valores altos y la B hacia valores bajos de SI.

**Figura 5.4.16:** Distribución espacial por cuartiles del índice de forma (SI) de los objetos obtenidas de las imágenes, para las mediciones 1, 4, 4.



En las figuras 5.4.17 a y b se presentan los semi-variogramas empíricos (línea punteada oscura) para las mediciones 1 y 4; en los cuales se aprecia la existencia de una estructura espacial en los datos de índice de forma, de los objetos o plantas.

Una de las funciones de correlación ( $\rho(h)$ ) que mejor se ajusta al semi-variograma empírico es la esférica

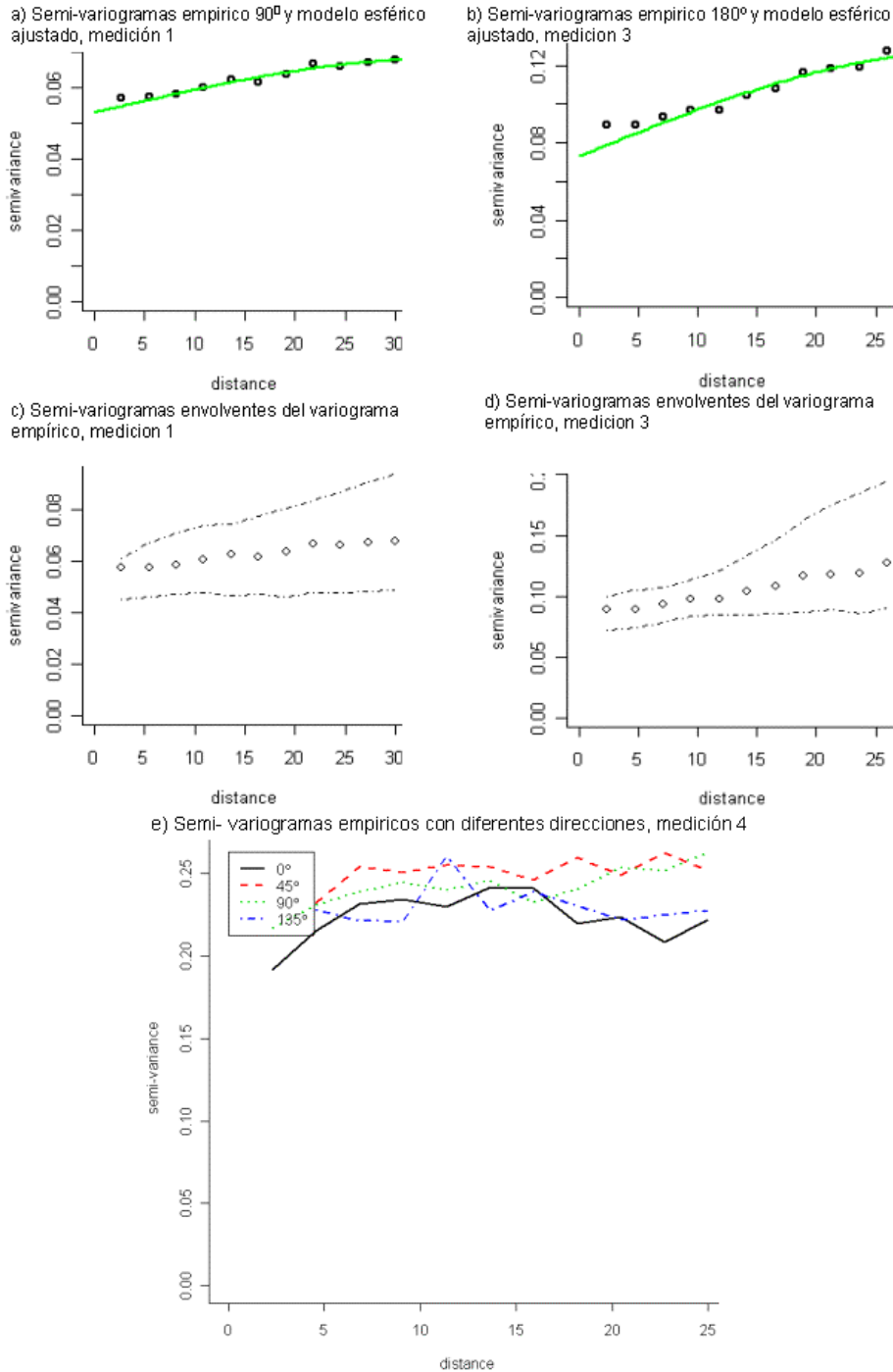
$$(62) \quad \rho(h) = \begin{cases} 1 - 1.5\frac{h}{\phi} + 0.5\left(\frac{h}{\phi}\right)^3, & \text{si } h < \phi \\ 0, & \text{de otra manera} \end{cases}$$

donde:  $h$ , es la distancia en metros entre dos puntos,  $\phi$  denota el parámetro básico de la función de correlación y llama el parámetro de rango.

En las figuras 5.4.17 a y b, aparecen los modelos de semi-variogramas esféricos ajustados (línea continua verde) y en las figuras 5.4.17 c y d los semi-variogramas envolventes producto de las simulaciones teniendo en cuenta los parámetros estimados del modelo de semi-variograma ajustado.

En la figura 5.4.17 e, se muestra para la medición 4, los semi-variogramas empíricos para cuatro direcciones y en ninguna de ellas se evidencia una estructura espacial, indicando la pérdida de esta.

**Figura 5.4.17:** Variogramas empíricos, modelos esférico ajustado y envolventes simulados para el índice de forma (IS).

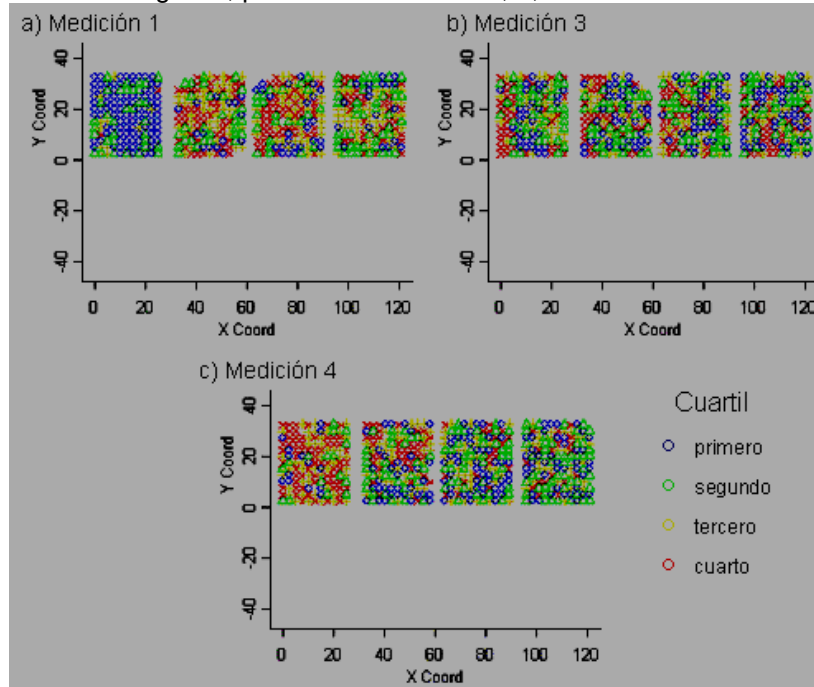


➤ **Densidad los objetos**

La distribución espacial por cuartiles de la densidad de los objetos se muestra en las figuras 5.418 a, b y c. En esta se puede apreciar que para la primera medición en las parcelas centrales B y C predominan los objetos o plantas con los valores más altos de densidad, en la A los objetos o plantas

con los valores mas bajos y en la parcela D los objetos o plantas con los valores intermedios. En la medición 4 se presenta una distribución mas uniforme de objetos o plantas tanto con valores bajos, intermedios y altos a lo largo de todo el lote. En la medición 4 sin embargo, predominan en la parcela A las plantas con los valores mas altos de densidad, al igual que el sector superior de la parcela B y una distribución mas o menos uniforme de objetos con valores intermedios en el sector inferior de la parcela B, toda la C y D.

**Figura 5.4.18:** Distribución espacial por cuartiles de la densidad de los objetos obtenidas de las imágenes, para las mediciones 1, 4, 4.

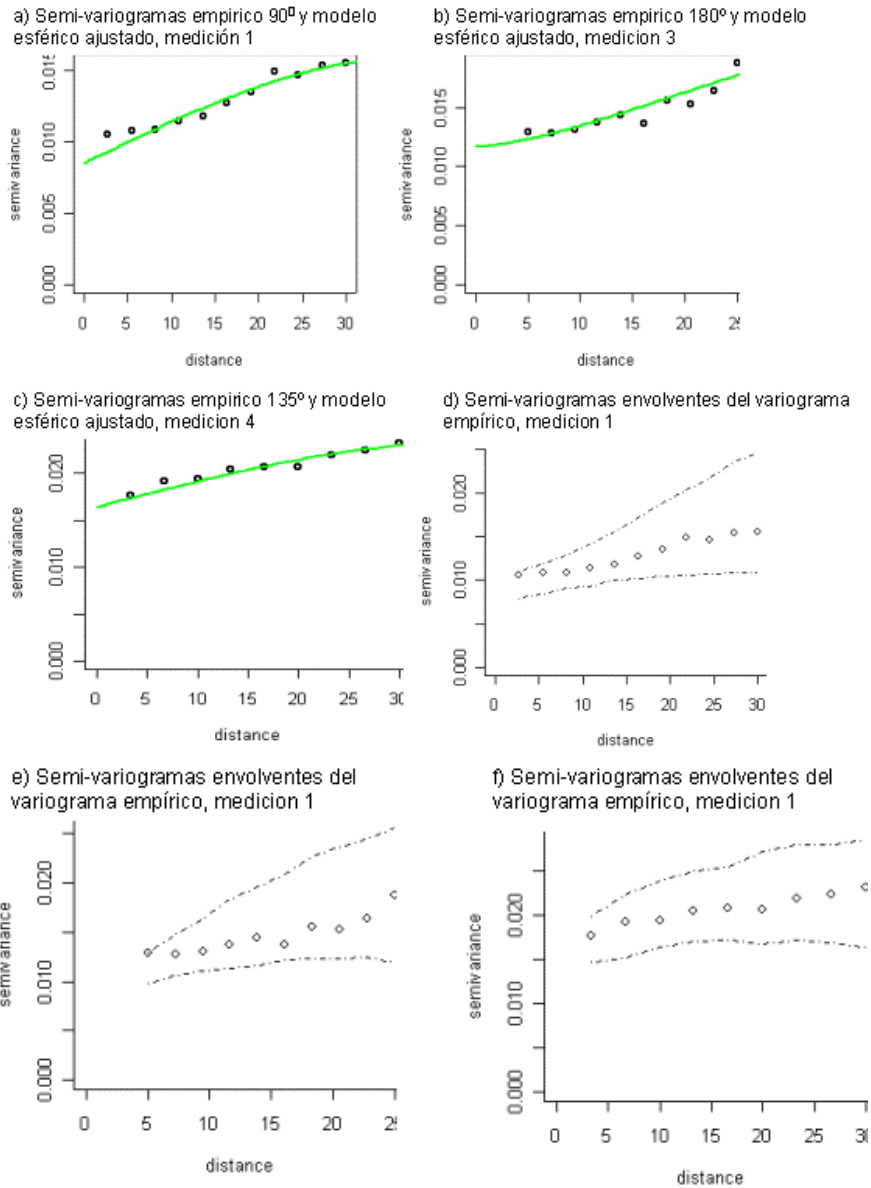


En las figuras 5.4.19 a, b y c se muestran en líneas punteadas los semi-variogramas para la densidad de los objetos. En estos se aprecia la existencia de estructura espacial en todas las mediciones, sin embargo en la medición 1 solo hay influencia de la distancia mientras en al medición dos y tres además de la distancia debe considerarse al dirección.

Los modelos ajustados se ven en las figuras 5.4.20 a, b y c representados por las líneas continuas verdes, el modelo que mejor ajuste presento fue el esférico en todos los casos.

Los variogramas envolventes obtenidos por simulación teniendo en cuenta los parámetros de los modelos ajustados se muestran en las figuras 5.4.20 d, e y f.

**Figura 5.4.19:** Semi-variogramas empíricos, modelos esférico ajustado y envolventes simulados para el densidad de los objetos (Den).



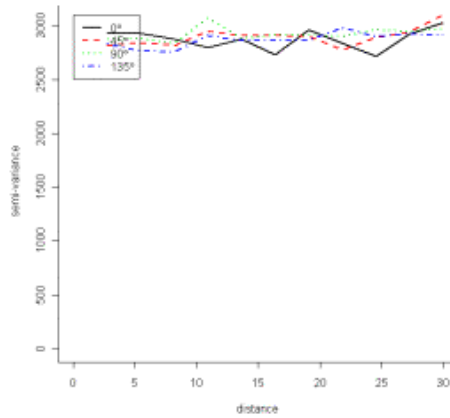
➤ **Dirección principal los objetos**

La dirección principal de los objetos es una característica que tiene un comportamiento aleatorio, esto es se encuentra una distribución de objetos con valores bajos, intermedios y altos mas o menos uniforme en todas las parcelas. Las figuras 5.4.20 a, b y c muestran los semi-variogramas empíricos, en los cuales se puede apreciar que no existe una estructura espacial para esta en ninguna de las mediciones.

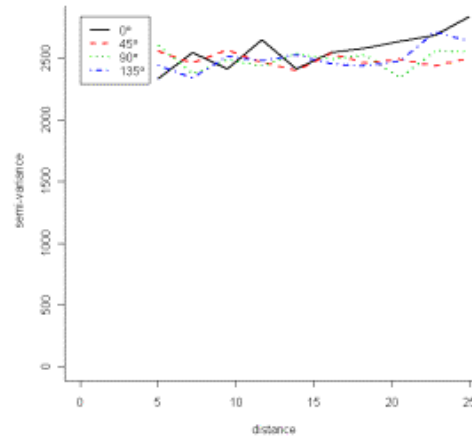


**Figura 5.4.20:** Semi-variogramas empíricos para la dirección principal de los objetos (Mdir) calculados en cuatro direcciones.

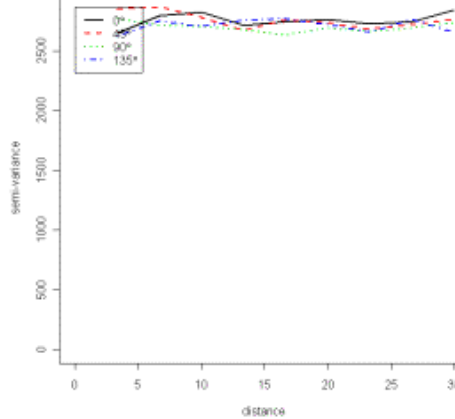
a) Semi-variogramas empírico medición 1



b) Semi-variogramas empírico medición 3



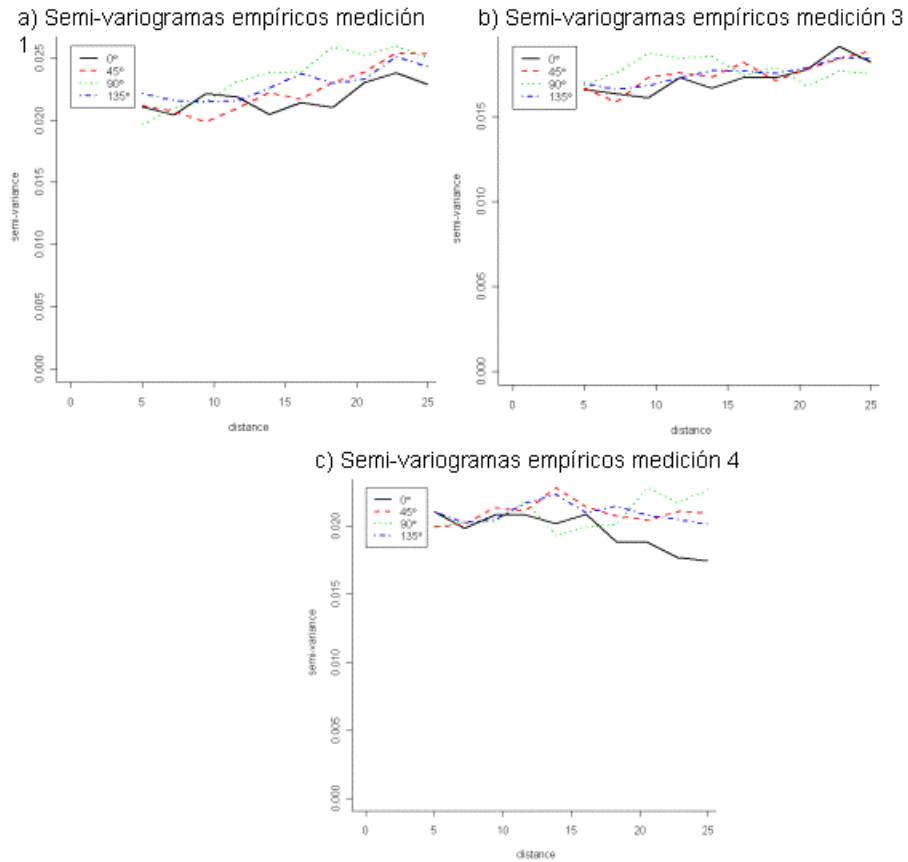
c) Semi-variogramas empírico medición 4



### ➤ Asimetría los objetos

La asimetría de los objetos es otra de las variables que se comporta aleatoriamente. En la figura 5.4.21 se muestran los semi-variogramas calculados para diferentes direcciones, no evidenciándose patrón de covariación con la distancia ni con la dirección, en ninguna de las mediciones efectuadas. Esto sugiere que la asimetría o ajuste elíptico presentado por los objetos se comporta aleatoriamente dentro del campo experimental.

**Figura 5.4.21:** semi-variogramas empíricos para la Asimetría de los objetos (Asy), calculados en cuatro direcciones.



## 5.5 Validación de la metodología

### 5.5.1 Relación entre la micro-topografía, la textura, longitud de los flujos de agua y las características de los objetos o plantas obtenidas a través de las imágenes

La altura o ubicación relativa de las plantas en el lote experimental fue la única característica microtopográfica que presentó una relación lineal significativa con el área de los objetos o plantas realizada en la tercera medición. Se verificó si esta relación se mantenía con el área foliar real de las plantas y efectivamente se conservó, siendo incluso ligeramente mayor, ver tabla 5.5.1.

Características, como distancia de los flujos de agua y la textura parecen no relacionarse, al menos lineal con esta variable

**Tabla 5.5.1:** correlaciones entre las alturas relativas de las plantas, el área de los objetos o plantas obtenidos a través de las imágenes y el área foliar real de las plantas en las tres mediciones efectuadas

correlación	altura		
	M1	M3	M4
área objetos imágenes	0.38	0.57	-0.38
área foliara plantas	0.40	0.61	0.45

La posición relativa sobre el terreno de cada planta respecto a un punto arbitrario cualquiera explica el 31 % del área de los objetos o plantas obtenidos a través de las imágenes adquiridas en la medición 3 y no a si en las demás, ver tabla 5.5.2.

**Tabla 5.5.2:** contraste de hipótesis para los parámetros de la regresión lineal entre las alturas relativas y la raíz cuadrada del área de los objetos

area objetos (Y <sub>pi</sub> )				
Coefficientes	Estimate	Error Std	Valort	Pr(> t )
Intercepto	-0.27	0.24	-1.13	0.262
altura relativa	0.01	0.00	5.42	1.06e-06 ***
Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1				
Residual standard error: 0.2279 on 62 degrees of freedom				
Multiple R-Squared: 0.3211, Adjusted R-squared: 0.3101				
F-statistic: 29.32 on 1 and 62 DF, p-value: 1.056e-06				

### 5.5.2 Comparación entre los métodos de evaluación tradicional y de imágenes

En el numeral 5.4, se determinó que 5 características de los objetos o plantas obtenidos de las imágenes, retenían la mayor variabilidad, sin temor de pérdida o ganancia de información por la exclusión o inclusión de ellas. Estas características son: área, índice de forma, densidad, dirección principal y asimetría de los objetos o plantas. En este mismo numeral se vio que varias de estas características morfológicas, tienen potencial para ser usadas en la evaluación del crecimiento de las plantas de banano puesto que muestran una tendencia de cambio entre las mediciones realizadas.

Se probará aquí empleando estas cinco variables por análisis de regresión lineal múltiple, en primer lugar la significancia de las correlaciones con las variables tradicionales y en segundo lugar el modelo que mejor se ajuste para explicar cada una de las variables tradicionales.

En la tabla 5.5.3 se muestra la matriz de correlaciones entre las características de los objetos o plantas obtenidos de las imágenes y las variables tomadas de manera tradicional. En esta se categorizan por color las variables de ambos métodos así como los valores de correlación de la siguiente manera: con el color **verde** aquellas variables cuya correlación con

al menos una variable del método opuesto es mayor a 0.75, o aquellas correlaciones mayores al valor anteriormente indicado; con el color **azul** aquellas variables que se correlacionan con al menos una variable del método opuesto en el rango entre 0.55 y 0.75 , o para los valores de correlación ubicados en este rango; con el **amarillo** aquellas variables que se correlaciona con al menos otra variable del método opuesto en el rango entre 0.35 y 0.55 o aquellos valores de correlación ubicados en este rango; y con el **rojo** aquellas variables cuya correlación con todas las demás variables del método contrario es menor a 3.5, o aquellos valores de correlación también menores a este.

Según la tabla 5.5.3, se puede decir entonces que las variables tradicionales hojas por planta (hp), largo (Lhp), ancho (Ahp) de las hojas y alto de la planta, presentan una alta relación (> 0.75) con las variables área (Ypi), largo (L), ancho (W), longitud del borde (BL), perímetro (Per), desviación estándar de la longitud de los bordes (SdLedg), promedio de la longitud de los bordes (AveLedg) y longitud del borde mas largo (LenLEdg) de los objetos o plantas. En el caso del diámetro del pseudotallo a 20 cm del suelo (DST20) la mayor correlación alcanzada fue de 0.6 con Ypi, L, Sdledg y Aveledg, ver tabla 5.5.3.

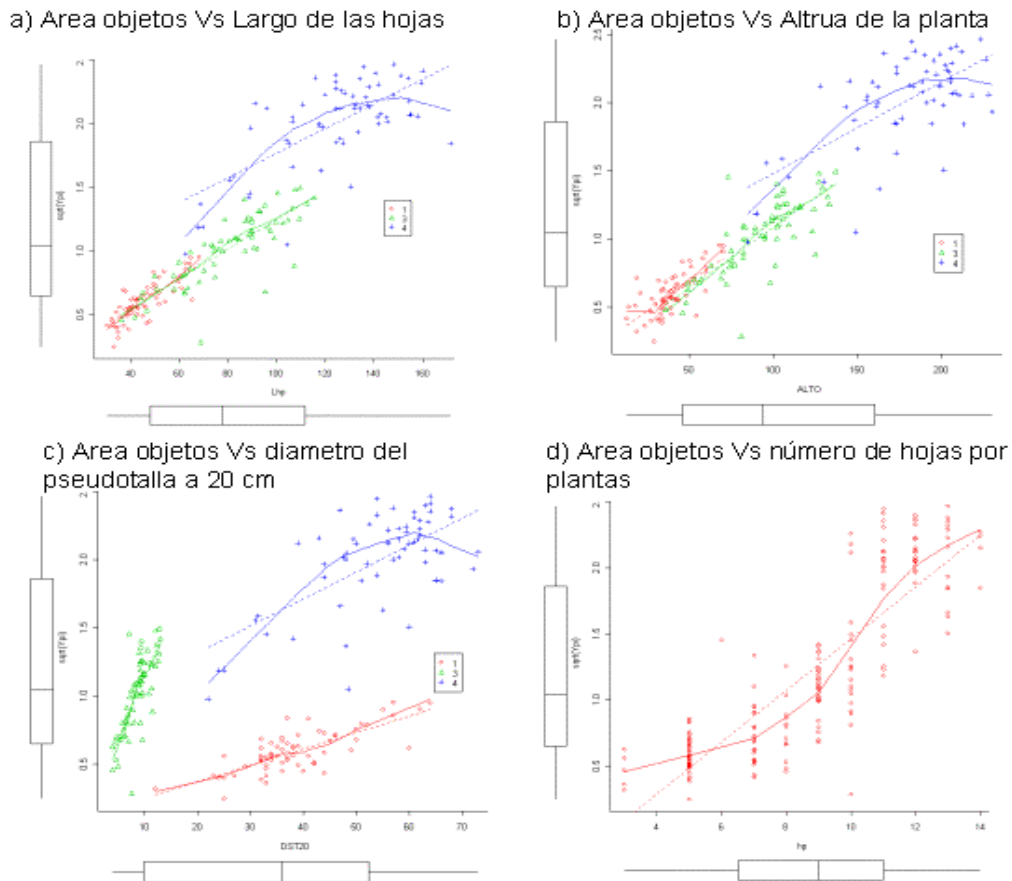
**Tabla 5.5.3:** Matriz de correlaciones entre variables obtenidas a través de imágenes aéreas y variables obtenidas por métodos tradicionales para evaluar crecimiento y desarrollo de las plantas de banano.

Tradicional Imágenes	hp	Lhp	Ahp	DST20	Alto
Ypi	0.8	0.9	0.9	0.6	0.9
L	0.8	0.9	0.9	0.6	0.9
W	0.8	0.9	0.9	0.5	0.9
BL	0.8	0.9	0.9	0.5	0.9
L/A	-0.1	-0.2	-0.2	0.0	-0.2
SI	0.6	0.6	0.6	0.2	0.6
Den	0.3	0.4	0.4	0.2	0.3
Mdir	-0.1	-0.1	-0.1	0.0	-0.1
Asy	-0.1	-0.2	-0.2	0.0	-0.1
Per	0.8	0.9	0.9	0.5	0.9
Comp	-0.5	-0.6	-0.6	-0.2	-0.6
NoEd	0.6	0.7	0.7	0.1	0.7
SDLedg	0.7	0.8	0.8	0.6	0.8
AveLedg	0.8	0.8	0.8	0.6	0.9
LenLEdg	0.8	0.8	0.8	0.5	0.8

Rangos de correlación    ■  $\geq 7.5$ ;   ■ 5.5 – 7.4;   ■ 3.5 – 5.4;   ■  $< 3.5$

Donde: **SI**: índice de forma, **Den**: densidad, **Mdir**: dirección principal, **Asy**: asimetría y **A**: área m<sup>2</sup>, **hp**: hojas por planta, **Lhp**: largo de las hojas, **Ahp**: ancho de las hojas, **DST20**: diámetro del pseudotallo a 20 cm del suelo, **Alto**: altura de la planta en cm

**Figura 5.5.1:** Relación gráfica entre el área de los objetos y cada una de las características de crecimiento tradicional, y condicionada a la medición



Las variables relación largo ancho (L/A), dirección principal (Mdir) y Asimetría (Asy) de los objetos o plantas, presentan una baja correlación (menor a 3.5), con todas las variables de evaluación tradicional del crecimiento, ver tabla 5.5.3.

En la figura 5.5.1, se muestra gráficamente la relación presentada entre la característica área de los objetos con cada una de las variables usadas tradicionalmente para estimar el crecimiento de las plantas. En esta se ve la fuerte relación del área de los objetos con el largo de las hojas, altura de las plantas y número de hojas en cada medición, ver figura 5.5.1 a, b y d. Sin embargo el área de los objetos o plantas parece relacionarse con el diámetro a 20 cm de estas dentro de cada medición, pero sin una tendencia entre mediciones, ver figura 5.5.1 c.

Los modelos de regresión lineal o multilineal según el caso y que se presentan a continuación para la estimación de cada una de las variables tradicionales se realizaron con el 90 % de los datos, el restante 10% se usó para evaluar las predicciones realizadas con estos.

➤ **Número de hojas por planta (hp)**

El modelo encontrado para estimar el número de hojas por planta depende del área de los objetos o plantas obtenidas de las imágenes. Este es altamente significativo y explica esta variable tradicional en un 74%, ver tabla 5.5.4.

En el modelo propuesto, es significativo tanto el intercepto como el coeficiente del área, ver tabla 5.5.4:

$$(63) \quad hp = 4.1 + 3.76 Y_{pi}^{1/2}$$

donde **hp**: hojas por planta, **Y<sub>pi</sub>**: área de los objetos o plantas obtenidos de las imágenes

**Tabla 5.5.4:** contraste de hipótesis para el intercepto y coeficientes de la regresión obtenida a partir de área foliar de los objetos para estimar el número de hojas por planta.

Coefficientes	Estimate	Error Std	Valor t	Pr (>  t )
Intercepto	4.093	0.2315	17.68	<2e-16 ***
sqrt(Y <sub>pi</sub> )	3.7598	0.1684	22.33	<2e-16 ***

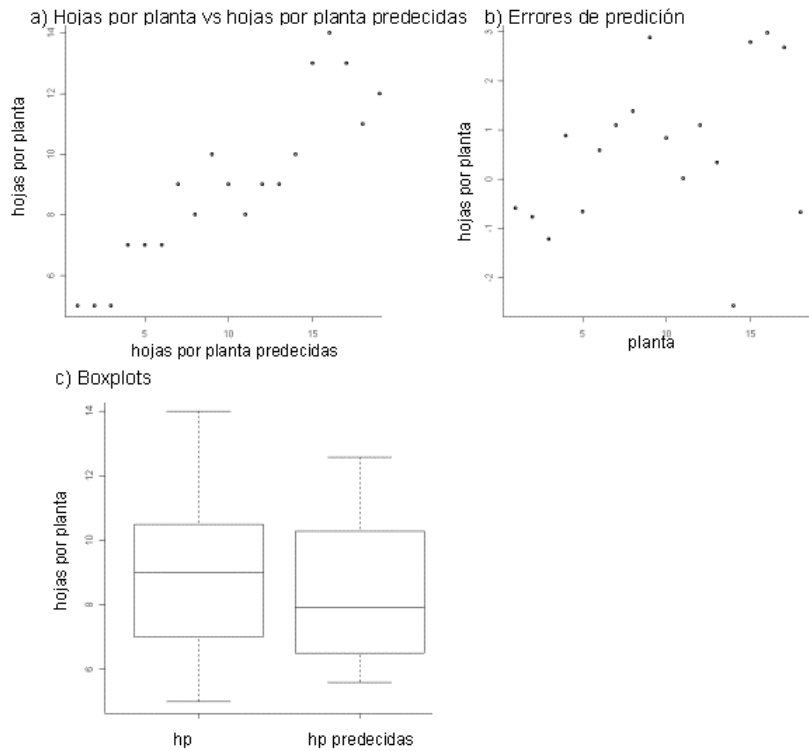
Signif. codes: 0 '\*\*\*' 0.001 '\*\*' 0.01 '\*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Residual standard error: 1.461 on 190 degrees of freedom  
 Multiple R-Squared: 0.7446, Adjusted R-squared: 0.7431  
 F-statistic: 498.5 on 1 and 171 DF, p-value: < 2.2e-16

donde: **sqrt(Y<sub>pi</sub>)**: raíz cuadrada del área en m<sup>2</sup> de los objetos o plantas

En la figura 5.5.2 a, b y c: se resumen los resultados del diagnóstico del número de hojas por planta realizado a 19 plantas en total y seleccionadas al azar de las tres mediciones. Se observa que se presenta un mayor ajuste cuando las plantas tienen un menor número de hojas (primera medición), el cual disminuye cuando las plantas crecen esto es hacia la medición cuatro, ver figura 5.5.2 a y b. La variación de los residuales por la diferencia entre el número de hojas promedio real por planta y estimado osciló entre ± 3, ver figura 5.5.2b. El comportamiento de los datos del número de hojas estimado es más ajustado comparado con el medido directamente, ver figura 5.5.2.c.

**Figura 5.5.2:** Diagnósticos de la regresión, relación, residuales y boxplot entre el número de hojas promedio por planta real y el estimado.



➤ **Largo promedio de las hojas por planta (Lhp)**

En la estimación de la longitud (en cm) de las hojas además del área de los objetos o plantas, jugaron un papel importante, características de forma como la densidad y la asimetría de estos.

Fueron significativos tanto el intercepto como los coeficientes relacionados con cada característica, se resalta que los coeficientes de la densidad y la asimetría resultaron ser negativos. El modelo explica el 87 % del largo promedio de las hojas por planta, ver tabla 5.5.5.

El modelo propuesto es:

$$(64) \quad Lhp = 88 + 55.19Y_{pi}^{1/2} - 32.24 Den - 29.18 Asy$$

donde: **Lhp**: Largo promedio de hojas por planta, **Y<sub>pi</sub>**: área, **Den**: densidad y **Asy**: asimetría de los objetos o plantas

**Tabla 5.5.5:** contraste de hipótesis para el intercepto y coeficientes de la regresión obtenida a partir de la raíz cuadrada del área, la densidad y la asimetría de los objetos o plantas para estimar el largo de las hojas.

Coefficientes	Estimate	Error Std	Valor t	Pr (>  t )
Intercepto	88.01	23.86	3.69	0.000304 ***
sqrt(Ypi)	55.19	1.78	30.97	< 2e-16 ***
Den	-32.24	11.71	-2.75	0.006565 **
Asy	-29.18	10.00	-2.92	0.003985 **

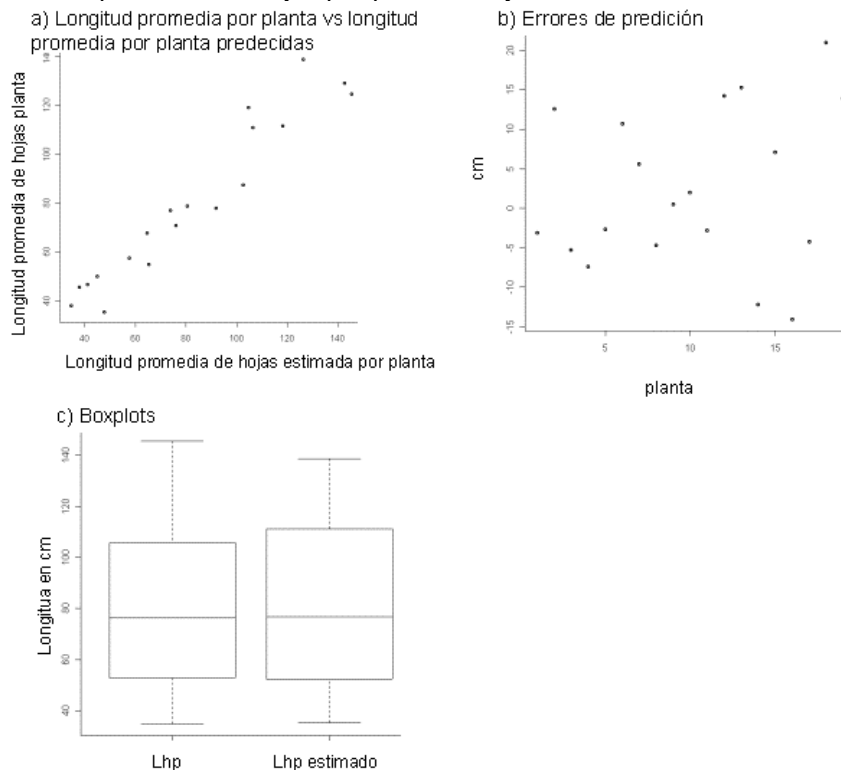
Signif. codes: 0 '\*\*\*' 0.001 '\*\*' 0.01 '\*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Residual standard error: 13.66 on 169 degrees of freedom  
 Multiple R-Squared: 0.8715, Adjusted R-squared: 0.8693  
 F-statistic: 382.2 on 3 and 169 DF, p-value: < 2.2e-16

donde: **sqrt(Ypi)**: raíz cuadrada del área en m<sup>2</sup>, **Den**: densidad, **Asy**: asimetría, de los objetos o plantas

Los resultados del diagnóstico del largo promedio de las hojas, en las 19 plantas seleccionadas al azar de todas las tres mediciones y usando el modelo propuesto se resume y compara con los resultados obtenidos realmente en las figuras 5.5.3 a, b, c.

**Figura 5.5.3:** Diagnósticos de la regresión, relación, residuales y boxplot entre el largo promedio de hojas por planta real y el estimado.



Al comparar las longitudes promedio por planta reales con las estimadas, de nuevo como con el número de hojas, se presenta un mejor ajuste en las fases iniciales de crecimiento de las plantas, ajuste que es menor cuando las plantas están próximas a la floración, lo cual corresponde con la medición 4.



En consecuencia los residuales de la diferencia entre las longitudes promedio de las hojas real y estimada son mayores hacia la fase 4, indicando una mayor variabilidad. En general estos oscilan en entre  $-15$  y  $+20$  cm, ver figura 5.5.3 b.

El largo y el ancho promedio de las hojas por planta tienen una estrecha relación, esto implica que se puede ser estimada una a través de la otra, siendo poca la información adicional ganada. Por estas razones no se consideró la obtención de un modelo para esta característica.

➤ **Diámetro del pseudotallo medido a 20 centímetros del suelo (DST20)**

En la tabla 5.5.4 se muestran los resultados del contraste de hipótesis de la regresión entre el DST20 y la raíz cuadrada del área, el índice de forma y la densidad de los objetos o plantas obtenidos de las imágenes. En esta se muestra que son significativos tanto el intercepto como los coeficientes de las dos características de forma. El modelo solo explica el 34 % del DST20, por lo que no se usó aquí para estimar el DST20 de las 19 plantas excluidas en la obtención del modelo y empleadas para la validación de estos.

**Tabla 5.5.6:** contraste de hipótesis para el intercepto y coeficientes de la regresión obtenida a partir de la raíz cuadrada del área, el índice de forma y la densidad de los objetos o plantas para estimar el diámetro del pseudotallo de la planta a 20 cm de altura.

Coefficientes	Estimate	Error Std	Valor t	Pr(> t )
Intercepto	110.20	34.56	3.19	0.00170 **
$\sqrt{Y_{pi}}$	26.87	3.28	8.18	6.35e-14 ***
SI	-14.22	4.25	-3.35	0.00100 **
Den	-36.84	15.34	-2.40	0.01743 *

Signif. codes: 0 '\*\*\*' 0.001 '\*\*' 0.01 '\*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Residual standard error: 16.88 on 169 degrees of freedom  
 Multiple R-Squared: 0.3607, Adjusted R-squared: 0.3494  
 F-statistic: 31.79 on 3 and 169 DF, p-value: 2.402e-16

donde:  $\sqrt{Y_{pi}}$ : raíz cuadrada del área en  $m^2$ , **SI**: índice de forma y **Den**: densidad, de los objetos o plantas

➤ **Altura de la planta (Alto)**

En la tabla 5.5.7, se muestra el resultado de los contrastes de hipótesis tanto para el intercepto como para el coeficiente del área los objetos o plantas usada para estimar la altura de la planta.

El intercepto tiene una significancia débil, sin embargo fue considerado en el modelo, mientras que el coeficiente del área de los objetos es fuertemente significativo, ver tabla 5.5.7. Se anota que el modelo explica el 90 % de la altura de la planta

El modelo propuesto es:

$$(65) \quad \text{Alto} = -6.98 + 91 \text{ Ypi}^{1/2}$$

Donde:  $\text{Ypi}$  es el área de los objetos obtenidos a través de las imágenes

**Tabla 5.5.7:** contraste de hipótesis para el intercepto y el coeficiente, de la regresión obtenida a partir de la raíz cuadrada del área, de los objetos o plantas para estimar el diámetro la altura en metros de la planta.

Coefficientes	Estimate	Error Std	Valor t	Pr(> t )
Intercepto	-6.98	3.29	-2.12	0.0356 *
sqrt(Ypi)	91.03	2.40	38.00	<2e-16 ***

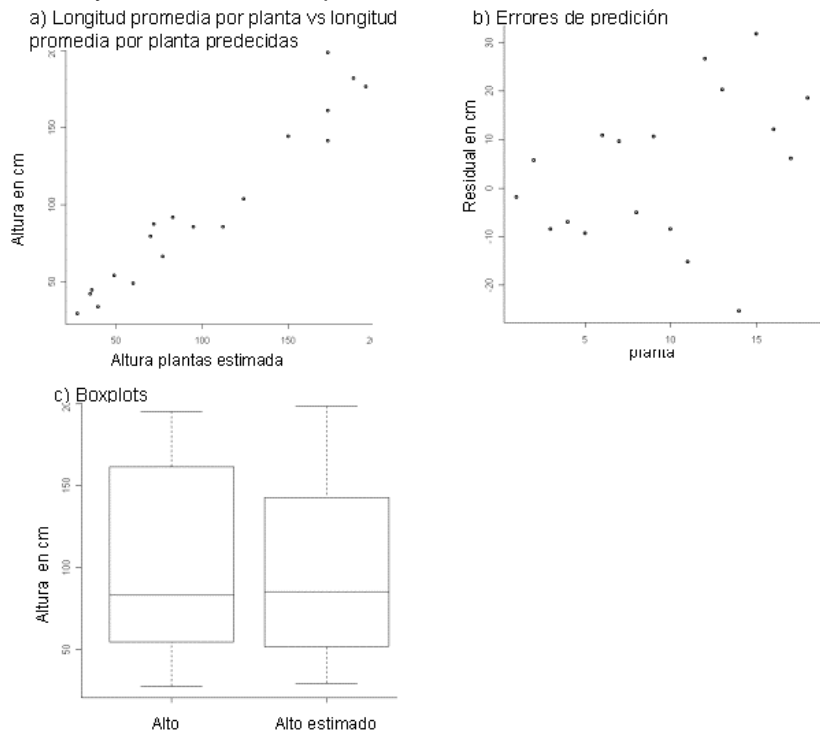
Signif. codes: 0 '\*\*\*' 0.001 '\*\*' 0.01 '\*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Residual standard error: 20.58 on 171 degrees of freedom  
 Multiple R-Squared: 0.8941, Adjusted R-squared: 0.8935  
 F-statistic: 1444 on 1 and 171 DF, p-value: < 2.2e-16

donde:  $\text{sqrt}(\text{Ypi})$ : raíz cuadrada del área en  $\text{m}^2$

En la figura 5.5.3 se presenta de manera gráfica los resultados del diagnóstico en la estimación con el modelo anterior de la altura de 19 plantas, seleccionadas aleatoriamente de las tres mediciones realizadas y no usadas estas en la obtención del modelo. Se aprecia que se presenta un buen ajuste entre los datos reales y estimados, ver figura 5.5.3 a y c y los residuales oscilan entre  $\pm 30$  cm, ver figura 5.5.3 b.

**Figura 5.5.3:** Diagnósticos de la regresión, relación, residuales y boxplot entre las alturas real y estimadas de las plantas.



### 5.5.3 Relación entre Área foliar de las plantas de banano y las características de forma de los objetos o plantas obtenidos de las imágenes

El área foliar es una característica importante, sin embargo es dispendioso de cuantificar en las especies de *Musa*. Por ejemplo en plantas adultas las hojas son difíciles de alcanzar y muchos clones tienen dimensiones de hasta 4 m de largo por 1 m de ancho, por lo que un planímetro estándar no es apropiado para medir el perímetro de la hoja y se requiere del muestreo destructivo (Kerala, 1984; Potdar y Pawar, 1991; Bolomme, y Tenkouano, 2003). En nuestro caso el muestreo destructivo, afectaría también la información obtenida a través de las imágenes por lo que no es recomendable su uso.

Se adoptó aquí la propuesta de Potdar y Pawar 1991, no destructiva de estimación del área foliar en banano. Esta se basa en la medición del largo y ancho de la lamina foliar y empleando el siguiente modelo se estimó el área foliar real de las plantas de banano, este es:

$$(66) \quad Y_{pt} = 0.0266 + 0.76(L_{hp} \times A_{hp})$$

donde  $Y_{pt}$ : area foliar,  $L_{hp}$ : largo y  $A_{hp}$ : ancho de la lámina foliar

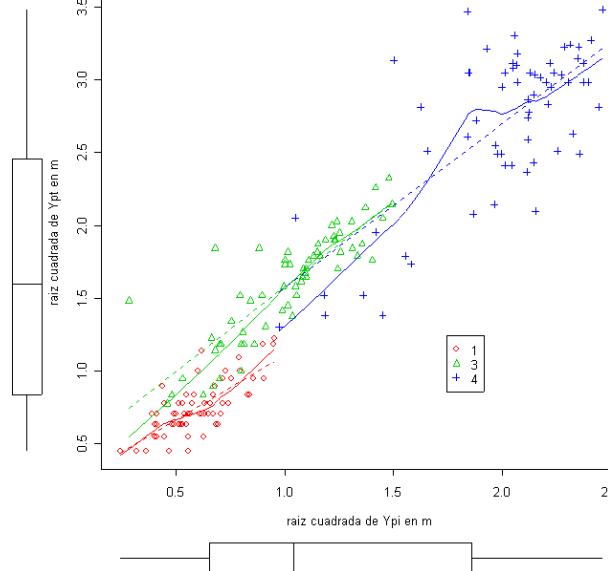
En la tabla 5.5.8, se muestran los estadísticos del área foliar en  $m^2$  así obtenida. Esta varió entre 0.2 y 1.5; 0.6 y 5.4; 1.7 y 12.1  $m^2$  para las mediciones 1, 3 y 4, con medias de 0.59, 2.64 y 7.5  $m^2$  en el mismo orden por planta. La desviación estándar aumentó con el tiempo así 0.3, 1.1 y 2.6, al igual que el rango, el cual fue de 1.3, 4.8 y 7.6 para las mediciones 1, 3 y 4, indicando un incremento de variabilidad con el crecimiento de las plantas. Se anota que los datos no presentan distribución normal, sin embargo la raíz cuadrada de estos si se comportan normal.

**Tabla 5.5.8:** Estadísticos descriptivos del área foliar real

Estadístico	Medición		
	M1	M3	M4
n	64	64	64
Media	0.597	2.694	7.547
RIC	1.300	4.800	7.650
mínimo	0.200	0.600	1.700
1er cuartil	0.400	1.775	6.125
Mediana	0.500	2.900	8.300
3er cuartil	0.700	3.425	9.350
máximo	1.500	5.400	12.1
Sd	0.302	1.139	2.646
Kurtosis	1.060	-0.667	-0.524
normtest.p	0.0000	0.2599	0.0021

Al igual que con las anteriores variables tradicionales, se relacionó el área foliar, aunque mas precisamente la raíz cuadrada del área foliar con las 5 características de forma de los objetos obtenidos de las imágenes y de nuevo la mejor relación presentada se dio con la raíz cuadrada del área de los objetos o plantas, presentando una correlación de 0.94, ver figura 5.5.4.

**Figura 5.5.4:** Relación entre el área foliar de las plantas de banano y el área de los objetos o plantas obtenidas de las imágenes, en tres mediciones.



**Ypt:** area foliar de las plantas, **Ypi:** área de los objetos o plantas obtenidas de las imágenes

En el análisis de regresión realizado entre el área foliar de las plantas y las cinco características de los objetos o plantas, se encontró que el área de los objetos o plantas es la mejor característica regresora del área foliar, explicando ella sola el 89 % de esta. En la tabla 5.5.9 se muestran los resultados del contraste de hipótesis para los parámetros del modelo de regresión, indicando que son significativos tanto el intercepto como el coeficiente del área de los objetos.

El modelo propuesto es:

$$(67) \quad Y_{pt} = 0.0121 + 1.6641 Y_{pi}$$

donde: **Ypt:** área foliar plantas; **Ypi:** área objetos o plantas imágenes

**Tabla 5.5.9:** contraste de hipótesis para el intercepto y el coeficiente de la regresión obtenida a partir de la raíz cuadrada del área, de los objetos o plantas para estimar el área foliar de las plantas de banano.

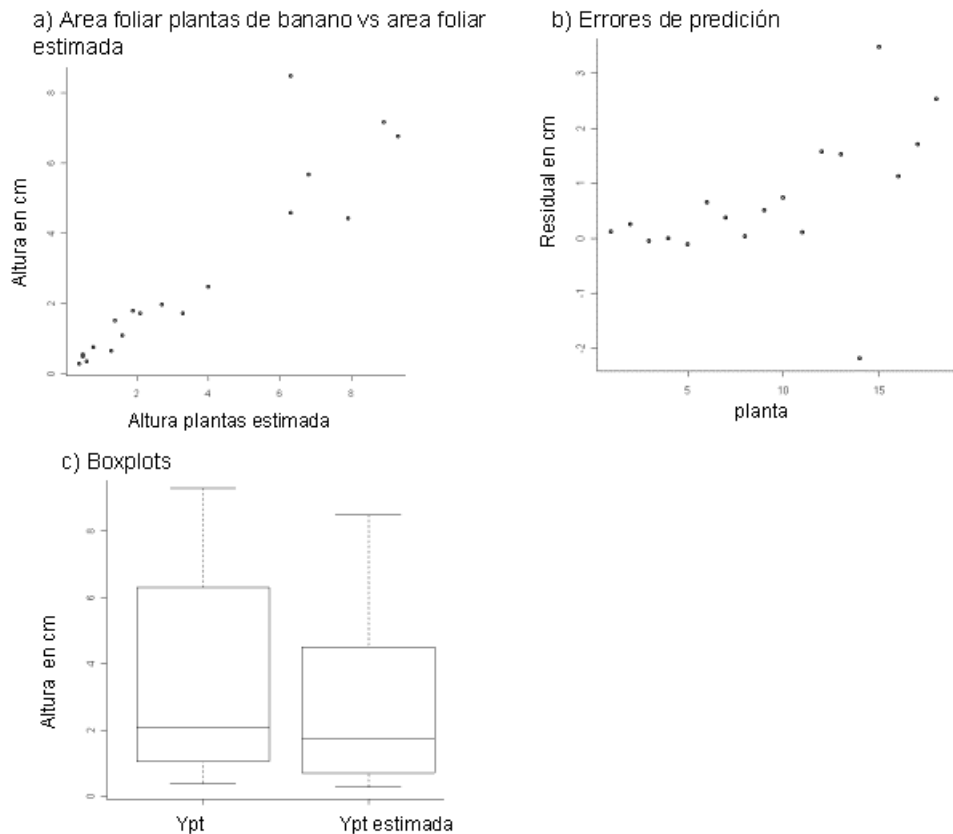
Coefficientes	Estimate	Error Std	Valor t	Pr (>  t )
Intercepto	0.11	0.05	2.41	0.0169 *
sqrt(Ypi)	1.30	0.03	38.09	<2e-16 ***

Signif. codes: 0 '\*\*\*' 0.001 '\*\*' 0.01 '\*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Residual standard error: 0.2923 on 171 degrees of freedom  
 Multiple R-Squared: 0.8946, Adjusted R-squared: 0.894  
 F-statistic: 1451 on 1 and 171 DF, p-value: < 2.2e-16

Como en los casos anteriores se probó el modelo, diagnosticando el área foliar de 19 plantas a través de este y comparando los resultados con los valores reales. En las figuras 5.5.5 a, b y c se presentan gráficamente los resultados de este diagnóstico. En estas, se observa un buen ajuste entre los valores reales y estimados de área foliar, figura 5.5.5 a. Los residuales de la diferencia entre estos dos valores oscilaron entre -2 y +3, figura 5.5.5b; la dispersión de los valores de áreas es menor, respecto a los valores reales, figura 5.5.5c.

**Figura 5.5.5:** Diagnósticos de la regresión, relación, residuales y boxplot entre las áreas foliares reales y estimadas de las plantas de banano



#### 5.5.4 Relación del peso de los racimos y las características de los objetos o plantas obtenidas a través de las imágenes

El peso promedio por racimo en cada una de las parcelas A, B, C y D, fue de 22.3, 21.8, 20.4 y 21.9 kg / racimo respectivamente. Los pesos variaron en cada una de las parcelas en el mismo orden indicado anteriormente entre 11 – 35, 10 – 31.2, 9 –30.9 y 10.3 – 30.8 kg / racimo, con desviaciones estándar de 5.2, 5 4.5 y 4.1, en cada una de las mediciones, ver tabla 5.5.10.

Aunque no son significativas las diferencias en las medias de los pesos de los racimos entre las parcelas, si existe una mayor variabilidad en la parcelas A y B, respecto a la D, ver tabla 5.5.10.

**Tabla 5.5.10:** Estadísticos descriptivos del peso (Kg) del racimo por planta

Estadístico	Medición			
	A	B	C	D
n	114	89	125	115
Media	22.3	21.8	20.4	21.9
RIC	24.3	21.2	21.9	20.5
mínimo	11.0	10.0	9.0	10.3
1er cuartil	19.0	18.0	17.6	19.0
Mediana	22.7	22.1	21.0	22.0
3er cuartil	25.4	25.9	23.0	24.7
máximo	35.3	31.2	30.9	30.8
Sd	5.2	5.0	4.5	4.1
Kurtosis	-0.3	-0.8	-0.2	-0.4

El peso del racimo presento una correlación significativa de 0.5 con el área de los objetos o plantas obtenidos de las imágenes adquiridas en la medición tres y fue menor a 0.35 en las mediciones 1 y 4.

El peso del racimo es explicado en un 24 % a través de las áreas de los objetos de la tercera medición, ver tabla 5.5.11; aunque es un porcentaje bajo, es de esperarse puesto que son numerosos los factores que influyen en los rendimientos de un cultivo en un momento dado.

**Tabla 5.5.11:** contraste de hipótesis para los parámetros de la regresión lineal entre área de los objetos y el peso de los racimos.

Coefficientes	Estimate	Error Std	Valor t	Pr(> t )
Intercepto	15.19	0.57	26.81	<2e-16 ***
Ypi	5.13	0.43	11.97	<2e-16 ***

Signif. codes: 0 '\*\*\*' 0.001 '\*\*' 0.01 '\*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Residual standard error: 4.117 on 441 degrees of freedom

Multiple R-Squared: 0.2453, Adjusted R-squared: 0.2436

F-statistic: 143.4 on 1 and 441 DF, p-value: < 2.2e-16

## **6 Discusión**

### **6.1 Micro-topografía**

La variabilidad del micro-relieve, es un reflejo de las irregularidades del terreno; generalmente inducidas por los agregados de este, así como por las operaciones de laboreo (Vidal, y Gonzalez, 2004d). En el caso de estudio, el último factor jugó el papel dominante, debido a la baja precisión del equipo usado en la nivelación del terreno; esto generó áreas con mayor cantidad de micro-depresiones, que favorecen la acumulación de agua después de cada evento de precipitación. La alta sensibilidad de la planta de banano a la deficiencia de oxígeno, obligó a la construcción de drenajes superficiales para la rápida evacuación del agua acumulada en las micro-depresiones después de cada evento, ver figuras 4.4b y 5.1.2 a y b. La distribución no uniforme del suelo extraído, en la construcción, que a su vez fue proporcional al número y longitud de los canales construidos, ayudó a incrementar la variabilidad de las ARs por la mayor acumulación de suelo en ciertas áreas respecto a otras dentro de cada parcela.

La rugosidad de la superficie del suelo afecta el reparto entre la infiltración y la escorrentía del agua lluvia, parámetros importantes para la modelación de pérdidas de suelo, lavado de nutrientes y pesticidas, procesos de transferencias entre el suelo y la atmósfera como intercambio de gases, evaporación y flujos de calor (Vidal y Vazquez, 2004 a, b, c, d. Impactos que tendrán que ser investigados, a la luz costo-beneficio tanto económica como ambiental; si se tiene en cuenta que en la región de estudio, la maquinaria empleada en la preparación del terreno, adecuación, mantenimiento o corrección de los sistemas de drenajes en un sistema de banano es de baja precisión y prima el sistema de canales superficiales para la eliminación de los excedentes de agua.

### **6.2 Textura**

El tamaño de las partículas influencia propiedades del suelo, como capacidad de retención de agua y nutrientes, capacidad de intercambio de cationes, estructura; entre muchas otras (Fernández-Illescas, 2001).

En todo el lote experimental la fracción fina se encuentra en la mas baja proporción, se espera entonces que la estructura también sea débil, con baja capacidad de retención de agua. Dado que la parcela A presenta los valores mas altos de la fracción gruesa es posible que estas características sean un poco mas acentuadas en esta parcela.

Si se tiene presente que los suelos franco arenosos y francos son suelos sueltos que tienden a desintegrarse mucho mas fácil cuando están húmedos, estado también mas frecuente, según las características climáticas de la

región de Urabá, en consecuencia son suelos susceptibles de ser removidos fácilmente. Teniendo en cuenta la micro-topografía la parcela A presenta el mayor IRA, es decir tiene la superficie del suelo mas rugosa, la cual con esta textura se ve aun mas favorecida para una mayor pérdida de suelo.

Deberán hacerse estudios para la evaluación del comportamiento en el tiempo del IRA, relacionándolo con pérdida de suelo, así como con algunas variables químicas de este y de producción, las cuales muy seguramente está impactando directamente.

### **6.3 Drenaje y flujos de Agua**

Después de cada evento de precipitación, el agua sigue diferentes patrones, dependiendo de la parcela. Gracias a la interconexión de pequeñas micro cuencas, formadas por las diferencias de alturas relativas existentes y a la remoción de suelo en la conexión de estas, los flujos superficiales de agua en la parcela A tienden a ser favorecidos, respecto a las demás. En esta los flujos son concentrados hacia el centro de la parcela, y luego en dirección sur-norte (eje x del sistema convencional) son evacuados hacia el canal terciario, ver figura 5.1.4a.

En la parcela D por el contrario, el bajo número de micro-cuencas formadas e interconectadas hacia los canales terciarios, hace que el agua permanezca mas tiempo en superficie, predominando la infiltración, sobre los flujos superficiales, ver figura 5.1.4d.

Las parcelas B y C presentan un número intermedio de micro-cuencas entre la A y D, por lo que el agua lluvia se reparte entre flujos superficiales hacia los canales terciarios e infiltración hacia el interior del suelo, ver figura 5.1.4B y C.

Desde el punto de vista erosivo, tendrá que evaluarse durante varios semestres, el comportamiento de la relación entre la erosión por remoción de suelo en superficie y la erosión química por los flujos internos de agua, a la luz del IRA y micro-cuencas existentes. Ambos tipos de erosión se ven favorecidos por este tipo de suelo, bajo las condiciones de Urabá de alta precipitación.

### **6.4 Micro-topografía, versus el área foliar de los objetos o plantas obtenidas de las imágenes**

El área foliar de las plantas de banano es afectada por numerosos factores que pueden ir desde abióticos como la nutrición, el clima, entre otros; hasta bióticos como plagas y enfermedades, de ahí el bajo porcentaje de esta que puede ser explicado a través de las alturas relativas.



Muy probablemente esta débil relación puede ser el reflejo de otra relación mas directa, establecida entre el agua del suelo y el área de las plantas. La micro-topografía afecta el reparto de agua sobre la superficie del suelo; zonas bajas favorecen la acumulación de agua, respecto a las zonas altas, las plantas ubicadas en sitios de acumulación de agua con mal drenaje ven afectado su crecimiento, frente a las que no lo están.

Si se acepta que la micro topografía se relaciona con la acumulación de agua en el suelo, entonces la mayor relación de las alturas relativas de las plantas con el área foliar de los objetos de la medición 3, está indicando que el efecto inducido por un exceso de agua (inundación) en plantas pequeñas se refleja entre tres a cuatro meses después, en el área foliar de las plantas y corresponde con una fase en la planta de alta producción de biomasa.

Las mediciones 3 y 4 no presentan una relación alta, posiblemente por una de las dos siguientes razones: 1- como es obvio el problema tiende a corregirse construyendo canales superficiales para la evacuación del agua excedente, por lo que las plantas aunque ya afectadas tienden a normalizar su crecimiento; ó 2- es posible también que la planta en estadios avanzados de desarrollo, hayan generado la mayoría de sus estructuras y este morfológicamente conformada, resultando un exceso de agua en un estrés mas de tipo fisiológico que morfológico o de cantidad de biomasa; no existiendo en ninguno de los dos anteriores casos, una relación entre posición de las plantas en el terreno y el área foliar de estas.

## **6.5 Evaluación del crecimiento por métodos tradicionales**

Características morfológicas de las plantas de banano como número de hojas por planta, altura de la planta, entre otras, largo y ancho de las hojas, están altamente relacionadas, esto es, durante el crecimiento de las plantas tienden a variar proporcionalmente, por lo que cualquiera de las características además de poder ser expresada en términos de las otras, es poca la información adicional que están aportando. El diámetro del pseudotallo sin embargo no presenta una buena relación con las demás características evaluadas, a pesar de que la literatura la reporta como una característica en estrecha relación con la altura de la planta (Soto, 2002). En términos prácticos de manejo agronómico, cualquiera de las características con excepción del diámetro del pseudotallo, puede ser usada para estimar el crecimiento de las plantas de banano.

La no diferencia entre las parcelas, en las variables evaluadas por métodos tradicionales es el reflejo de que estas no presentan características edafológicas, climáticas, ni fitosanitarias, entre otras contrastantes como para colocarlas en grupos de crecimiento diferentes.

A continuación se hace una descripción comparativa de las características evaluadas por métodos tradicionales con lo reportado por la literatura, para dar una idea del desarrollo logrado por las plantas.

Cuando las plantas llegan a la floración se recomienda que estas tengan un mínimo de 9 hojas por planta, para que dispongan del área foliar mínima capaz de producir un racimo que cumpla con las normas de calidad exigidas por el consumidor externo.

En nuestro caso la medición 4, que corresponde con plantas próximas a floración, estas tenían 12 hojas en promedio; Soto (2000), reporta para los diferentes clones del subgrupo cavendish, bajo condiciones fisiológicas normales un número de hojas en esta fase entre 12 y 15 hojas. Se considera entonces que en promedio las plantas contaban con suficiente área foliar para el llenado del racimo; se anota sin embargo según la tabla 5.2.1, que algunas plantas solo tenían 6 hojas, lo cual es un número deficiente para el llenado de frutos.

Otra información derivada del número de hojas y que dan información acerca del estado de las plantas es:

En promedio las plantas emitieron un total de 23 hojas con un mínimo de 18 y un máximo de 27 hojas por planta en todo el lote experimental, valor que esta un poco por debajo del rango reportado por Soto (2000), quien dice que una planta de banano emite entre 25 y 35 hojas. No obstante la tasa de emisión foliar si estuvo de acuerdo con la reportada por Simmonds, 1973 y Lassoudière, 1978c citados por Soto, 2000, en nuestro caso fue de 1.02 hojas promedio por semana por planta, valor que decrece cuando estas se acercan a la floración; los citados autores reportan una emisión de 1 hoja cada 7 a 10 días. En promedio a la floración se eliminaron 11.3 hojas por planta a razón de 0.73 hojas por semana, lo que significó únicamente un incremento neto de 0.44 hojas por semana por planta.

El ancho de las hojas en las plantas próximas a florecer, varió entre 28 y 75.3 cm con un promedio de 60 cm, sin embargo, Soto (2000), reporta una variación entre 70 y 100 cm. El largo en nuestro caso varió entre 62 y 171 cm con un promedio 123, y el mencionado autor reporta una variación para el largo entre 200 y 400 cm, este autor dice además que los clones enanos tienen una relación entre el largo y el ancho cercana a dos, en nuestro caso esta fue de 2.1.

Aunque el diámetro se recomienda determinarlo a 100 cm del suelo, en nuestro caso fue necesario realizarlo a 20 cm, para poderlo cuantificar en plantas pequeñas. Soto (2000), reporta para el clon gran enano una longitud de la circunferencia a 1 m de altura de 65 cm, en nuestro caso el diámetro promedio fue de 54.4 en la medición 4, esto es cuando las plantas estaban

próximas a floración. La altura promedio de las plantas fue 177 cm en promedio para la medición 4, valor menor a la reportada por Soto 2000.

No obstante se anota, que las características morfológicas de las plantas de banano está en relación directa primero con el tipo de clon y segundo con el vigor de la planta, resultado de su crecimiento y a si como de los aspectos nutricionales. Otros aspectos que pueden estar contribuyendo en las diferencias son las condiciones ecológicas de la zona.

Se anota también, la tendencia decreciente de producción que viene presentando la zona y en general las zonas productoras de Colombia, lo cual muy seguramente también esta en relación directa con la calidad y morfología de la planta en general.

## **6.6 Evaluación del crecimiento empleando las tablas munsell**

El color de las hojas de las plantas de banano determinado con las tablas munsell cambia aunque débilmente cuando estas crecen. Se anota que, este es un método que presenta algunos problemas para relacionarlo con el crecimiento en términos cuantitativos, esto es con área, altura, diámetro entre otras características usadas para describir el crecimiento de las plantas.

Entre los aspectos no deseados se tienen: 1- es un método altamente subjetivo, esto es la sección a evaluar básicamente depende del operario, es difícil su selección aleatoria; 2- La planta de banano es frecuentemente atacada por enfermedades foliares como por ejemplo la sigatoka negra, esta generalmente no afectan de manera uniforme el área foliar, lo que de nuevo dificulta seleccionar objetivamente las áreas a evaluar, 3- Es demasiado pequeña la sección de hoja evaluada ( $1 \text{ cm}^2$ ) respecto al área total de hoja ( $600 \text{ cm}^2$ ) en plantas adultas; 4- es un método engorroso y consume tiempo.

Por lo anterior no se recomienda, este método para evaluar el crecimiento de las plantas de banano en términos cuantitativos; con las observaciones anteriores podría considerarse mejor en la determinación de la calidad del área foliar durante el crecimiento, de la plantas, es decir relacionarse con aspectos fisiológicos de estas.

## **6.7 Análisis de imágenes**

El análisis de imágenes empleando la filosofía de orientación a objetos, resultó ser una técnica altamente eficiente para la extracción de una gran cantidad de información tanto espectral como de forma de los objetos de interés en la imagen, que en nuestro caso estaban relacionadas con las plantas de banano.

El análisis de objetos permitió la consideración de información relacional existente entre los objetos lo cual facilitó su separación en clases o grupos.

Se puede decir entonces que se cuenta con un proceso eficiente para la segmentación y clasificación de imágenes adquiridas de plantaciones bananeras con miras a extraer información de estos sistemas, para ser usadas en diferentes estudios.

## **6.8 Características de forma de los objetos o plantas obtenidos a través de las imágenes**

El **área** de los objetos o plantas, obtenidos de las imágenes, es la característica que mas fuertemente describe el cambio entre las mediciones; se recomienda entonces como una característica adecuada para seguir el crecimiento de las plantas usando imágenes aéreas.

El área de los objetos es también una característica que retiene buena variabilidad, esto unido a la facilidad que presentan tanto la adquisición de las imágenes como la extracción de esta información de los objetos presentes en la escena; lo que permite una mayor cobertura y frecuencia. Lo anterior mejorara el conocimiento tanto espacial como temporal, de los aspectos de las plantas relacionados con el área de los objetos, que por métodos tradicionales un estudio a este nivel de detalle resultaría costoso y dispendioso.

Es así como esta característica permitió detectar la existencia de estructura espacial en el área de los objetos o plantas y dada su alta relación con las características de crecimiento de las plantas como área foliar real, número de hojas promedio por planta y altura, puede extrapolarse, este mismo comportamiento a estas variables tradicionales.

Es necesario ahora explorar los factores que están induciendo tal variabilidad y hasta donde pueden ser manejados e incorporados como nuevas formas o ajustes a formas antiguas de manejo de los sistemas bananeros.

**Índice de forma**, es una característica que parece asociarse mas con la forma adoptada por el canopi de la planta. Esta característica cambia levemente y en forma directa con el crecimiento de las plantas y se debe básicamente a que el número de aristas formado por los polígonos y por ende el perímetro de los objetos o plantas es menor cuando estas están pequeñas respecto a cuando aumentan el numero de hojas como consecuencia de su crecimiento, haciendo entonces que la relación aumente con el crecimiento.

Esta característica, presenta estructura espacial en las mediciones 1 y 3 y no así en la 4, indicando que el arreglo que adopta el canopi de las plantas de banano es altamente sensible y dependiente de algún (os) factor (es) que afectan el sistema banano y que muy posiblemente este (os) factor (es) relacionado, es también, altamente variable en el tiempo dentro del sistema, pudiendo adoptar diferentes configuraciones dependiendo de las condiciones del momento.

La **densidad** de los objetos es una característica que retiene buena variabilidad, sin embargo parece ser limitado su uso para determinar el crecimiento de las plantas. Esta característica presenta estructura espacial en el lote experimental, la cual se mantiene a lo largo de las tres mediciones y muy probablemente este asociada también con la configuración del canopi de las plantas, puesto que esta relacionada con el largo y ancho promedio de las hojas planta de banano. A diferencia del índice de forma esta es una característica que parece ser menor sensible frente a los cambios presentados por los diferentes factores dentro del sistema.

La dirección **principal** es una característica que pierde importancia en términos de variabilidad a medida que crecen las plantas, además no presenta ninguna tendencia con el crecimiento de las plantas, ni patrón espacial; por lo que parece no presentar ningún valor en términos prácticos.

La **asimetría** de los objetos aunque retiene buena variabilidad, tendrá que evaluarse su valor puesto que mejora la relación con el largo y ancho promedio de las hojas, sin embargo a diferencia de la densidad esta característica no presenta estructura espacial dentro del lote experimental, en ninguna de las mediciones realizadas.

Respecto de las características de forma analizadas se resalta que el comportamiento de ninguna de estas cinco características seleccionadas, se puede predecir a través de las otras, es decir tienden tener un comportamiento independiente, al menos en términos lineales.

## **6.9 Características forma de los objetos y características tradicionales de las plantas**

Se reitera aquí, que se cuenta con cinco características obtenidas a través de las imágenes las cuales son independientes y retienen la mayor variabilidad de los fenómenos al menos morfológicos que ocurren en la planta de banano durante su crecimiento.

Las características de los objetos que mayor valor practico presentaron fueron en su orden el **área de los objetos**, a partir de la cual se puede estimar el número de hojas promedio por planta, y la altura de las plantas.

Explica el mayor porcentaje del largo y ancho promedio de las hojas por planta.

La densidad y asimetría de los objetos mejoran el porcentaje de explicación del largo y ancho promedio de las hojas de banano.

### ➤ **Área foliar**

Rhoden and Croy, 1998, citado por Potdar y Pawar 1991, enfatizan en la importancia de disponer de métodos rápidos, no destructivos y precisos de medición del área foliar para la modelación del crecimiento, transpiración y fotosíntesis de las plantas.

En Musaseas, los métodos no destructivos propuestos de estimación del área foliar de las plantas, se basan principalmente en regresiones matemáticas, las cuales usan parámetros de la lámina foliar como el largo y el ancho (Potdar, and Pawar, 1991; Blomme, G. y A. Tenkouano, 2003; Holder y Taylor, 1986), los cuales se usaron también aquí. Estos métodos sin embargo aun siguen siendo dispendiosos y consumidores de tiempo.

Por otra parte el tamaño de muestra que puede ser analizado es mucho menor si se comprara con el método propuesto a través de las imágenes, además de que es rápido, puesto que solo depende del análisis de las imágenes capturadas sobre la plantación y no requiere de ningún tipo de medición, se obtiene también información espacial valiosa, esto es, detectar los sitios con plantas de alta y baja área foliar. En términos prácticos esto es de gran valor si se tiene presente que la importancia del área foliar radica en que está estrechamente relacionada con la acumulación de materia seca y por lo tanto ha sido utilizado para evaluar la capacidad fotosintética y predecir el desempeño de un cultivo (Kerala, 1984, Turner, 1987 y Hedge, 1988).

Se dispone pues de un modelo que permite explicar el 89 % del área foliar de la plantas de banano, durante su crecimiento, empleando imágenes y procesando imágenes de baja altitud y alta resolución.

### ➤ **Peso del racimo**

La producción es uno de los indicadores biológicos que mejor resume todos los factores que interviene en un sistema productivo y sobre el cual se concentran todos los esfuerzos.

Según Soto (2000) las necesidades de nutrimentos como curvas de absorción en las primeras fases desarrollo de la planta de banano, son muy bajas, debido al bajo contenido de biomasa que se a desarrollado en estas.

En las fases posteriores el desarrollo de biomasa se incrementan según el mismo autor, hasta 8 veces a la floración y hasta 12 veces a la cosecha.

En la conversión de los nutrimentos en biomasa, juega un papel importante todo el sistema foliar de la planta de banano (Hedge, 1988). Según la relación presentada entre el peso del racimo y el área de los objetos o plantas, obtenidos estos a través de las imágenes de la medición tres; parece indicar que juega un papel muy importante la cantidad y calidad del área foliar disponible por la planta en estado de plantilla esto es entre los 3 y 4 meses de edad de la planta, en el peso del racimo. Si lo anterior es cierto, otro aspecto de gran importancia, son las ventanas entre: fase de plantilla - floración - cosecha, para la toma de decisiones que se estarían logrando con la información obtenida de las imágenes, sin embargo investigarse mas este aspecto.

## 7 Conclusiones y recomendaciones

- De las variables abióticas evaluadas las alturas relativas o posiciones relativas de las plantas dentro del lote experimental resulto ser el factor de mayor relación con las características de los objetos en las imágenes, la mejor relación se presento con el área de los objetos obtenidos cuando las plantas tenían tres meses de edad. Esto es de gran importancia por la ventana de acción que se tendría en la toma de decisiones.
- El laboreo del suelo y la baja precisión de la maquinaria usada en la zona, son los factores que más están influyendo en la configuración de la superficie del suelo.
- La textura del suelo, no se relaciono, al menos directa y linealmente con ninguna característica de las imágenes.
- Las características usadas tradicional para evaluar el crecimiento y desarrollo de las plantas de banano, no presentaron diferencias significativas entre las diferentes parcelas evaluadas.
- Se cuenta con un sistema de captura de imágenes alta resolución espacial.
- Se cuenta con un protocolo de segmentación y clasificación de imágenes rápido y confiable para la extracción de información de imágenes adquiridas de plantaciones bananeras.
- Se cuenta con cinco características de los objetos las cuales son independientes y con alto potencial para las evaluaciones de crecimiento y desarrollo de las plantas de banano, tanto espacial como temporal.
- El área de los objetos es la característica de los objetos que explica en un alto porcentaje la mayoría de las variables de evaluación tradicional.
- El área de los objetos y el peso de racimos presentó un correlación aunque baja, esta fue altamente significativa.
- Es necesario la obtención de un método que permita la normalización de las imágenes con miras a usar la información, espectral.
- No se recomienda el uso de tablas de color munsell como método para la evaluación de crecimiento por lo dispendioso y la baja pendiente presentada por las curvas de crecimiento.



## BIBLIOGRAFÍA

Anderson, T. W., (1984). An Introduction to Multivariate Statistical Analysis, John Wiley and Sons. New York.

AUGURA, (2001). Coyuntura bananera colombina, 48 p

Bowman, W. D. (1989). The relationship between leaf water status, gas exchange, and spectral reflectance in cotton leaves. *Remote Sensing of Environment* 40: 249-255.

Blomme, G. y A. Tenkouano, (2003). Efecto de la edad de la planta y su ploidia sobre el área foliar de los bananos. En *Infomusa* 7(2):6-7.

Cambardella, C.A., T.S.Colvin, D.L.Karlen, D.S. Lognston, E.C. Berry, J.K. Radke, T.C. Kaspar, T.B. Parkin, D.B. Jaynes. (1996). *Precision Agriculture*. pag.189- 195.

Carter, G. A. (1991). Primary and secondary effects of water content on the spectral reflectance of leaves. *American Journal of Botany* 78: 916-924.

Chuvieco E. (2000). *Fundamentos de teledetección espacial*. Ediciones Rialp, S.A. Madrid.

Chilés, J.E.; P. Delfiner, (1999). *Geostatistics, modeling spatial uncertainty*. John Willey & Sons, INC. New York. 695p.

Cibula, W. G., E. F. Zetka Y R. D.L. Rickman., (1992). Response of Thematic Mapper bands to plant water stress. *International Journal Remote Sensing* 14: 1869-80.

Clark, R.L. and R.L: Mc Guckin. (1996). Variable Rate Application Technology: An overview. Éds. Robert P.C.; R. H. Rust and W.E. Larson. *precision agriculture*. Proceeding of the third international conference. June 24-26. Mineapolis, Minesota.. 855-862.

Cohen, W. B., (1991). Temporal versus spatial variation in leaf reflectance under changing water stress conditions. *International Journal of Remote Sensing* 12: 1865-1876.

Collwell, R.M., (1956). Determining de prevalence of certain cereal crop diseases by means of aerial photography. *Hilgardia* 26:224-286.

Cook, S.E., Adams, M.L., Bramley, R.G.V., (2000). What is Obstructing the Wider Adaptation of Precision Agriculture. In: Robert, et al. (Eds.).

Cressie, N., (1994). *Statistics for Spatial Data*, rev. ed. Eiley, New York, 900 pp.

Díaz, M. L.G., (2002). *Estadística multivariada inferencia y métodos*. Panamericana Forma e impresos S.A. 529 pg.

Espinosa, J. (2000). Manejo de nutrientes en agricultura por sitio específico en cultivos tropicales. En *informaciones agronómicas*. Inpofos (49):9-14.

Everitt, J. H. y P. R. Nixon. (1986). Canopy Reflectance of two drought-stressed shrubs. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* 52: 1189-1192.

Fernandez-Illescas, C.P.; Porporato, A.; F. Laio, (2001). The ecohydrological role of soil texture in a water-limited ecosystem. In *Water resources research*, 47(12): 2864-2872.

- Field, C.B.; J.A. Gamon and J. Peñuelas, (1999). Remote sensing of terrestrial photosynthesis. In *Ecophysiology of photosynthesis*. Schulze, Ernst-Detlefn; M.M Caldwell. Ed springer. 511-527.
- Florax, R.; R. L. Voortman; J. Brouwer. (2002). Spatial dimensions of precision agriculture: a spatial econometric analysis of millet yield on Sahelian coversands. In, *Agricultural Economics* 27 (2002) 425–443.
- Fotheringham, A. S.; C. Brunsdon; M. Charlton, (2002). Geographically weighted regression, the analysis of spatially varying relationships. John Wiley & Sons, Ltd. New York. 269p.
- Gates, D. M. (1980). *Biophysical Ecology*. New York - Heidelberg -Berlin, Springer-Verlag.
- Hegde, D.E., (1988). Growth and yield analysis of Robusta banana in relation to soil water potential and nitrogen fertilization. In *Scientia Horticulture* 37: 145-155.
- Hunt, E. R., B. N. Rock Y P. S. Nobel, (1987). Measurement of leaf relative water content by infrared reflectance. *Remote Sensing of Environment* 22: 429-445.
- Hale, M. Y D. M. Orcutt., (1987). *The Physiology of Plants Under Stress*. New York, John Wiley & Sons.
- Holder, G.D. and G. Taylor, (1986). Leaf characteristics for the identification of the banana cvs Robusta and Guiant Cavendish. In *Trop. Agric. (Trinidad)* 63(2):117-120.
- Jackson, R. D. y C. E. Ezra., (1985). Spectral response of cotton To suddenly induced water stress. *International Journal Remote Sensing* 6: 177-185.
- Jackson, R. D., (1986). Remote sensing of biotic and abiotic plant stress. *Annual Review of Phytopathology* 24: 265-87.
- Jordan, C.F., (1969). Derivation of leaf area index from quality of light on the forest floor. *Ecology* 50:664-666.
- Kerala, J. (1984). Estimation of leaf area in banana var. Nendran (*Musa* AAB group) using lenar parameters. In *Argic. Res.* 22 (2):200-201.
- Knipling, E. B. (1970). Physical and Physiological basis for the reflectance of visible and near-infrared radiation from vegetation. *Remote Sensing of Environment* 1: 155-159.
- Mardia, K. V., J. T. Kent and J. M. Bibby, (1979). *Multivariate Analysis*, London: Academic Press.
- Montgomery, D.C. y G.C. Runger, (2002). *Probabilidad y estadística aplicadas a la ingeniería*. Segunda edición. Limusa Wiley. 817 p.
- Pajares, M.G.; DE LA CRUZ, G.J.M., (2002). *Visión por computador, imágenes digitales y aplicaciones*. Ed. Alfaomega. 764 pgs.
- Pierce F. J., and P. Nowak. (1999). Precision agriculture. *Advances in Agronomy*. Academic Press. 67: 1- 85.
- Plant, R.E. 2001, Site-specific management: the application of information technology to crop production. In, *Computers and Electronics in Agriculture* 30: 9–29.
- Potdar, M.V. and K.R. Pawar, (1991). Non-destructive leaf area estimation in banana. En *Scientia Hort.* 45:252-254.

R : Copyright (2004), The R Foundation for Statistical Computing, Version 1.9.1 (2004-06-21), ISBN 3-900051-00-3.

Rencher, A. C. (1995). *Methods of multivariate Analysis*, John Wiley and Sons New York.

Ripple, W. J., (1986). Spectral reflectance relationships to leaf water stress. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* **52**: 1669-1675.

Ribeiro Jr., P.J. & P.J. Diggle (2001). geoR: A package for geostatistical analysis. *R-NEWS*, Vol 1, No 2, 15-18.

Shanahan, J.F; J.S. Schepers; D.D. Francis; G.E. Varvel; W.W. Wilhelm; J.M.Tringe, M.R.Schlemmer, and D.J. Major, (2001). Use of remote – Sensing imagery to estimate corn grain yield.

Schneider, E, W.; R. Young (2001). *Spectroradiometry Methods. A guide to photometry and visible radiometry. Application note (A14)*. Optronics laboratories, inc.

Sover R.H., (1971). A proposed international scale for estimating intensity of banana leaf spot (*Mycosphaerella musicola* Leach). *Tropical Agriculture Trinidad* **48** (4): 185-196.

Soto, M., (2000). *El cultivo del banano. Copia en CD*

Sun, B.; S. Zhou; Q. Zhao, (1975). Evaluation of spatial and temporal changes of soil quality based on geostatistical analysis in the hill region of subtropical China. In: *Geoderma* (2004): 1-15.

Thomas, J. R., L. N. Namken, G. F. Oerther Y R. G. Brown. (1971). Estimating leaf water content by reflectance measurements. *Agronomy Journal* **64**: 845-847.

Tucker, C.J., (1979). Red and photographic infrared linear combinations for forming vegetation. *Remote Sens. Environ.* **8**:127-150.

Turner D.W., (1987). Nutrient supply and water use of bananas in a subtropical environment. In *Fruits*, **42** (2):89-93.

Vogelmann, T. C., Y L.O. Björn, (1984). Measurement of light gradients and spectral regime in plant tissue with a fiber optic probe. *Physiologia Plantarum* **60**: 461-468.

Venables, W. N. and B. D. Ripley (2002). *Modern Applied Statistics with S*, Springer-Verlag.

Vidal, Vázquez E.; P. González, A., (2004)a. Influencia del tipo de laboreo del suelo sobre el microrrelieve de un Ferrasol. En IX conferencia Española de biometría. :28-25.

\_\_\_\_\_ (2004)b. Evolución del microrrelieve de la superficie del suelo, medido a diferentes escalas. En: Álvarez-Benedetti y P. Marinero. *Estudios de la zona no saturada del suelo*. Vol. 6: 204-208.

\_\_\_\_\_ (2004)c. Ecuaciones de regresión, para la evolución del micro relieve en función de la precipitación acumulativa. En IX conferencia Española de biometría. :29-42.

\_\_\_\_\_ (2004)d. Consideraciones sobre la evaluación de la rugosidad y cálculo de la retención de agua en micro depresiones. En: Universidad Nacional del Nordeste, *Comunicaciones científicas y tecnológicas; resumen A-061. Área Edafología y química Agrícola*. Facultad de Ciencias, Universidad la Coruña.

Walter, J.D.; V.L. Hofman and L.F. Backer. (1996). Site-specific Sugarbeet yield monitoring. Robert P.C.; R. H. Rust and W.E. Larson. In precision agriculture. Proceeding of the third international conference. June 24-26. Mineapoles, Minesota.. 845-844.

Westman, W. E. Y C. V. Price, (1988). Spectral changes in conifers subjected to air pollution and water stress: experimental studies. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing **26**: 11-20.