DETERMINACIÓN DE ZONAS ÓPTIMAS PARA LA PRODUCCIÓN DEL ALGODÓN (*Gossypium hirsutum* L.) EN EL VALLE CÁLIDO DEL ALTO MAGDALENA POR AMBIENTE, RENDIMIENTO Y CALIDAD DE FIBRA CON ÉNFASIS EN POTASIO

EDUARDO BARRAGÁN QUIJANO

CODIGO: 07-797023

Trabajo de grado presentado para optar al titulo de Doctor en Ciencias Agropecuarias Área Agraria, énfasis Fisiología de Cultivos.

DIRIGIDO POR:

JAIRO FARID CLAVIJO PORRAS. Ph.D. y LUZ MARINA MELGAREJO. Dr. Sci

Co-director:

JORGE CADENA TORRES, Ph.D

Asesores estadísticos

BERNARDO CHÁVEZ. M. Sc. y ORLANDO MARTÍNEZ. Ph.D

UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA
FACULTAD DE AGRONOMÍA
ESCUELA DE POSGRADOS
PROGRAMA DE DOCTORADO
EN CIENCIAS AGROPECUARIAS – ÁREA AGRARIA
ÉNFASIS EN FISIOLOGÍA DE CULTIVOS
Bogotá, D. C. 2010

“El presidente de tesis y el consejo examinador, no serán responsables de las ideas emitidas por el autor”.

(Artículo 217 de los Estatutos de la Universidad Nacional de Colombia)

ESTE DOCUMENTO COMPRENDE CUATRO (4) CAPÍTULOS CUYO FORMATO INDIVIDUAL ES DE ARTÍCULO CIENTÍFICO: INTRODUCCIÓN, MÉTODOS, RESULTADOS Y DISCUSIÓN, CONCLUSIONES Y LITERATURA CITADA EN CADA UNO DE ELLOS. DEBIDO A ESTO ALGUNAS DEFINICIONES Y REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS PUEDEN ESTAR REPETIDAS. ESTE DOCUMENTO SE AJUSTA A LOS ARTÍCULOS 27 Y 30 DEL CAPÍTULO 5, **ACUERDO NÚMERO 020 DE 2001,** LOS CUALES REGLAMENTAN LOS TRABAJOS DE TESIS DE DOCTORADO DENTRO DE LOS ESTUDIOS DE POSGRADO DE LA UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA.

A Dagma Cecilia, Germán Alberto y Margarita María

Por su apoyo, estímulo y sacrificio

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo fue posible gracias a la colaboración de las siguientes personas y entidades:

Dr. Jairo Farid Clavijo Porras, por la dirección de tesis. Profesor pensionado, Facultad de Agronomía, Universidad Nacional de Colombia.

Dra. Luz Marina Melgarejo, por la dirección de tesis, su orientación y paciencia. Profesora Departamento de Biología, Facultad de Ciencias.

Dr. Jorge Cadena Torres, por la co-dirección de tesis. Investigador grupo de Algodón. Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria, CORPOICA.

Dr. Bernardo Chávez, por la asesoría estadística. Profesor, Facultad de Agronomía. Universidad Nacional de Colombia

Dr. Orlando Martínez W, por la asesoría estadística. Profesor pensionado, Facultad de Agronomía. Universidad Nacional de Colombia

Facultad de Agronomía y Departamento de Biología (Laboratorio de fisiología vegetal), en especial a Sara Colmenares. Universidad Nacional de Colombia.

Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria, CORPOICA, C.I. Nataima, y en especial a Tomas Norato, Antonio M. Caicedo y Omar Montenegro del grupo de algodón.

Ministerio de Agricultura, Conalgodón, Fondo de fomento algodonero y a la Universidad Nacional de Colombia, Sede Bogotá, Vicerrectoría de Investigación, División de investigación DIB, por la financiación.

Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho" Faculdade de Ciências Agronômicas, Campus de Botucatu. SP, Brasil.

Dr. Ciro Antonio Rosolem, por su orientación durante la pasantía Internacional en la Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho" Faculdade de Ciências Agronômicas, Campus de Botucatu. SP, Brasil.

A todas las demás personas que difícilmente puedo enumerar y agradecer pero que también contribuyeron a la terminación exitosa de este trabajo.

RESUMEN

En Colombia, la industria textil utiliza fibra media de las variedades de algodón sembradas, sin embargo, una de las principales problemáticas identificadas, en el Valle Cálido del Alto Magdalena es el poco conocimiento en su manejo integral, especialmente en el nutriente potasio, que en los últimos años por su déficit genera disminución en el rendimiento y calidad de fibra del algodón. Para evaluar el efecto del potasio sobre el crecimiento, la fotosíntesis, actividad enzimática y sobre el rendimiento y calidad de fibra, se instalaron dos experimentos uno bajo condiciones semi-controladas en la Universidad Estadual Paulista, Botucatu, SP, Brasil, con coordenadas geográficas: 22º51' S y 48º26'42" E y con altitud de 804 msnm, con la variedad Fiber-Max-988. El segundo, bajo condiciones de campo en el Espinal, Colombia ubicado a: 4° 12’ N y 74° 56´ O, altitud de 430 msnm, con las variedades CORPOICA-M-123 y DELTA-OPAL. Para la definición de zonas óptimas con énfasis en potasio, la aptitud de las tierras se clasificó en aptas, moderadamente aptas, marginalmente aptas y no aptas, se seleccionaron cuatro municipios representativos de las zonas productoras: Ambalema, Espinal, Natagaima (Tolima) y Villavieja (Huila). Con la información de rendimiento y calidad de fibra por finca-municipio se realizó su correspondencia con la aptitud de las tierras. Los resultados mostraron que la deficiencia de potasio afecta el crecimiento, desarrollo, distribución, fracción porcentual de biomasa y fotosíntesis. La fotosíntesis disminuyó por reducción del área foliar, conductancia estomática, contenido de clorofila, concentración interna de CO_2, actividad de las enzimas sacarosa sintetasa y sacarosa fosfato sintetasa, y mayor peso específico foliar. Para calidad de fibra la deficiencia de potasio afectó micronaire, longitud, uniformidad, elongación e índice de fibra corta y contenido de celulosa. La dosis de potasio presentó influencia en el IAF, TCC, TAN, TRC, rendimiento de algodón-semilla, fibra, porcentaje de fibra y en la eficiencia fotosintética del PSII (F_v/F_m). Las curvas de crecimiento para materia seca total en las variedades CORPOICA-M-123 y DELTA-OPAL se ajustaron a un modelo de crecimiento sigmoidal, y para masa seca foliar y área foliar a uno gaussiano. El modelo simple de distribución de biomasa presentó buen ajuste y puede ser utilizado para

condiciones similares de evaluación. Los análisis espaciales mostraron ser apropiados para la evaluación de la aptitud de tierras, aquellas relaciones espaciales que explicaron el 72,39% de la variabilidad total fueron textura, disponibilidad de potasio, altitud y micronaire. Espinal ofrece la mejor oferta ambiental con el 98,4% del área como moderadamente apta para el cultivo de algodón. La recomendación de potasio para el Valle Cálido del Alto Magdalena se debe realizar con base en la disponibilidad de K, dada por la relación (Ca + Mg)/ K.

Palabras clave: Potasio, aptitud de tierra, micronaire, clases de tierra, crecimiento.

ABSTRACT

In Colombia, the textile industry uses medium fiber from the cotton varieties cultivated in the upper Magdalena Valley, featured by its hot climate. However, one of the main problems that have been identified is the little knowledge available about its integrated management, especially regarding potassium, whose deficient management has determined poor quality fiber and low yields. In order to evaluate the effect of potassium on crop growth, photosynthesis, enzymatic activity, yield and quality fiber, two experiments were conducted. The first one was carried out on variety Fiber Max-988 under semi controlled conditions in Universidade Estadual Paulista (Botucatu, SP, Brazil), located at 22º51' S; 48º26' W; 804 m a.s.l. The second one was conducted under field conditions in the municipality of Espinal, Colombia (4° 12’ N; 74° 56´ W; 430 m.a.s.l) with varieties CORPOICA-M-123 and DELTA-OPAL. To define the optimal zones with regards to potassium, land aptitude was classified as suitable, moderately suitable, marginally suitable and non suitable. Four municipalities were selected as representative of the production zones: Ambalema, Espinal, Natagaima (Tolima) and Villavieja (Huila). With the yield and quality fiber information by farm and municipality we evaluated correlation to land aptitude. The results show that potassium deficiency affects growth, development, distribution, percentage fraction of biomass and photosynthesis. Photosynthesis decreased due to leaf area reduction, stomatal conductance, chlorophyll content, internal concentration of CO_2, activity of sucrose synthase and sucrose phosphate synthase and greater specific leaf weight. Regarding quality fiber, potassium deficiency affected micronaire, length, uniformity, elongation and short fiber index, as well as cellulose

content. The potassium dose affected LAI, CGR, NAR, RGR, cotton yield, fiber, fiber percentage and photosynthetic efficiency of PSII ((F_v/F_m). The growth curves for total dry matter of varieties CORPOICA-M-123 and DELTA-OPAL were adjusted to a sigmoid model, and for leaf dry mass and leaf area to a Gaussian model. The simple model of biomass distribution showed good adjustment and can be used for similar conditions of evaluation. The spatial analysis showed to be appropriated for evaluation of land aptitude, and the spatial relations that explain 72.39% of the total variability were: texture, potassium availability, altitude and micronaire. The region of Espinal offers the best environmental offer, with 98.4% of its area as moderately suitable for cotton production . The potassium recommendation for the Valle Cálido del Alto Magdalena should be developed based on the availability of K, given by (Ca + Mg) / K.

Key words: Potassium, land aptitude, micronaire, land classes, growth.

TABLA DE CONTENIDO

AGRADECIMIENTOS v

RESUMEN vi

LISTA DE FIGURAS xiii

LISTA DE TABLAS xvi

SÍMBOLOS Y ABREVIACIONES xviii

INTRODUCCIÓN GENERAL 19

Estado actual del problema 22

Literatura citada 24

1. CAPÍTULO 1. IMPORTANCIA DEL POTASIO EN LA NUTRICIÓN DE PLANTAS, ENFASIS EN ALGODON 26

1.1. Introducción 26

1.2. POTASIO EN EL SUELO: ADSORCIÓN, Absorción, transporte y redistribución 28

1.3. Funciones del potasio en la planta 31

1.4. La calidad de la fibra y del hilo de algodón 33

1.5. RequerimientoS y contenido óptimo de potasio en el algodón 36

1.6. Deficiencia de potasio en el algodón 40

1.7. Fertilización potásica del algodón 47

1.8. Literatura citada 51

2. CAPÍTULO 2. EFECTO DEL POTASIO EN EL CRECIMIENTO, DISTRIBUCIÓN DE BIOMASA, TASA DE FOTOSÍNTESIS Y CALIDAD DE FIBRA DE ALGODÓN (*Gossypium hirsutum* L.) 58

2.1. Resumen 58

2.2. Introducción 59

2.3. Materiales y métodos 62

2.4. Resultados y discusión 65

2.4.1. Concentración de K en hoja 65

2.4.2. Concentración de K foliar vs crecimiento del área foliar 67

2.4.3. Número de entrenudos y altura de planta 67

2.4.4. Área foliar, biomasa total y peso específico foliar (PEF) 69

2.4.5. Fotosíntesis respecto a clorofila 72

2.4.6. Fotosíntesis (A_{max}) respecto al contenido interno de CO_2 (C_i) 74

2.4.7. Fotosíntesis respecto a dosis de potasio y conductancia estomática 75

2.4.8. Calidad de la fibra 76

2.4.9. Sacarosa sintetasa en fibra de algodón 78

2.4.10. Sacarosa fosfato sintetasa en fibra de algodón 80

2.4.11. Sacarosa sintetasa en hojas 80

2.5. Conclusiones 82

2.6. Literatura citada 83

3. CAPÍTULO 3. LA NUTRICIÓN CON POTASIO EN EL CRECIMIENTO, RENDIMIENTO, CALIDAD DE FIBRA, EFICIENCIA FOTOSINTÉTICA Y ACTIVIDAD DE LA SACAROSA SINTETASA EN ALGODÓN (*Gossypium hirsutum* L.), BAJO CONDICIONES DE CAMPO 88

3.1. Resumen 88

3.2. Introducción 89

3.3. Materiales y métodos 102

3.4. Resultados y discusión 109

3.4.1. Modelo potencial de distribución de materia seca 110

3.4.2. Radiación fotosintéticamente activa y fracción de luz interceptada 110

3.4.3. Uso eficiente de la radiación (RUE) 115

3.4.4. Distribución de la masa seca 116

3.4.5. Análisis de crecimiento 119

3.4.6. Curvas de crecimiento 119

3.4.7. Índice de área foliar (IAF) 124

3.4.8. Tasa de asimilación neta (TAN) 125

3.4.9. Tasa de crecimiento del cultivo (TCC) 126

3.4.10. Tasa relativa de crecimiento (TRC) 128

3.4.11. Rendimiento de algodón-semilla y fibra 129

3.4.12. Calidad de la fibra de algodón 132

3.4.13. Fluorescencia de la clorofila (eficiencia fotosintética del PS II (F_v/F_m)) en algodón 134

3.4.14. Actividad de la sacarosa sintetasa en algodón 137

3.5. CONCLUSIONES 140

3.6. Literatura citada 141

4. CAPÍTULO 4. ZONAS ÓPTIMAS por aptitud de tierras PARA EL CULTIVO DE ALGODÓN, CON ÉNFASIS EN POTASIO. CONSIDERACIONES GENERALES 156

4.1. Resumen 156

4.2. Introducción 157

4.3. Materiales y métodos 162

4.3.1. Fase del diseño conceptual del modelo de evaluación georreferenciado 162

4.3.2. Fase de análisis de información disponible 163

4.3.3 Identificación de los principales requerimientos ecofisiológicos y de manejo para el cultivo de algodón 164

4.3.4 Identificación de los principales requerimientos ecofisiológicos y de manejo para el cultivo de algodón 165

4.3.5 Biofísicas 166

4.3.6 Rendimiento y calidad de la fibra 168

4.3.7 Datos georreferenciados 169

4.4 Resultados y discusión 170

4.5 Conclusiones 189

4.6 Literatura citada 191

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 Concentración de K en la 5ª hoja de algodón 66
Figura 2.2 Concentración de K foliar vs área foliar 67
Figura 2.3 Cambio en el número de entrenudos por efecto del potasio 68
Figura 2.4 Altura de la planta de algodón por efecto de Potasio. 69
Figura 2.5 Área foliar para algodón según dosis de potasio. 69
Figura 2.6 Biomasa seca total para algodón según dosis de potasio a 109 DDE 70
Figura 2.7 Relación entre la fotosintesis y el contenido de clorofila por efecto de dosis de potasio. Los datos de cada punto son el promedio de 4 repeticiones 73
Figura 2.8 Tasa de asimilación de CO_2 vs. Concentración intercelular (Ci) en algodón a los 59, 68, 76 y 97 DDE. 74
Figura 2.9 Efecto de las dosis de potasio sobre la fotosíntesis en algodón. Los datos de cada punto son el promedio de 4 repeticiones. 75
Figura 2.10 Fotosíntesis respecto a la conductancia estomática por dosis de potasio en algodón. 76
Figura 2.11 Actividad específicade la sacarosa sintetasa en fibra de algodón durante 4 horas del día. 79
Figura 2.12 Actividad específica de la sacarosa sintetasa en fibra de algodón por efecto de dosis de potasio. 79
Figura 2.13 Actividad específica de la sacarosa fosfato sintetasa por efecto de dosis de potasio en fibra de algodón. Cada punto representa la media en triplicada 80
Figura 2.14 Actividad de la sacarosa sintetasa por efecto de dosis de potasio en hojas de algodón. 81
Figura 3.1 Análisis foliar de potasio durante los muestreos 35 y 90 DDE 110
Figura 3.2 Comportamiento de la radiación fotosintéticamente activa (PAR) durante los meses de marzo – julio de 2006 111
Figura 3.3 Comportamiento del índice de área foliar (IAF) y la fracción de luz interceptada (F_{LINT}) en CORPOICA-M-123 y DELTA-OPAL 113
Figura 3.4 Observado (símbolos) y simulado (líneas) de la distribución de masa seca total en tallo, hoja, botón floral y cápsula en la variedad de algodón CORPOICA-M-123. 118

Figura 3.5 Observado (símbolos) y simulado (líneas) de la distribución de masa seca total en tallo, hoja, botón floral y cápsula en la variedad de algodón DELTA-OPAL..... 118
Figura 3.6 Comportamiento de la variable masa seca total y su respectiva tasa absoluta de crecimiento (TAC) para la variedad CORPOICA-M-123 bajo cinco dosis de potasio..... 121
Figura 3.7 Comportamiento de la variable masa seca total y su respectiva tasa absoluta de crecimiento (TAC) para la variedad DELTA-OPAL bajo cinco dosis de potasio 124
Figura 3.8 Comportamiento del Índice de área foliar (IAF) en las variedades CORPOICA-M-123 y DELTA-OPAL por efecto de cinco dosis de potasio 125
Figura 3.9 Comportamiento de la tasa de asimilación neta (TAN) para CORPOICA-M-123 y DELTA-OPAL por efecto de cinco de dosis de potasio 126
Figura 3.10 Comportamiento de la tasa de crecimiento del cultivo (TCC) para las variedades CORPOICA-M-123 y DELTA-OPAL por efecto de cinco dosis de potasio... 127
Figura 3.11 Comportamiento de la tasa relativa de crecimiento (TRC) para CORPOICA-M-123 y DELTA-OPAL por efecto de cinco de dosis de potasio 128
Figura 3.12 Rendimiento de algodón-semilla (A) y de algodón-fibra (B) para CORPOICA-M-123 y DELTA-OPAL 130
Figura 3.13 Porcentaje (%) de fibra para CORPOICA-M-123 y DELTA-OPAL según dosis de potasio..... 132
Figura 3.14 Actividad específica de la sacarosa sintetasa en hoja, pecíolo, brácteas y carpelos de algodón a los 88 DDE. Cada punto representa la media en triplicado. 138
Figura 3.15 Actividad específica de la sacarosa sintetasa en fibra de algodón. 139
Figura 4.1 Modelo Conceptual de la Metodología de Evaluación de Tierras. FAO 163
Figura 4.2 Área de influencia del estudio de aptitud de tierras para el algodón 170
Figura 4.3 Grado de limitación de las tierras de Ambalema por disponibilidad de potasio 171
Figura 4.4 Correspondencia entre el modelo de evaluación de aptitud de tierras y la ubicación de fincas productoras, en el municipio de Ambalema 172
Figura 4.5 Grado de limitación de las tierras de Espinal por disponibilidad de potasio 174
Figura 4.6 Correspondencia entre el modelo de evaluación de aptitud de tierras y la ubicación de fincas productoras, en el municipio de Espinal..... 175
Figura 4.7 Grado de limitación de las tierras de Natagaima por disponibilidad de potasio177

Figura 4.8 Correspondencia entre el modelo de evaluación de aptitud de tierras y la ubicación de fincas productoras, en el municipio de Natagaima 178
Figura 4.9 Grado de limitación de las tierras de Villavieja por disponibilidad de potasio 180
Figura 4.10 Correspondencia entre el modelo de evaluación de aptitud de tierras y la ubicación de fincas productoras, en el municipio de Villavieja 181
Figura 4.11Clasificación de fincas por aptitud de tierras mediante los dos principales componentes (A) y los tres componentes (B) en algodón 188
Figura 4.12 Clasificación de fincas por aptitud de tierras mediante el primero, segundo y cuarto componente principal en algodón..... 189

LISTA DE TABLAS

Tabla 2.1 Efecto del potasio sobre la distribución de biomasa en algodón, a los 109 DDE 71
Tabla 2.2 Peso foliar específico (mg cm^{-2}) para algodón según dosis de potasio 72
Tabla 2.3 Efecto de diferentes dosis de potasio sobre la calidad de la fibra en el algodón. UNESP, Botucatu, SP. Brasil. 77
Tabla 2.4 Contenido (%) de Fibra por detergente Acida y celulosa en algodón. 78
Tabla 3.1 Promedio diario para temperatura máxima, temperatura mínima, humedad relativa, brillo solar y radiación, y mensual para precipitación y evaporación durante el tiempo del experimento, año 2006 103
Tabla 3.2 Parámetros estimados del modelo en algodón para las variedades CORPOICA-M-123 y DELTA-OPAL 116
Tabla 3.3 Intervalos de confianza de los parámetros α, *κ*, γ en el ajuste para el modelo logístico aplicado en la masa seca total y Gaussiano en masa seca foliar y el área foliar, para la variedad CORPOICA-M-123 sometida a cinco dosis de potasio..... 120
Tabla 3.4 Intervalos de confianza de los parámetros α, κ, γ en el ajuste aplicado para el modelo logístico aplicado en la masa seca total y Gaussiano en la masa seca foliar y el área foliar para la variedad DELTA-OPAL sometida a cinco dosis de potasio..... 123
Tabla 3.5 Rendimiento de algodón semilla y fibra ($kg \cdot ha^{-1}$) según dosis de potasio* 129
Tabla 3.6 Porcentaje (%) de fibra para CORPOICA-M-123 y DELTA-OPAL*..... 131
Tabla 3.7 Efecto de las dosis de potasio sobre la longitud e índice de uniformidad de la fibra..... 133
Tabla 3.8 Comportamiento de la calidad de la fibra por la interacción variedad*dosis de potasio en algodón 134
Tabla 3.9 Fluorescencia inicial (F_0), fluorescencia máxima (F_m) y eficiencia fotosintética del PS-II (F_v/F_m) para CORPOICA-M-123 y DELTA-OPAL a los 88 y 95 DDE* 135
Tabla 3.10 Fluorescencia inicial (F_0), fluorescencia máxima (F_m) y eficiencia fotosintética del PS-II para las dosis de potasio por hectárea* 136
Tabla 4.1 Requerimientos ecofisiológicos para el cultivo de algodón 167

Tabla 4.2 Clasificación por clase para variedad, rendimiento y calidad de fibra. Ambalema, 2005-2006 173
Tabla 4.3 Clasificación por clase para variedad, rendimiento y calidad de fibra. Espinal, 2005-2006 176
Tabla 4.4 Clasificación por clase para variedad, rendimiento y calidad de fibra. Natagaima, 2005 178
Tabla 4.5 Clasificación por clase para variedad, rendimiento y calidad de fibra. Natagaima, 2006 179
Tabla 4.6 Clasificación por clase para variedad, rendimiento y calidad de fibra. Villavieja, 2005 182
Tabla 4.7 Clasificación por clase para variedad, rendimiento y calidad de fibra. Villavieja, 2006 182
Tabla 4.8 Vectores característicos asociados a la matriz de correlación de la aptitud de las tierras para algodón 185
Tabla 4.9 Raíces características mayores a 1 extraídas de la variabilidad total de la matriz de correlación, para la evaluación por aptitud de tierras en el Valle Cálido del Alto Magdalena 187

SÍMBOLOS Y ABREVIACIONES

IAF	Índice de área foliar ($m^2 \cdot m^{-2}$)
k	Coeficiente de extinción de la luz en el dosel de la planta
PAR	Radiación fotosintéticamente activa $MJ \cdot m^{-2} \cdot d^{-1}$
SE	Error estándar del promedio
RA	Radiación solar incidente sobre el cultivo ($MJ \cdot m^{-2}$)
RUE	Eficiencia en el uso de la radiación ($g \cdot MJ^{-1}$)
AFO	Área foliar (cm^2)
AFE	Área foliar específica
PFE	Peso foliar especifico ($g\ cm^{-2}$)
F_0	Fluorescencia basal
F_m	Fluorescencia máxima
F_v/F_m	Eficiencia fotosintética de PSII
$kg \cdot ha^{-1}$	Kilogramos por hectárea
TAN	Tasa de asimilación neta ($g\ cm^{-2}\ d^{-1}$)
TRC	Tasa relativa de crecimiento ($g\ g^{-1}\ d^{-1}$)
TCC	Tasa de crecimiento del cultivo ($g\ m^{-2}\ d^{-1}$)
SS	Sacarosa sintetasa
SFS	Sacarosa fosfato sintetasa
DDE	Días después de emergencia
DDA	Días después de antesis

INTRODUCCIÓN GENERAL

El algodón representa la principal fuente de consumo industrial de fibras textiles en Colombia y su productividad y calidad de fibra están influenciadas por factores nutricionales, genéticos, clima, suelo, prácticas culturales, plagas y enfermedades, entre otros. Chiavegato *et al*. (1999) indicaron que los factores ambientales son más importantes en la determinación de la producción y de la calidad de la fibra que la propia genética del algodonero. Así, la interferencia en el ambiente del cultivo con la aplicación de técnicas de fertilización, puede mejorar la producción y la calidad de la fibra del algodón.

La nutrición vegetal se considera como uno de los factores de manejo más importantes asociado a la productividad de las plantas. Una nutrición balanceada para óptima productividad en el cultivo de algodón requiere que no se presenten deficiencias minerales. Con la introducción de nuevos cultivares (con ciclos más cortos y mayor producción de frutos), acompañada de cambios en las prácticas culturales tales como incremento en el uso de nitrógeno y utilización de reguladores de crecimiento, se ha obtenido un aumento en la aparición de la deficiencia de potasio (Oosterhuis *et al*., 1990; Chang y Oosterhuis, 1995). Considerando que el algodonero, comparado con otras especies cultivables, presenta baja eficiencia en la toma de potasio del suelo y que su deficiencia por cultivar está creciendo, especialmente en suelos arenosos y con baja disponibilidad de potasio (Kerby y Adams, 1985), es de destacar que son estas las condiciones similares que presentan los suelos de las zonas algodoneras de los departamentos del Tolima y Huila; además, con estas condiciones y con los cultivares modernos que se siembran se ha faciliado la expresión de deficiencia de potasio y disminución en el rendimiento de algodón-semilla, fibra y calidad de la fibra.

El K es importante para el desarrollo y calidad de la fibra (Cassman *et al*., 1990), siendo considerado como el nutriente más abundante en su composición (Kafkafi, 1992). Su

deficiencia produce menor crecimiento de la fibra (Dhindsa *et al*., 1975) y menor deposición de celulosa en la pared secundaria de las fibras, logrando disminuir la resistencia, la madurez, el micronaire, la elongación, la longitud, el perímetro y la uniformidad (Bennett *et al.,* 1965), además se producen fibras muertas o inmaduras, que no colorean durante el proceso de tinción (Thompson, 1999).

En variedades de algodón altamente productivas, más del 75% de potasio es direccionado a las cápsulas. Cuando el potasio es limitante durante el período de fructificación del algodonero, aparecen los síntomas foliares de deficiencia y no son típicos, ocurriendo en hojas nuevas en lugar de las hojas viejas (Kafkafi, 1992). La calidad de la fibra en algodón es sensiblemente influenciada por las condiciones climáticas, siendo las épocas de siembra y el manejo del potasio, las que más interfieren en las características de las fibras y de los hilos. Bolonhezi *et al*. (1999) en Riberao Preto, SP, Brasil encontraron que siembras extemporáneas (Enero y Febrero) redujeron la calidad de la fibra, en los parámetros de longitud, resistencia y micronaire, permaneciendo la elongación sin ninguna alteración. Pettigrew y Meredith (1992) encontraron que plantas deficientes en potasio, disminuyeron 18% el índice de área foliar, aumentaron 16% el peso específico foliar y redujeron en 7% el índice micronaire de la fibra (sin alteración del perímetro). Además, la deficiencia de potasio genera una menor deposición de celulosa en la pared secundaria de la fibra, disminuyendo el micronaire y la madurez.

La Agricultura es una actividad espacial aunque, tradicionalmente, el énfasis se ha puesto en la variabilidad temporal (Hartkamp *et al*., 1999). Cassel *et al*. (2000) afirman que en los últimos años ha surgido un gran interés por considerar la variabilidad espacial como parte de la investigación.

El suelo, por ejemplo, presenta variabilidad espacial para la producción agrícola, dado que sus propiedades físicas, químicas, biológicas y morfológicas no son uniformes. Dicha variabilidad es uno de los conceptos esenciales dentro de la pedología y es básica para entender los factores causales de la distribución espacial de los suelos (Wilding y Drees, 1985, citado por Martínez, 2003). La variabilidad espacial de tipo de suelo, disponibilidad de nutrientes, el drenaje y pendiente influye en la variabilidad espacial de la calidad y/o cantidad de la producción en un determinado sitio (Stafford y Miller, 1996).

Según Martínez (2003), el clima y sus factores que lo caracterizan, como la precipitación, temperatura, altitud y luminosidad también varían espacialmente. El clima es uno de los factores más utilizado en la zonificación de áreas para cultivo, principalmente por la temperatura que determina las condiciones de cada cultivo y por la precipitación que, junto con el suelo, inciden notablemente en la disponibilidad de agua.

El rendimiento y la calidad de los cultivos varían espacialmente. Existen zonas agroecológicas donde un cultivo determinado produce más que en otras, al igual que dentro de un mismo lote. Lo anterior ocurre, según Cassel *et al*. (2000) porque los factores que influyen en el desarrollo de los cultivos y en la producción, también varían espacialmente.

En este contexto, el trabajo que se presenta a continuación es un esfuerzo por avanzar en el conocimiento de la participación que tiene el potasio en los procesos fisiológicos, bioquímicos y agronómicos en el algodonero y su efecto sobre los componentes de producción de algodón-semilla y fibra para la zona productora del Valle Cálido del alto Magdalena. También, teniendo en cuenta que la disponibilidad de potasio en el suelo es un factor que varía espacialmente, y que tiene efecto directo en el rendimiento y calidad de la fibra, la disponibilidad de este nutriente en el suelo puede ser una buena herramienta para recomendar tierras con aptitud para su siembra y de esta manera poder llegar a utilizar esta información en la planeación y proyección del cultivo de algodón.

El cultivo de algodón presenta ventajas importantes para trabajar en este sentido. Su ciclo de vida es corto (cerca de cuatro meses), es una fuente importante para la economía de los departamentos del Tolima y Huila, se tiene poca información ajustada y validada para estas condiciones y por último la siembra se ha realizado por tradición y vocación del productor, y no por análisis técnico de eficiencia en el manejo del cultivo con herramientas como el conocimiento básico y aplicado del cultivo.

Las perspectivas de avance en este tema son grandes. Sin embargo, tiene dos campos de aplicación importantes como es la generación de conocimiento en la participación del potasio en la calidad de la fibra y segundo como herramienta para mejorar la planificación en el uso de tierras para cultivos semestrales, para un mejor aprovechamiento y conservación de los recursos naturales.

ESTADO ACTUAL DEL PROBLEMA

De acuerdo con CONALGODON (2005), de las 73.306 hectáreas sembradas a nivel nacional durante el año 2005, la región del Tolima-Huila representó el 19,8% y durante este año la distribución de las variedades sembradas correspondió 75% a Nu-Opal (tecnología Bt), 18% para Delta Opal, 6% Delta Pine 90 y el restante 1% se distribuyó en otras variedades convencionales producidas en el país. Pero, es a partir de este año, donde es aprobada la introducción de materiales transgénicos caracterizados por controlar insectos plagas o ser selectivos a herbicidas; además, se identifican por ser precoces y de crecimiento determinado, factores que influyen para que la demanda por potasio sea antes de floración y que los requerimientos del mismo sean mayores para poder expresar su potencial productivo, sin disminuir su producción y demeritar la calidad de la fibra.

Según CONALGODON (2006), el algodón se produce en dos grandes regiones de Colombia, Costa e Interior, destacándose en esta última el Valle Cálido del Alto Magdalena con los departamentos del Tolima y Huila cuyo rendimiento de fibra durante los años 2004-2006 fue de 960 $kg \cdot ha^{-1}$ comparado con 710 $kg \cdot ha^{-1}$ de la costa. Este cultivo genera 13300 empleos directos a la economía campesina, y sustenta unas 26000 familias. Para el año 2006, de 56.646 hectáreas sembradas en el país, el Tolima y Huila representaron el 31,3%, siendo sembradas con materiales transgénicos introducidos, que por su precocidad, expresaron sintomatología de deficiencia por potasio; sin embargo, el manejo del nutriente se hace por recomendación tradicional, sin tener en cuenta el análisis de suelos y foliar, y siendo la dosis normalizada entre 30 y 60 kg de KCl, indistinto de su bajo o alto contenido o disponibilidad en el suelo. Las zonas algodoneras en el Valle Cálido del alto Magdalena, se caracterizan por presentar una gran diversidad de ambientes, que conllevan a que una misma variedad cuando se le siembre presente comportamientos diferentes. Dicha variación es ocasionada por la interacción del genotipo con el ambiente. Para el caso de algodón, son frecuentes las quejas de la industria textil respecto a la calidad de fibra de determinadas zonas y variedades que no satisfacen sus requerimientos industriales. De igual forma, son frecuentes los fracasos económicos de productores que se involucran en la producción de algodón en zonas que no son aptas para el cultivo.

El objetivo general de ésta investigación fue contribuir al desarrollo tecnológico del cultivo del algodón en el Valle Cálido del alto Magdalena, determinando el efecto del potasio sobre el crecimiento, la fotosíntesis, actividad enzimática y sobre el rendimiento y calidad de fibra; y además, determinar con énfasis en potasio las zonas óptimas por aptitud de las tierras para el cultivo del algodón en cuatro municipios del Valle Cálido del Alto Magdalena. Se espera, con esta información, sentar las bases para la siembra y producción de fibra de algodón con calidad.

Para el logro del objetivo general se plantearon los siguientes objetivos específicos:

Determinar el efecto del potasio en el crecimiento, distribución de materia seca, rendimiento, fotosíntesis y en enzimas relacionadas con la calidad de la fibra.

Determinar zonas óptimas por aptitud de la tierra para el cultivo del algodón, con énfasis en potasio en cuatro municipios del Valle cálido del Alto Magdalena, con base en la oferta abiótica comparada con los requerimientos ecofisiológicos del cultivo.

En este trabajo se presentan cuatro capítulos que se interrelacionan estrechamente. En el primer capítulo se explica la importancia del potasio en la planta, rendimiento y calidad de fibra de algodón. En el segundo capítulo se describe el efecto de la nutrición con potasio en el crecimiento, distribución de biomasa, tasa de fotosíntesis y calidad de la fibra bajo condiciones semi-controladas. En el tercer capítulo se presenta el efecto del potasio, bajo condiciones de campo, en el crecimiento, rendimiento, calidad de fibra, eficiencia fotosintética y actividad de la sacarosa sintetasa, además de la definición de un modelo simple de distribución de fitomasa. En el cuarto capítulo se aborda el tema de definición de zonas óptimas por aptitud de la tierra por ambiente y requerimientos ecofisiológicos para la producción de algodón en el valle cálido del alto Magdalena con énfasis en potasio; además. la definición por aptitud de la tierra, se realizó con base en la interpretación de los resultados obtenidos bajo condiciones semi-controladas de invernadero y de los alcanzados bajo las condiciones de campo en el Centro de Investigación Nataima de El Espinal.

Agradecimientos: Ministerio de agricultura, CORPOICA, Conalgodón, Fondo de fomento Algodonero y Universidad Nacional de Colombia.

LITERATURA CITADA

BENNETT, O. L., ROUSE, R., ASHLEY, D. A., DOSS, B. D. (1965). Yield, fiber quality and potassium content of irrigated cotton plants as affected by rates of potassium. **Agr Journal.** 57: 296-299.

BOLONHEZI, D., ATHAYDE, M. L. F., SABINO, N. P.; KONDO, J. I. FUZATTO, M. G., BOLONHEZI, A. C., BORTOLETTO, N., CASTRO, J. L. (1999). Efeito da época de semeadura sobre as características tecnológicas das fibras de três variedades de algodoeiro. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ALGODÃO, 2, 1999, Ribeirão Preto. **Anais**. Campina Grande: Embrapa-CNPA, p. 709-712.

CASSEL, D. K., WENDROTH , O. AND NIELSEN R. D. (2000). Assessing spatial variability in an agricultural experiment station field: Opportunities arising from spatial dependence. **Agron. J.** 92: 706-714.

CHANG, M. A., OOSTERHUIS, D. M. (1995). Cotton response to foliar application of potassium compounds at different pH levels. Better Crops with Plant Food, Norcross, v. 79 (2): 20-22.

CHIAVEGATO, E. J., FUZATTO, M. G., ABRAHÃO, J. T. M., KONDO, J. I. (1999). Efeito do ambiente e de cultivares em componentes da produção e características tecnológicas da fibra e do fio de algodão. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ALGODÃO, 2, 1999, Ribeirão Preto. Anais. Campina Grande: Embrapa-CNPA, pp. 578-581.

CASSMAN, K. G., KERBY, T. A., ROBERTS, B. A., BRYANT, D. C., HIGASHI, S. L. (1990). Potassium nutrition effects on lint yield and fiber quality of Acala cotton. **Crop Science.** 30: 672-677.

CONALGODON. (2005). Unidad de Estadística y Análisis Económico. Informe Anual.

CONALGODON. (2006). Unidad de Estadística y Análisis Económico. Informe Anual.

DHINDSA, R. S., BEASLEY, C. A., TING, I. P. (1975). Osmoregulation in cotton fiber: Accumulation of potassium and malate during growth. **Plant Physiol**. 56: 394-398

HARTKAMP, A. D., WHITE, J.W. AND HOOGENBOOM. G. (1999). Interfacing geographic information systems with agronomic modeling. **Agron. J**. 91: 761-772.

KAFKAFI, U. (1992). Foliar feeding of potassium nitrate in cotton. Better Crops with Plant Food, Norcross.76: 16-17.

KERBY, T. A., ADAMS, F. (1985). Potassium nutrition of cotton. In: MUNSON, R. D. (Ed.). Potassium in agriculture. Madison: American Society of Agronomy, 1985. cap. 36, pp.843-860.

MARTINEZ, L. J. (2003). La Geomática y su importancia en la Agricultura. Memorias del VIII Congreso Sociedad Colombiana de Fitomejoramiento y producción de cultivos-Simposio Agricultura de Precisión.

OOSTERHUIS, D. M., WULLSCHLEGER, S. D., MAPLES, R. L., MILEY, W. N. (1990). Foliar-feeding of potassium nitrate in cotton. Better Crops with Plant Food, 74 (3), 8-9.

PETTIGREW, W. T., MEREDITH JR. W. R. (1992). Potassium fertilization influences cotton dry matter and yield. Better Crops with Plant Food, Norcross, v. 76, p. 22-23, winter 1992.

STAFFORD, J.; MILLER. P. (1996). Spatially Variable Treatments of Weed Patches. Pp. 465-473. In: Robert, P.; Rust, H. and R. Larson, eds. Proceedings of the 3rd International Conference on Precision Agriculture. June 23-26, 1996. Minneapolis, MN, USA. (ASA-CSSA-SSSA, Madison, Wisconsin, 1997). pp 465-474.

THOMPSON, W. R. (1999). Fertilization of cotton for yields and quality. In: CIA, E.; FREIRE, E. C.; SANTOS, W. J. dos (Eds). **Cultura do algodoeiro.** 93-99.

CAPÍTULO 1. IMPORTANCIA DEL POTASIO EN LA NUTRICIÓN DE PLANTAS, ENFASIS EN ALGODON

1.1. INTRODUCCIÓN

El algodón representa la principal fuente de consumo industrial de fibras textiles en Colombia; su productividad y calidad de fibra están influenciadas por factores nutricionales, genéticos, clima, suelo, prácticas culturales, plagas y enfermedades, entre otros. Así, el efecto del ambiente sobre el cultivo, con la aplicación de técnicas de fertilización, con énfasis en la utilización de potasio, puede mejorar el rendimiento y la calidad de la fibra del algodón.

El cambio del sistema productivo del algodón, de totalmente manual al mecanizado escalonado, forzó a la cadena textil, a mejorar rápidamente la calidad de la materia prima, para poder atender las necesidades de la industria nacional. Dentro de la cadena textil, el sector de hilandería y tejeduría presentan los mayores índices de modernización de equipos en los últimos años (Barragán *et al.*, 2005). Las características de calidad de la fibra más importantes para los nuevos sistemas de hilandería son: resistencia, finura (micronaire), longitud y pureza (Barbosa y Nogueira, 2001).

Las funciones del K, en la planta, están relacionadas con la activación de numerosas enzimas, en procesos de síntesis de carbohidratos, proteínas y en la activación de la ATPasa protónica; esta última, no sólo facilita el transporte de K^+ de la solución del suelo hacia las células de las raíces, sino que también, hace del K, el elemento mineral más importante para los procesos de extensión y osmorregulación celular. Igualmente, el transporte de sacarosa a través del floema es influenciado por el K (Marschner, 2002).

El K es un nutriente requerido por el algodón, así como el N, siendo extraído del suelo a tasas de hasta 5,6 $kg \cdot ha^{-1}$, durante la floración y fructificación (Cassman, 1993). De cada kilo de fibra producido requiere absorber, cerca de 0,13 kg de K (Kerby y Adams, 1985;

Silva *et al.*, 1995; Silva, 1998; 1999); una cosecha de alto rendimiento (2000 kg·ha^{-1} de fibra) puede extraer del suelo más de 250 kg·ha^{-1} de K. Cerca de 65% del K requerido es absorbido del suelo, entre el inicio de la floración y la maduración (Thompson, 1999). La cápsula, incluyendo sus carpelos, son los sumideros dominantes para el K dentro de la planta (Kafkafi, 1992; Kerby y Adams, 1985; Rosolem y Mikkelsen, 1991).

El K, importante para el desarrollo y calidad de la fibra (Cassman *et al.,* 1990), es el nutriente más abundante en su composición (Kafkafi, 1992). Su deficiencia produce menor crecimiento de la fibra (Dhindsa *et al.,* 1975) y deposición de celulosa en la pared secundaria de las fibras, logrando disminuir la resistencia, la madurez, la finura, la elongación, la longitud, el perímetro y la uniformidad (Bennett *et al.*, 1965), y producir fibras muertas o inmaduras que no colorean durante el proceso de tinción (Thompson, 1999).

La deficiencia de K puede causar pérdidas en la producción y calidad de la fibra del algodón. El síntoma típico de deficiencia de K sucede antes de la máxima floración del algodón y, las plantas con deficiencia presentan un ciclo corto, anticipando la maduración de los frutos (Silva *et al.,* 1995) y reduciendo la producción de fibras, peso de las semillas y cápsulas (Pettigrew y Meredith Jr, 1992). Después de la máxima floración, los síntomas de deficiencia de K aparecen primero en las hojas nuevas y maduras del tercio superior de la planta y son similares a los síntomas que ocurren antes de la máxima floración (Thompson, 1999). A medida que la deficiencia de K se vuelve severa, hay una gran reducción en la retención de los frutos localizados en el tercio superior (Cassman *et al.,* 1989), y caída prematura de las hojas (Bennett *et al.,* 1965; Silva, 1999). Para Rosolem y Bastos (1997) la presencia de botones florales, en los nudos más altos de plantas con deficiencia de K, estaría relacionada con su retención de los botones y no con su diferenciación y aparición.

1.2. POTASIO EN EL SUELO: ADSORCIÓN, ABSORCIÓN, TRANSPORTE Y REDISTRIBUCIÓN

Armstrong (1998) afirma que el potasio es el séptimo elemento más abundante en la superficie terrestre, encontrándose contenidos entre 2.200 a 33.600 $kg \cdot ha^{-1}$ de K en los 15 cm superficiales de los suelos agrícolas. Sin embargo, la mayoría de los suelos contienen cerca de 10 $kg \cdot ha^{-1}$, o menos, de potasio en solución, en equilibrio con el potasio intercambiable (Potafos, 1998).

Según Grassi (2000) en el suelo es posible encontrar el potasio en la red cristalina (entre 90 a 98% del total del potasio encontrado en el suelo), haciendo parte de diversos minerales que dan origen a feldespatos, micas y arcillas micáceas; fijado (1 a 10 % del total), inmovilizado por las capas de arcillas tipo 2:1 (vermiculita : motmorillonita); cambiable, adsorbido por los coloides del suelo; soluble, presente en la solución del suelo en concentración media de 0,8 mmol L^{-1} y en la materia orgánica (0,5 a 2,0% del total). La fracción de potasio 'intercambiable' más 'soluble' representa cerca de 1,0 a 2,0% del total encontrado en el suelo (Grassi, 2000; Potafos, 1998).

Para Bolan *et al.* (1999) la adsorción del K^+ es determinada por la superficie de cargas negativas del suelo. La fijación del K^+ en las arcillas del tipo 2:1 es debida a su posicionamiento entre las capas de arcilla. La adsorción de K^+ es altamente influenciada por la presencia de Ca^{2+} en la solución del suelo; por ello, al encalar y suministrar grandes cantidades de Ca^{2+}, se reduce la adsorción de K^+, debido a la disminución de la densidad de cargas, resultante del aumento de la selectividad del Ca^{2+} sobre el K^+. Por otra parte, si se disminuye la concentración de Ca^{2+} en la solución del suelo, debido a percolación, no habrá competencia de K^+ con el Ca^{2+} y por tanto, se promoverá una mayor retención de K^+.

La forma iónica (K^+) predomina en los coloides y en la solución del suelo. El K^+ es relativamente inmóvil en el suelo y se mueve hasta la superficie de la raíz, principalmente por difusión (Silberbush y Barber, 1983, citados por Brouder y Cassman, 1994), en un 72% del total absorbido, (Oliveira *et al.*, 2004), seguido por el flujo en masa (25%) y por interceptación radical (3%); por lo tanto las raíces con mayor diámetro y longitud (mayor superficie) pueden explorar un mayor volumen de suelo, favoreciendo la toma de K

(Rosolem *et al.,* 2003). La absorción del K del suelo es un mecanismo activo, contra el gradiente de concentración (Marschner, 2002; Malavolta *et al.,* 1989). El sistema radical del algodón se caracteriza por presentar baja densidad en el suelo, haciendo que la competencia por el K entre raíces sea despreciable (Gulick *et al.*, 1989, citados por Brouder y Cassman, 1994); además, la tasa de difusión de K^+ en el suelo disminuye a medida que el potencial hídrico del suelo declina, dificultando su absorción (Kuchenbuch *et al.*, 1986; Vaidyanathan *et al.*, 1968, citados por Brouder y Cassman, 1994). Según Brouder y Cassman (1994) el diámetro radical es una característica determinada genéticamente y las variedades eficientes en la exploración de K del suelo son aquellas que muestran mayor desarrollo radical; sin embargo, Taylor y Klepper (1978) consideran que las características radicales pueden ser modificadas por el ambiente del suelo.

Las diferencias en la eficiencia de absorción del K del suelo en varios genotipos del algodón fueron asociadas a diferencias en el diámetro medio radical (superficie) y a la capacidad de crecimiento radical después de la máxima floración (Brouder y Cassman, 1990).

Según Rosolem *et al.* (1999) la absorción de K por unidad de longitud radical del algodón (cv. IAC 22) se favorece por la fertilización de P hasta la dosis de 100 mg kg^{-1} de suelo. Además, la interacción entre el Ca y K puede ser benéfica para la toma de K por la planta cuando el bajo nivel de P en el suelo está limitando el proceso de absorción. El efecto sinérgico de Ca^{2+} sobre la absorción de K^+ en el suelo, solo se encuentra, cuando el calcio está en baja concentración en la solución (Malavolta *et al.*, 1989).

Mäser *et al.* (2001) afirman que existen más de cincuenta genes identificados en *Arabidopsis thaliana* que codifican transportadores de potasio. El potasio se transporta en forma iónica (K^+) y con alta movilidad en el floema y en el xilema (Grassi, 2000; Malavolta *et al.*, 1989; Marschner, 2002), siendo el nutriente más fácilmente lavable (hasta 80 % puede ser lixiviado por la lluvia o irrigación) (Grassi, 2000).

Para Coker y Oosterhuis (1999) el K es el catión más abundante (80% del total) en las células del floema, citoplasma celular y en la fibra del algodón.

Durante la etapa inicial de crecimiento del algodón, la demanda principal por K proviene de las hojas y del tallo y después de fructificación para los carpelos. Aproximadamente un 33% del total de potasio es absorbido en un período de 12 a 14 días iniciando con la máxima floración y un 67% entre el inicio de floración hasta la madurez de la planta de algodón (Thompson, 1999).

De acuerdo con Fageria *et al.* (1997) los carpelos acumulan potasio continuamente durante su desarrollo, llegando a un contenido de 5,5% en la madurez. La fibra acumula minerales durante las cinco primeras semanas de desarrollo, pero pierde la mayoría de estos durante las tres últimas semanas. El potasio es uno de los nutrientes minerales más abundantes en la fibra de algodón. La semilla contiene cerca de 0,95% de K, 3,7% de N y 0,55% de P.

Según Cassman (1993) la cápsula del algodón, incluyendo sus cárpelos, las semillas y las fibras, son las mayores demandantes de K, N y P dentro de la planta. La máxima demanda sucede después del inicio de la etapa de floración, a medida que se presenta un rápido desarrollo de los frutos. La tasa de absorción requerida para suplir la demanda depende de la carga de frutos; para una productividad entre media a alta, la máxima tasa de absorción puede variar entre 3,3 a 5,6 $kg \cdot ha^{-1}\ d^{-1}$ de K, de 2,2 a 6,7 $kg \cdot ha^{-1}\ d^{-1}$ de N y entre 0,3 a 0,8 $kg \cdot ha^{-1}\ d^{-1}$ de P.

Kafkafi (1992) monitoreó la capacidad de absorción del KNO_3 (utilizando el radioisótopo ^{42}K) por las hojas del algodón y su translocación en la planta en la fase de formación de cápsulas; encontrando que el potasio absorbido por la hoja se transloca principalmente hacia el meristemo apical y cápsulas en crecimiento, dentro de las 20 horas posteriores a la aplicación, enfatizando que los órganos en desarrollo constituyen una fuerte demanda para el potasio proveniente de la hoja.

1.3. FUNCIONES DEL POTASIO EN LA PLANTA

El potasio actúa como un elemento catalizador de reacciones en las plantas (Grassi, 2000). Una característica importante del K^+, de no ser metabolizado, es que sólo forma complejos débiles que son rápidamente intercambiables, por lo tanto no se le encuentra formando parte de ninguna estructura; además, es un catión de alta movilidad en las plantas en todos los niveles, dentro de las células individuales, en los tejidos, e igualmente en el transporte a larga distancia en el xilema y floema.

Entre las funciones conocidas del K se resalta la activación de cerca de 60 sistemas enzimáticos entre los que se destacan oxido reductasas, deshidrogenasas, transferasas, sintetasas y quinasas (Azcon-Bieto y Talon, 2000; Marschner, 2002) involucradas en diversos procesos como fotosíntesis, respiración, metabolismo de carbohidratos, translocación, síntesis de proteínas y balance iónico (Oosterhuis, 2001). En general, los cambios conformacionales inducidos por el K^+ en las enzimas incrementan la tasa de las reacciones catalíticas, V_{max},y en algunos casos, la afinidad por el sustrato, K_m (Evans y Wildes, 1971). La función del potasio en la activación enzimática y biosíntesis de proteínas se presenta por su alta y estable concentración dentro del citoplasma

Para Oosterhuis (2001) el potasio está involucrado integralmente en el metabolismo y en las relaciones hídricas de la planta; sin embargo, no es constituyente de ningún componente conocido en la planta. El potasio equilibra las cargas de aniones, influyendo en su absorción y transporte. Marschner, (2002) afirma que el potasio es el catión más abundante en el citoplasma y junto con su anión acompañante, contribuye al mantenimiento del potencial osmótico de las células. Debido a su alta concentración en el citosol y cloroplastos, el potasio puede neutralizar aniones, estabilizando el pH entre 7 y 8 en estos compartimentos. Además, respecto a la regulación osmótica, el potasio está directamente relacionado con el mecanismo de apertura y cierre de los estomas, al promover cambios en la presión de turgor de las células de guarda (Marschner, 2002). Dhindsa *et al.* (1975) reportaron que el K^+ y malato$^-$, actúan como solutos osmorreguladores, siendo responsables de generar más del 50% de la presión de turgor necesaria para el crecimiento de la fibra de algodón.

Silva *et al.* (1994) consideran que el potasio, por participar en el mantenimiento del follaje y regular el ciclo del algodón, promueve un aumento de los procesos metabólicos relacionados con el engrosamiento de la pared secundaria de la fibra (Cassman *et al.*, 1990), mejorando el índice micronaire (finura más madurez). La longitud media de las fibras se ve menos favorecida, pero el número de fibras cortas (uniformidad de longitud) disminuye, permitiendo la confección de hilos más resistentes.

Gran número de enzimas son dependientes o estimuladas por el potasio y las estudiadas están involucradas con los procesos enzimáticos de la síntesis de carbohidratos, síntesis de proteínas y en la activación de la bomba de protones, en las membranas; función ésta que, no sólo facilita el transporte de K^+ de la solución del suelo para las células de las raíces, sino que, además, hace del potasio el elemento mineral más importante para los procesos de extensión y osmorregulación celular (Marschner, 2002). Para que se presente la expansión celular se necesitan dos requisitos: aumento de la extensibilidad de la pared celular y acumulación de solutos para crear potencial osmótico interno. El potasio tiene una función esencial en este proceso, pues, al acumularse en la vacuola de la célula, promueve estabilidad del pH del citoplasma y aumento del potencial osmótico de la vacuola. Cationes específicos como el Ca^{2+} y el K^+ están directamente relacionados con la expansión de la pared celular. Mientras que el Ca^{2+} ejerce un efecto de endurecimiento, el K^+ es el encargado del ablandamiento de la pared, eventos que son iniciados por la ruptura de los enlaces de la pared que soportan la carga eléctrica, seguido por un pequeño incremento en la viscoelasticidad (Cleland, 1987). Además, Gao *et al.* (2007) reportan que señales de transducción del calcio pueden estar involucradas en la regulación de la extensión de la fibra del algodón que se expande por crecimiento-difusivo.

El potasio afecta la fotosíntesis en diversos niveles: favorece el flujo de H^+ a través de la membrana de los tilacoides y genera el gradiente de pH que regula la síntesis del ATP; aumenta directamente el crecimiento foliar, el índice de área foliar y por consiguiente la asimilación de CO_2 (Oosterhuis, 2001) y la fijación de CO_2 (Marschner, 2002). Igualmente aumenta la translocación de fotoasimilados de la hoja, y en algodón participa en el desarrollo de la fibra, cuya calidad y producción disminuyen cuando es deficiente (Oosterhuis, 2001).

El transporte de sacarosa a través del floema es influenciado por el potasio, al actuar en el mantenimiento de pH alto en las células del floema, valor necesario para el cargue de la sacarosa, contribuyendo también con el mantenimiento del potencial osmótico de estas células, y por tanto, en la tasa de transporte de fotoasimilados de la fuente para la demanda (Marschner, 2002).

La función del potasio en el balance catiónico se refleja en el metabolismo del nitrato, en el cual el K^+ es el contra-ion dominante para el NO_3^-, en el transporte a larga distancia por el xilema, y para el almacenamiento en la vacuola. Como consecuencia de la reducción del NO_3^- en las hojas, el potasio remanente requiere una síntesis estequiométrica de ácidos orgánicos; especialmente ácido málico, para balancear las cargas y el pH. Parte del malato de potasio recién formado puede ser translocado a las raíces para ser utilizado como contra-ion del NO_3^- en las células radicales y para el transporte por el xilema (Marschner, 2002).

Según Yamada (2002), el K^+ está presente en la síntesis de proteínas, en el transporte del nitrato (de las raíces hacia la parte aérea de las plantas) y el malato$^-$ (de las hojas hacia las raíces). En las raíces, el malato$^-$ transportado por el K^+ es descarboxilado como piruvato y el HCO_3^- puede ser intercambiado por el NO_3^- aumentando el pH en la rizósfera. El funcionamiento de este modelo de absorción y transporte de nitrógeno depende de la adecuada concentración de potasio en el suelo.

1.4. LA CALIDAD DE LA FIBRA Y DEL HILO DE ALGODÓN

El K participa en el desarrollo y calidad de la fibra (Cassman *et al.,* 1990), siendo considerado como el nutriente mineral más abundante en su composición (Kafkafi, 1992). Se ha demostrado, en algodón, la relación positiva entre el suministro de potasio y dos características importantes en la calidad de la fibra, como son la longitud y el grosor de la pared secundaria en la madurez (Bennett *et al.,* 1965; Cassman *et al.,* 1990).

El desarrollo de la fibra de algodón dura entre 45 y 60 días (desde la antesis hasta la apertura de la cápsula), e incluye cuatro estadíos: iniciación, elongación, engrosamiento o síntesis de pared secundaria y maduración (Kim y Triplett, 2001). Durante la fase de elongación de la fibra se desarrolla una fina pared celular primaria, que es expansible; al

final de esta fase, la fibra habrá determinado su longitud, alcanzando su máximo hacia los 25 días después de la fertilización (Oosterhuis, 1999). Antes del final de la fase de elongación (aproximadamente 16 días después de la antesis) se da el inicio de la fase de deposición de celulosa sobre la pared primaria, para formar la pared secundaria, iniciando un engrosamiento de la fibra que continúa hasta la apertura de la cápsula. Debido a una superposición de fases, las fibras simultáneamente se alargan y engrosan a nivel de la pared secundaria. De esta manera, el diámetro y el perímetro que definen la finura de la fibra en algodón, no son fijados durante la iniciación de la fibra, pero su forma cambia de manera dinámica durante el desarrollo de la fibra. El diámetro puede ser alterado por condiciones ambientales como sequía, causando fibras cortas con diámetro aumentado (Seagull *et al.*, 2000).

La calidad de la fibra en algodón es sensiblemente influenciada por las condiciones climáticas, siendo las épocas de siembra y las prácticas culturales, las que más interfieren en las características de las fibras y de los hilos. Fue así como, las siembras extemporáneas (Enero y Febrero en Riberao Preto, SP, Brasil) redujeron la calidad de la fibra, que presentó menores valores en su longitud, resistencia y micronaire, permaneciendo la elongación sin ninguna alteración (Bolonhezi *et al.,* 1999).

Chiavegato *et al.* (1999) en estudios con cuatro variedades de algodón, en 40 ambientes y durante tres años, concluyeron que la influencia del ambiente en las características de producción y de calidad de la fibra fue, en general, muy superior al del cultivar. De esta forma, la gran variación en las características de la fibra se debe al ambiente, independientemente de la variedad. La variedad no garantiza la buena calidad de la fibra a ser producida, pues depende de la interacción del genotipo con el ambiente. Entre las características de la fibra, el índice micronaire y la madurez fueron las de mayor variación debida a la influencia del ambiente. La única característica de la fibra que, en todos los cultivares, mostró correlación de dependencia con la producción, fue la longitud de la fibra.

La generación de presión de turgor es el mecanismo que gobierna la expansión celular en las fibras de algodón (Wilkins, 1992; Basra y Malik, 1983, citados por Seagull *et al.,* 2000). La concentración de malato$^-$ y K^+ en el citoplasma, tienen un papel fundamental en el desarrollo del potencial osmótico que genera la presión de turgor (Dhindsa *et al.,* 1975).

Bradow y Davidonis (2000) reportan que, la longitud de la fibra es considerada genotipo-dependiente, mientras que las fluctuaciones del ambiente de crecimiento, resultante de las variaciones estacionales y anuales del clima y aquellas inducidas por las prácticas culturales y la aplicación de insumos, modulan la amplitud y la longitud media de las fibras.

Pettigrew y Meredith (1992) encontraron que plantas deficientes en potasio disminuyeron 18% el índice de área foliar, aumentaron 16% el peso específico foliar y redujeron en 7% el índice micronaire de la fibra (sin alteración del perímetro). Además, la deficiencia de potasio genero una menor deposición de celulosa en la pared secundaria de la fibra, disminuyendo el micronaire y la madurez.

La cuantificación de la longitud de la fibra es relativamente simple y reproducible, por eso es, junto con el índice micronaire, una de las propiedades más investigada. Otras características de la fibra son difíciles de cuantificar y los datos resultantes no son fácilmente entendidos o analizados estadísticamente, como es el caso de la medida de resistencia, considerada cada vez más una propiedad fundamental por los cambios en las técnicas de hilado (Bradow y Davidonis, 2000).

La mayoría de las características de la fibra están directamente relacionadas con las propiedades físicas del hilo. La transformación de la industria textil busca aumentar productividad y calidad del producto final, haciendo dependiente el proceso de modernización de los hilos, con la implementación de hilaturas de rotor en sustitución de los convencionales (Barbosa y Nogueria, 2001; Fibratolima, 2005).

Pettigrew y Meredith (1992) al estudiar los efectos de la fertilización potásica y nitrogenada sobre la producción y calidad de la fibra del algodón, encontraron que el uso del potasio promovió aumentos en la producción y en la calidad de la fibra (mayor madurez y menor cantidad de fibras muertas), no existiendo interacción entre genotipo y potasio, ni entre potasio y nitrógeno.

La resistencia y elongación de la fibra en la variedad “Acala”, presentaron relación positiva con la cantidad aplicada de potasio (Cassman *et al.,* 1990); para las variedades “Acala” (“SJ-2” y “GC-510”), la resistencia de la fibra no mostró efecto significativo del genotipo,

ni la interacción entre genotipos y cantidad aplicada de potasio; pero, la elongación si fue influenciada por las diferencias genotípicas.

En un trabajo de revisión, Bradow y Davidonis (2000) demostraron la relación contradictoria entre las características de la fibra y la nutrición mineral debida a los efectos de las interacciones entre genotipos, clima y condiciones de suelo. Kerby y Adams (1985) también reportaron la relación contradictoria de la nutrición potásica sobre la producción y calidad de la fibra en el algodón. Al adicionar potasio, aumentó significativamente la resistencia de la fibra en las variedades "DES 119" y "Stoneville 825", pero no la elongación (Minton y Ebelhar, 1991). También, se presentaron grandes diferencias en la resistencia y longitud de la fibra entre los dos genotipos de algodón; pero, la adición de potasio al suelo solamente aumentó la longitud (Pettigrew *et al.,* 1996). No se encontró ninguna correlación entre resistencia de la fibra y variaciones espaciales en los niveles de potasio, fósforo, calcio/magnesio y porcentaje de materia orgánica (Bradow *et al.,* 1999, citados por Bradow y Davidonis, 2000).

1.5. REQUERIMIENTOS Y CONTENIDO ÓPTIMO DE POTASIO EN EL ALGODÓN

Bajo condiciones normales de crecimiento de las plantas, el potasio es el catión más abundante en las células vegetales. Para la mayoría de las plantas la concentración de K en el citosol y cloroplastos está entre 100 y 200 mM (Leigh y Wyn Jones, 1984; Schroppel y Káiser, 1988; citados por Marschner, 2002). En la vacuola, la concentración puede variar entre 10 y 200 mM, alcanzando 500 mM en las células guardas de los estomas (Hsiao y Lauchli, 1986; Outlaw, 1983, citados por Marschner, 2002; MacRobbie, 1998) y 230 mM en las vacuolas de las células foliares de cebada (Cuin *et al.,* 2003). A nivel del apoplasto, pocas veces, la concentración es mayor de 20 mM (Karley *et al.,* 2000, Roelfsema y Hedrich, 2002).

Con el conocimiento que se tiene, por la alta demanda de potasio para la mayoría de los cultivos comerciales, el suministro a los mismos es muy bajo (Öborn *et al.*, 2005). Malavolta *et al.* (1962) citados por Fageria *et al.* (1997), consideran que el algodón en las condiciones Brasileras, requiere cerca de 15 $kg \cdot ha^{-1}$ de K, 19 $kg \cdot ha^{-1}$ de N y 8 $kg \cdot ha^{-1}$ de P,

para producir 100 kg de fibra. Thompson (1999) afirma que para producir 100 kg de fibra de algodón, las plantas absorben del suelo cerca de 15,3 $kg \cdot ha^{-1}$ de K, 19,9 $kg \cdot ha^{-1}$ de N y 2,5 $kg \cdot ha^{-1}$ de P. En las plantas adultas, las semillas contienen 18,4% de K, 42,4% de N y 52,8% de P, siendo la demanda principal para potasio el carpelo.

Durante la fase de mayor demanda de potasio por el algodón, entre 60 y 80 días después de siembra, el consumo máximo puede alcanzar hasta 3,4 o más de 4,5 $kg \cdot ha^{-1}$ d^{-1} de K_2O (Snyder, 1997). Sin embargo, cerca del 70% de la absorción de potasio ocurre después de iniciar la floración, con máxima absorción durante el inicio del desarrollo de las cápsulas (Stewart, 2000).

Según Reuter (1986), citado por Fageria *et al.* (1997), la concentración óptima de K en la lámina foliar del 3º o 4º nudo, a los 45 días después de siembra (DDS), debe ser mayor que 3,2%; a los 76 DDS la hoja debe contener entre 4,9 a 6,2% de K; a los 101 DDS entre 4,6 y 6,0% y a los 120 DDS entre 2,5 y 4,0% de K.

El total de K requerido por el algodón varía entre 52 y 112 $kg \cdot ha^{-1}$, en condiciones de secano y entre 53 y 393 $kg \cdot ha^{-1}$ con riego. La máxima absorción de K varía entre 2,1 y 4,6 $kg \cdot ha^{-1}$ d^{-1} (secano), y la mayoría del K absorbido va a la cápsula en desarrollo (55 a 60% en madurez), particularmente en el carpelo (40%). El K removido por la fibra y semilla equivale del 7,5 al 46% del total de K de la planta (Oosterhuis, 2001).

Según Varco (2000) cuando el algodón se cultiva en el sistema de siembra directa, la necesidad de potasio puede ser mayor que el exigido por el sistema convencional, especialmente, si el suelo posee alta capacidad de intercambio catiónico y de alta capacidad de adsorción de K, que limita su movimiento. La mayor retención de agua, en el sistema de siembra directa, así como el efecto del potasio sobre la eficiencia en el uso del agua, puede ser parcialmente responsable del buen desempeño del algodón en los años con mayores déficits de agua, comparados con el sistema convencional.

Según Albers *et al.* (1993) después de la deslintada, la mayor cantidad de los nutrientes minerales, nitrógeno, fósforo, potasio y los micronutrientes son removidos con la semilla y los residuos, y constituyen solamente 1% del peso de las fibras, pues su composición básica es celulosa, cuyos elementos componentes son C, H y O.

Rosolem (2001) al resaltar la gran variación en la extracción de K, en el algodón, en función de diferencias entre variedades, condiciones locales y de manejo del cultivo, afirma que cantidades entre 43 y 60 kg de K_2O pueden ser extraídas del suelo para producir 1.000 $kg \cdot ha^{-1}$ de algodón. Para la variedad "IAC-22", la velocidad de absorción de N, P y K (fracción absorbida por día), en función de la edad del algodón, aumenta a los 40 días y se mantiene alta hasta los 90 días. Sin embargo, para la variedad "ITA-90" las exigencias son altas, entre los 50-60 días, hasta los 100 días. Como la velocidad de absorción de K disminuye rápidamente, a partir de los 90-95 días, llegando a cero, y la planta, además, necesita de potasio en esta fase (llenado de frutos y maduración de fibras), entonces, el K debe ser suministrado, a los frutos a través de la translocación, de ahí la importancia que las plantas acumulen K antes de los 90 días de emergencia.

Staut y Kurihara (2001) encontraron que el potasio es requerido, en mayor proporción, en dos períodos del ciclo del algodón: entre 30 y 50 días después de emergencia y a los 90 días. Mendes (1960) en un experimento, utilizando solución nutritiva, concluyó que el algodón acumula cerca del 49,4% del total de potasio absorbido, hasta el inicio de floración (6ª semana del ciclo de vida).

Los altos requerimientos de K, por los cultivos que tienen alto contenido de proteína y la gran exportación de K, a través de los granos con elevado contenido proteico, sería explicado por la participación del K en el transporte de N, para la síntesis proteica y en la neutralización de los grupos carboxilo de los aminoácidos formados (Blevins, 1985 y 1989, citado por Yamada, 2002).

Staut y Kurihara (2001) considerando una población de 88.000 plantas ha^{-1} de algodón y productividad de 2.500 $kg \cdot ha^{-1}$ de algodón-semilla, encontraron que las cantidades extraídas, exportadas y retornadas al suelo, por el algodón fueron de 212, 52 y 60 $kg \cdot ha^{-1}$ de N, de 32, 21 y 11 $kg \cdot ha^{-1}$ de P_2O_5 y de 118,35 y 83 $kg \cdot ha^{-1}$ de K_2O, respectivamente.

Zhao y Oosterhuis (1998) estudiando los efectos del sombreamiento sobre el estado nutricional del algodón en tres fases de desarrollo (primera flor, máxima floración y formación de cápsulas), encontraron que la reducción en 63% de la luminosidad incidente durante un período de 8 días consecutivos, aumento la concentración de los nutrientes en el

pecíolo (media de todas las fases): NO_3^- (145%), K (20%), P (17%), S (18%); en la lámina foliar correspondiente, estos aumentos fueron: NO_3^-(19%), K (22%), P (29%), S (22%).Tales incrementos presentaron correlación negativa con la disminución en la síntesis de carbohidratos y, por tanto, es una alerta para verificar la situación de la luminosidad al momento del muestreo foliar para evitar error en el diagnóstico nutricional.

Brouder y Cassman (1994) concluyeron que el enriquecimiento localizado de potasio en el área de raices, no presentó efecto sobre la distribución en el crecimiento de las raíces del algodón, confirmando la teoría según la cual, el crecimiento radical no responde a la heterogeneidad espacial del suministro de K del suelo en campo. La acumulación de K en la parte aérea del algodón no fue relacionada con la disponibilidad de K en el suelo, pero está fuertemente correlacionada con la superficie radical.

Para producir una tonelada de algodón-fibra por hectárea, la planta entera del algodón extrae cerca de 50 kg de K y la parte cosechada, exporta cerca de 16 a 17 kg de K (Silva *et al.,* 1995; Silva, 1998; 1999).

Kerby y Adams (1985) comentan que para una alta productividad del algodón, la planta debe absorber cerca de 0,10 a 0,13 kg de K^+, para producir un kilo de fibra, retirando del suelo 175 $kg \cdot ha^{-1}$ de K^+. Igualmente, hacen referencia a que en el momento de la cosecha, el contenido de K^+ en las hojas y ramas disminuye, valor que se vuelve equivalente a la cantidad contenida en la cáscara de los frutos.

Según Cassman (1993) la proporción de nutrientes destinada a la semilla y fibra permanece relativamente constante sobre una amplia franja de producción y condiciones ambientales. En promedio, cerca de 26% de K, 53% de N y 58% de P existentes en la parte aérea de la planta están contenidos en la semilla de algodón. El contenido de potasio en la fibra del algodón es de 0,65% y de la semilla deslintada 1,2%. El cultivo del algodón retira del suelo cerca de 36,6 $kg \cdot ha^{-1}$ de K (o 44,0 $kg \cdot ha^{-1}$ de K_2O) y exporta (semilla + fibras) cerca de 9,82 $kg \cdot ha^{-1}$ de K (o 11,8 $kg \cdot ha^{-1}$ K_2O), por cada 1000 kg de algodón-semilla producida.

El contenido crítico de potasio, encontrado en el pecíolo del algodón varía según el estado de desarrollo del cultivo, pudiendo ser de 4,0% en el inicio de la floración, 3,0 % en

máxima floración, 1,5 % en apertura de la primera cápsula y 1,0% al final del ciclo (Cassman, 1993).

Howard *et al.* (2001) concluyeron que la concentración de K en la hoja del algodón guarda relación con el aumento de las dosis de K aplicadas en pre-siembra; así, una concentración de 1,1% de K en la lámina foliar y de 3,9% en el pecíolo corresponde a la mayor dosis de K aplicada al suelo (167 $kg \cdot ha^{-1}$).

El contenido adecuado de K en la materia seca de la lámina foliar, retirado de la 5ª hoja a partir del ápice del algodón, en la época de floración (80-90 días después de emergencia), debe estar entre 1,5 y 2,5% (Silva *et al.*, 1995; Silva, 1998).

Zhao y Oosterhuis (1999) en estudios sobre la dinámica de la concentración de nutrientes en algodón, concluyeron que durante la ontogénesis de los botones florales, la concentración de N, P y K, de las hojas simpodiales y de las brácteas, disminuye, y la concentración de Ca y Mg aumenta. En los botones florales se reduce el contenido de N, P, Ca y S, pero se incrementa el del K y Mg, hasta alcanzar el máximo, a los 25 días de desarrollo del botón.

Coker y Oosterhuis (1999) indicaron que el nivel de fertilidad por K es importante para alcanzar la máxima productividad cuando se cultiva el algodón con limitado suministro de agua. De esta manera, se obtienen mejores producciones de algodón cuando hay mayor disponibilidad de K en el suelo y sin falta de agua.

Snyder (1997) comenta que en los Estados del sur de EU, el nivel de suficiencia de K observado en el análisis de suelo (0 a 15 cm profundidad) es de 195 mg kg^{-1} extraíble, en Mehlich 3, para la Universidad de Arkansas, y de 150 a 220 mg kg^{-1} de K extraíble en Mehlich 3, para la Universidad de Georgia.

1.6. DEFICIENCIA DE POTASIO EN EL ALGODÓN

Muchos estudios demuestran que la deficiencia de K en plantas de algodón afecta negativamente la fotosíntesis (Bednarz *et al.*, 1998; Zhao *et al.*, 2001), área foliar (Zhao *et al.*, 2001; Pettigrew, 2003), producción de biomasa (Zhao *et al.*, 2001), disminución en

rendimiento (Pettigrew, 2003) y baja calidad de la fibra (Pettigrew *et al.*, 1996). En el caso de la fotosíntesis, el efecto negativo de la deficiencia conduce a un incremento en la producción de especies reactivas de oxígeno, resultando en daño por fotooxidación (Cakmak, 2005).

Kerby y Adams (1985) afirman que, la deficiencia de potasio está creciendo por cultivar en suelos arenosos, con baja disponibilidad de K, considerando que el algodón posee baja eficiencia en la toma de K del suelo, comparado con otras especies. La muerte prematura se puede incrementar en algodón debido, principalmente, a su poca habilidad para la toma de potasio y de otros nutrientes en la etapa de formación y llenado de cápsulas (Brouder y Cassman, 1990), y ocurre más frecuentemente en cultivares modernos de alto rendimiento con tecnología Bt, que en los convencionales (Dong *et al.*, 2005).

En variedades de algodón altamente productivas, más del 75% del potasio es direccionado a las cápsulas. Cuando el potasio es limitante durante el período de fructificación del algodón, los síntomas foliares de deficiencia aparecen y no son típicos, ocurriendo en hojas nuevas en lugar de las hojas viejas (Kafkafi, 1992).

Oosterhuis (1993) citado por Howard *et al.* (1998), considera que la actividad del sistema radical, de las variedades de alta productividad, comienza a disminuir en la floración, cuando inicia la alta demanda potásica por las cápsulas en desarrollo y la absorción de potasio no suple las necesidades del algodón. El crecimiento de la planta, en suelos con limitada disponibilidad de potasio y restringida actividad radical, tienen un efecto negativo sobre la absorción de este elemento. Huber (1983) concluyó que la deficiencia de K^+ disminuye la tasa de exportación de fotoasimilados por estar asociado con la disminución de la actividad de la sacarosa fosfato sintetasa, enzima clave en la síntesis de sacarosa. Además, la hidrólisis de la sacarosa se incrementa.

Su deficiencia causa menor deposición de celulosa en la pared secundaria de las fibras, disminuyendo el micronaire y la madurez (Pettigrew y Meredith, 1992). Experimentos realizados por Pettigrew *et al.* (1996), señalan que la deficiencia de potasio reduce la producción de fibra, peso de las cápsulas, porcentaje de fibra, peso de semillas y calidad de

la fibra (menores valores en elongación, longitud, micronaire, madurez, perímetro y uniformidad).

Las deficiencias minerales de potasio pueden ser corregidas por medio de la fertilización edáfica o foliar de nitrato de potasio. La aplicación foliar tiene la ventaja de ser absorbida más rápidamente por las hojas y ser eficiente en el movimiento hacia los frutos en desarrollo. Esto permite, a los productores, adicionar potasio cuando el análisis tisular indique su falta, previniendo pérdidas en la producción (Ooesterhuis *et al.*, 1990; Bednarz *et al.*, 1999).

Plantas deficientes en potasio pueden producir muchas fibras muertas, inmaduras, que no colorean en el proceso de tinción, produciendo numerosos y pequeños puntos blancos en el tejido industrializado. Por análisis de fiabilidad y tinción realizados a fibras de algodón, provenientes de plantas deficientes de potasio, se concluye que éstas producen hilos delgados, que constantemente se revientan durante el proceso de hilatura y que las prendas tejidas con estos hilos no tiñen uniformemente, dejando rayas (Thompson, 1999). Según Yamada (1996), la deficiencia de K provoca acumulación de aminoácidos (que contribuyen a la degradación de los fenoles) y de azúcares solubles (que son nutrientes para los patógenos). Además, la deficiencia de K retarda la cicatrización de heridas, favoreciendo la penetración de los patógenos.

Los síntomas de deficiencia de potasio, que ocurren antes de la máxima floración del algodón, son similares a las de otros cultivos. Comienzan con un amarillamiento entre las nervaduras de las hojas más viejas, y si la deficiencia es severa, se desarrollan puntos necróticos en las márgenes de las hojas. En muchos suelos, la disponibilidad de potasio es suficiente hasta la máxima floración, cuando comienza una rápida acumulación de materia seca en los frutos; si el suministro por parte del suelo no suple el aumento de la demanda, aparece una deficiencia tardía de potasio, con síntomas diferentes a la deficiencia de inicio del ciclo (Cassman, 1993). Después de la máxima floración, los síntomas de deficiencia potásica aparecen primero en las hojas nuevas y maduras del tercio superior de la planta y se inicia un leve amarillamiento, entre las nervaduras, cambiando rápidamente a una coloración bronce-anaranjada. Las hojas se enrollan hacia abajo y se tornan gruesas y en sus márgenes se pueden presentar puntos necróticos. A medida que la deficiencia tardía de

potasio se vuelve severa, hay una gran reducción en la retención de los frutos localizados en las últimas ramas (Cassman *et al.*, 1989), y se presenta una caída prematura de las hojas (Bennett *et al.*, 1965). Estos síntomas son tan devastadores que algunas veces, son atribuidos a enfermedades, como la mancha de "Verticilium". Un examen cuidadoso puede diferenciar los dos síntomas. La mancha de "Verticilium" causa lesiones necróticas entre las nervaduras, que poseen un borde bien definido y son ricas en un color marrón; por su parte, el síntoma de deficiencia de potasio produce una hoja bronceada, y las lesiones necróticas se desarrollan en las márgenes de las hojas sin bordes definidos.

Rosolem y Bastos (1997), utilizando solución nutritiva sin potasio, encontraron que la planta de algodón sólo manifiesta síntomas de deficiencia a partir de la fructificación: las hojas del tercio medio muestran clorosis entre las nervaduras, sin simetría, pudiendo presentarse un lado de la hoja con síntoma más acentuado; además se reduce significativamente la producción de materia seca (raíz y parte aérea) y el número de botones florales.

Snyder (1997), refiriéndose a las deficiencias de potasio en los EUA, al final del ciclo de las variedades de gran producción y con fructificación precoz, destaca como síntomas: el amarillamiento y el bronceado de las márgenes de las hojas en el dosel superior con ataque asociado de microorganismos causantes de la mancha foliar, el inicio prematuro de la fructificación, la caída de hojas y la reducción de los rendimientos.

La deficiencia potásica se puede corregir con el abonamiento edáfico en pre-siembra o parcialmente con la fertilización durante el ciclo del cultivo. La necesidad de aplicaciones foliares de potasio varía mucho en función del área geográfica y en un mismo campo, dificultando estandarizar una recomendación para esta práctica, debido, principalmente, a que el síndrome de deficiencia de potasio aún no está totalmente esclarecido (Oosterhuis, 2001).

Bednarz y Oosterhuis (1996) sometieron el algodón a la deficiencia de potasio, después de 35 días de siembra y estudiaron la distribución del elemento dentro de la planta. En las evaluaciones hechas a los 4, 14 y 28 días después de inicio de la deficiencia, el contenido de potasio de las hojas (lámina foliar o pecíolo) localizadas en las ramas superiores de la

planta decreció más que las hojas de las ramas inferiores. Se observaron diferencias en el contenido de potasio en los frutos, solamente a los 28 días después de iniciada la deficiencia, la que no alteró el peso de los frutos. En los cultivares modernos de algodón, esta deficiencia sucede primero en las hojas situadas en las ramas superiores, al contrario del clásico síntoma de deficiencia de potasio.

Rosolem y Mikkelsen (1991) estudiando la distribución del potasio en el algodón sometido a períodos de deficiencia del elemento, reportaron que el tallo es el primer órgano en mostrar disminución en el contenido de potasio y en la producción de materia seca, seguido por las raíces, los frutos y las hojas. Debido al mecanismo de translocación del potasio, la planta podría soportar una deficiencia potásica por un período de, hasta, 30 días durante el final del ciclo de crecimiento, sin afectar la producción de semillas y fibras.

Harris (2001) reporta que la deficiencia de potasio, asociada con la mancha foliar, es conocida hace mucho tiempo en el Estado de Georgia, EUA; sin embargo, últimamente se ha presentado con mayor frecuencia y severidad y mucho más temprano, durante el ciclo del algodón. Se descubrió que, las manchas foliares son lesiones marrones causadas por hongos de los géneros *Cercospora, Alternaria* o *Stemphylium*; sin embargo, estos síntomas son secundarios al problema primario que es la deficiencia potásica. En la mayoría de los estudios, las manchas sucedieron en localidades donde había baja cantidad de potasio en el suelo y en el tejido o pecíolo del algodón y en algunos casos, debido a la fertilización potásica inadecuada. Otros casos se debieron a la sequía, que reduce la absorción de potasio del suelo y los síntomas se presentaron en variedades precoces, en las que la demanda intensa de potasio en un corto período de tiempo parece haber generado el problema. En pocos casos, tales síntomas fueron observados en suelos con niveles elevados de magnesio, que puede competir con el potasio en la absorción. Sin embargo, en la mayoría de los casos, los síntomas aparecieron en cultivos en pleno desarrollo, sin irrigación, próximos a la cuarta semana de floración período de gran demanda potásica, causando caída de cápsulas.

Las raíces, durante la fase de plena floración, comienzan a disminuir debido a la competencia por los carbohidratos de las cápsulas en desarrollo, que origina disminución de la absorción de potasio del suelo. Si la deficiencia se detecta cerca de la cuarta semana de floración y no es tan severa, aplicaciones foliares con potasio pueden reducir los efectos

negativos sobre la producción. El análisis fisicoquímico de pecíolos puede ayudar a detectar deficiencias nutricionales a partir de dos semanas de desarrollo. Si la deficiencia severa del elemento ocurre tardíamente (sexta semana de floración), la aplicación foliar de potasio no corregirá el problema.

La deficiencia potásica y las manchas foliares son comunes después del estadio de "cut-out" (corte fisiológico), pero no se recomienda ningún tratamiento correctivo en esta época. Las mejores prácticas de manejo, para impedir la deficiencia de potasio son: mantener el contenido de K del suelo en la franja de disponibilidad de media a alta y el equilibrio con otros nutrientes (Ca, Mg). Debido a su relativa movilidad en los suelos arenosos, el potasio se requiere aplicar en forma fraccionada, mitad en la siembra y mitad en la fase de iniciación de los botones florales; para proceder a las aplicaciones foliares de potasio, principalmente en suelos arenosos y de bajo contenido potásico, en cultivos irrigados y de alta productividad, durante períodos de limitada humedad del suelo se debe monitorear el contenido de potasio por medio del análisis de pecíolo, para poder predecir con anterioridad de hasta dos semanas, la ocurrencia de la deficiencia y evitar pérdidas.

Hodges (2002) relata que los síntomas de deficiencia de potasio, en los últimos años, han aparecido en la parte superior de las plantas, en la región de California y centro-sur de los Estados Unidos y, en suelos con alto nivel de potasio, donde las plantas son incapaces de tomar un suministro adecuado de este nutriente. Estos síntomas han sido asociados con cuatro factores: a) uso de variedades altamente productivas, de hábito determinado, que desarrollan una gran carga de frutos, en un corto período de tiempo; b) suelos que fijan el potasio (alto contenido de arcillas tipo 2:1), dejando sólo formas no disponibles a las plantas; c) enfermedades no identificadas; d) leve a moderado estrés hídrico después de la definición de la carga de los frutos.

En estudios realizados con soluciones nutritivas Reddy *et al.* (2000) encontraron que cuando el potasio es retirado de la solución, una vez desaparecido el primer botón floral, las plantas de algodón continúan creciendo a una menor tasa y, el contenido de potasio en la hoja se torna progresivamente menor debido al efecto de la dilución, por la producción de materia seca. Sin embargo, por la translocación de potasio de las hojas más viejas hacia las estructuras más nuevas, su ausencia se vuelve limitante en pocos días y las hojas más viejas

pueden continuar verdes, aparentemente saludables, pero no son fotosintéticamente funcionales. Las hojas viejas expresan síntomas de deficiencia cuando son formadas con inadecuada disponibilidad de potasio; al ser producidas sin restricción de este elemento, no mostrarán síntomas de deficiencia; pero, si han translocada la mayor parte del potasio, se presenta la situación conocida como "hambre oculta".

El algodón requiere alta concentración de potasio en las hojas, desde el inicio de su desarrollo, para no sufrir escasez durante la fase de formación de cápsulas, pues, es difícil mantener un contenido adecuado del elemento en las hojas, debido a la alta demanda de las cápsulas durante esta época. Además, durante la fructificación, el menor tamaño del sistema radical, en relación con el tamaño de la planta (menor relación entre raíz y parte aérea), unido a la disminución de la eficiencia de las raíces en la absorción de nutrientes (mayor cantidad de raíces viejas), dificultan la absorción de gran cantidad de potasio demandada en esta fase. En plantas con concentración de 1,9% de potasio, sus hojas parecen tan sanas como las que tienen mayor contenido de K, pero presentan menor tasa fotosintética. Por ello, la concentración de 2,0% de potasio en las hojas, es conocida comúnmente como adecuada, pero este valor debe ser considerado marginal. El contenido adecuado de potasio en las hojas, en la fase de inicio de floración, parece ser de 3,0% y un valor por debajo de 2,5% es considerado crítico. Plantas deficientes de potasio pueden morir prematuramente, debido a que poseen menor resistencia a enfermedades y a plagas. Inadecuado suministro de potasio, igualmente, limita el crecimiento, causa un corte fisiológico prematuro y presenta una apariencia de madurez precoz. La mejor práctica para evitar deficiencias de potasio es aplicar el fertilizante al suelo. Sólo pequeñas cantidades de potasio pueden ser suministradas por la fertilización foliar, que debe ser hecha solamente en una emergencia (Reddy *et al.*, 2000).

En el trabajo realizado por Bednarz *et al.* (1998) el algodón sembrado en materas con arena y manejado con solución nutritiva, mostró que después de retirado el potasio de la solución, a partir de los 14 días de edad, se presentó una disminución progresiva de la tasa neta de fotosíntesis, a medida que la deficiencia de potasio se desarrollo. Esto sería consecuencia del aumento de la resistencia estomática y de la fotorrespiración.

Zhao *et al.* (2001) encontraron que la deficiencia de potasio en el algodón, cultivado en solución nutritiva, a partir del inicio de la fase de formación de los botones florales, la tasa de fotosíntesis neta y el área foliar disminuyeron. La disminución de la fotosíntesis se asocio más al bajo contenido de clorofila, a una pobre ultraestructura de los cloroplastos y a la restringida translocación de fotoasimilados de la hoja, dada la menor conductancia estomática en las hojas de las plantas deficientes de potasio. La acumulación de sacarosa en las hojas de las plantas deficientes en este elemento puede estar asociada con la reducida participación de la sacarosa en el conjunto de sustancias transportadas, o con el decrecimiento en el cargue del floema. La acumulación de materia seca y la distribución de fotoasimilados también fueron afectadas.

La deficiencia de K en algodón, en suelos con alto contenido de K, ha sido relacionada con: a) uso de variedades altamente productivas, de rápida maduración, con menor capacidad de almacenar K antes de la floración; b) disminución de la actividad radical durante la fructificación; c) cambios en las prácticas culturales en el cultivo (aumento en el uso de N y reguladores de crecimiento); d) baja cantidad de K relacionado con la fijación en el suelo; e) estrés hídrico (Cassman *et al.,* 1989; Chang y Oosterhuis, 1995, Coker y Oosterhuis, 1999).

Pettigrew y Meredith Jr. (1997) compararon el efecto de la fertilización potásica (0 y 112 kg ha^{-1} de K) en forma edáfica y encontraron en algodón sometido a la deficiencia de potasio, en evaluaciones realizadas durante la época del corte fisiológico ("cut out"), una reducción del índice de área foliar, del número de total de nudos y de la altura, y un aumento del peso específico foliar y del índice de cosecha.

1.7. FERTILIZACIÓN POTÁSICA DEL ALGODÓN

Thompson (1999) reporta que la fertilización con potasio puede ser realizada en pre-siembra o en suelos con Capacidad de Intercambio Catiónico (CIC) entre 6 a 8 meq 100 g^{-1} de suelo seco, en el otoño después de cosecha, pues así no habrá pérdidas de potasio por lixiviación. En suelos extremamente arenosos, con CIC igual a 2 o menor, la fertilización potásica en el surco ayuda a evitar pérdidas del elemento por lixiviación.

El método sugerido en los EUA para corregir la deficiencia de potasio, presentada tardíamente en el ciclo del algodón, es fertilizar con potasio en el surco y a gran profundidad (Mullins *et al.,* 1994; 1997).

En los EUA, para la deficiencia de potasio temprana, la fertilización potásica se realiza en la superficie del suelo o semi-incorporada, siendo común fertilizar en otoño, o inmediatamente antes de la siembra, con cantidades entre 0 y 90 $kg \cdot ha^{-1}$ de K. También, se reporta que el algodón puede responder a la fertilización profunda de potasio (entre 15 y 30 cm), pero los resultados en la productividad aun son inconsistentes. Suelos con una alta respuesta a la fertilización profunda de potasio normalmente poseen subsuelos con bajos o muy bajos contenidos de potasio (Oosterhuis, 2001).

El desarrollo radical fue mejorado por la subsolación del surco y por la fertilización potásica, en profundidades mayores a 20 cm; en contraste, la ubicación del potasio en profundidades no difirió de la posición en la superficie del suelo (Mullins *et al.,* 1994). La adición de potasio (84 $kg \cdot ha^{-1}$) al suelo promovió el aumento en la productividad, independiente del método utilizado en la aplicación (en profundidad o en la superficie) (Mullins *et al.,* 1997).

La fertilización del suelo con, hasta, 783 $kg \cdot ha^{-1}$ de K_2O, no eliminó los síntomas de deficiencia foliar en campos severamente afectados (Kafkafi, 1992). La razón para que el potasio sea absorbido es dependiente de la longitud de la raíz, densidad y superficie.

Pettigrew *et al.* (1996) evaluaron ocho genotipos de algodón, en un suelo pobre en potasio y usando 112 $kg \cdot ha^{-1}$ del elemento, en pre-siembra, encontraron aumento en la producción y rendimiento de fibra, peso de cápsula y semilla. Sobre la calidad de la fibra reportaron incremento en la madurez, micronaire, diámetro, razón de la uniformidad de la longitud y de la longitud de 50% de fibras ("span" 50%). En otro estudio, con la misma cantidad de potasio, en suelo pobre en este elemento y con dos variedades de algodón ("DES 119" y "Stoneville 825"), Minton y Ebelhar (1991) no encontraron alteración en la producción, rendimiento de fibra, índice micronaire, elongación y longitud de fibra ("span" 2,5% y 50%), pero se aumentó el peso de las semillas y la resistencia de las fibras.

Howard *et al.* (2001) estudiaron la fertilización potásica en pre-siembra y encontraron que, en el sistema de siembra convencional y en suelos con bajo contenido original de potasio, la producción de algodón se incrementó por la aplicación de 168 $kg \cdot ha^{-1}$ de K_2O, pero en siembra directa sólo hubo respuesta con el uso de 202 $kg \cdot ha^{-1}$ de K_2O. En suelos con alto contenido de potasio, el uso de 101 $kg \cdot ha^{-1}$ de K_2O incrementó la producción en el sistema de siembra directa. Sin embargo, la recomendación de fertilización en los Estados Unidos, para suelos con bajo contenido de potasio es de 134 $kg \cdot ha^{-1}$ de K_2O y para los de alto contenido, de 68 $kg \cdot ha^{-1}$ de K_2O.

De acuerdo con Gwathmey y Howard (1998) en algodón la utilización de 112 $kg \cdot ha^{-1}$ K en forma edáfica aumenta, por planta, la interceptación de la radiación fotosintéticamente activa. El uso de potasio vía foliar (4 aplicaciones de 4,1 $kg \cdot ha^{-1}$), no produjo cambio en la interceptación luminosa en el primer año de estudio (año de clima seco), pero en un segundo año, hubo aumento de la interceptación de la radiación luminosa, solamente, cuando se aplicó conjuntamente el potasio al suelo. Tanto en el primero como en el segundo año, ningún tratamiento con aplicación de potasio, vía edáfica o foliar, modificó la precocidad en la producción de fibras; sin embargo, la adición de potasio al suelo disminuyó el porcentaje en la primera cosecha; este porcentaje fue negativo con la interceptación luminosa por la parte aérea del algodón, lo cual sugiere que la alta fertilidad de potasio atrasa la madurez, en la medida en que promueve una mayor interceptación de luz por la parte superior del dosel del algodón.

Gormus y Yucel (2002) encontraron que la aplicación de potasio en forma edáfica (150 $kg \cdot ha^{-1}$ K_2O) promueve la disminución del número de días a la apertura de la primera cápsula (mayor precocidad), al compararla con la parcela sin aplicación de potasio, se alteró en la fibra la longitud (0,3 mm mayor), resistencia (0,5 g tex^{-1} mayor), uniformidad (0,1% menor) e índice micronaire (0,1 menor). Estos resultados concuerdan con los obtenidos por Usherwood (2000) citado por Gormus y Yucel (2002) y Cassman *et al.* (1990), pero están en desacuerdo con los trabajos de Minton y Ebelhar (1991) y Pettigrew *et al.* (1996).

El uso de dosis adecuadas de K_2O en la fertilización del algodón aumenta el número de cápsulas con mayor diámetro, el peso de las cápsulas y de 100 semillas y reduce el número

de cápsulas atacadas por plagas y enfermedades, con aumento en la productividad (Staut, 1996, citados por Staut y Kurihara, 2001).

Silva *et al.* (1974) encontraron que la fertilización potásica (hasta 150 $kg \cdot ha^{-1}$) promueve la disminución de la precocidad de la cosecha del algodón, pero las características productivas (peso de una cápsula, peso de 100 semillas y rendimiento de fibra) y las características de calidad de la fibra (longitud, micronaire y resistencia) no se alteraron.

Según Silva (1998), el efecto de la fertilización potásica, en algodón, es menor en suelos no encalados. Una gran dosis de yeso puede provocar la lixiviación del potasio y del magnesio, con disminución de la producción del algodón. En suelos con baja CIC y pobres en potasio, este debe aplicarse antes del yeso.

En el trabajo de Sabino *et al.* (1999), el potasio aplicado en pre-siembra (hasta 400 kg ha^{-1} de K_2O), en suelo deficiente en potasio (0,8 mmolc dm^3 de K) contribuyó significativamente a aumentar el peso de cápsulas y de 100 semillas, sin alterar el porcentaje de fibras del algodón. En relación con la calidad de la fibra, el potasio favoreció los valores de uniformidad de la longitud, madurez e índice micronaire y disminuyó la resistencia de la fibra. En suelos con contenido suficiente de potasio (2,5 mmolc dm^3 de K), la fertilización potásica, solamente, fue significativa al aumentar el peso de la cápsula. Se evidenció, además, que la pérdida de las hojas del algodón por la deficiencia de potasio, impidió la formación adecuada de frutos. Según Cassman *et al.* (1990), el genotipo no fue un factor significativo para la determinación de la longitud de la fibra en las variedades "Acala", pero la adición de 480 $kg \cdot ha^{-1}$ de potasio promovió el aumento de la longitud media en las dos variedades "Acala" ("SJ-2" e "GC-510"), cuando la interacción de potasio con el genotipo fue significativa.

Silva (1999), después de estudios de calibración, demostró que la relación de bases del suelo ($Ca^{+2}+Mg^{+2}/K^{+}$) es más eficiente en la definición de las necesidades del algodón; que el solo contenido de potasio en el suelo, y que la mayor disminución en la producción de algodón sucede cuando los valores de la relación $Ca^{+2}+Mg^{+2}/K^{+}$ son mayores a 20. Silva (1998) encontró que la mayor respuesta a la fertilización potásica se obtuvo cuando la relación es igual a 36 y menor cuando es igual a 10. Según Staut y Kurihara (2001) la

relación $(Ca^{+2}+Mg^{+2})/K^{+}$ deseada debe estar entre 17 y 35, pues, debajo de 17 se presentaría, probablemente, deficiencia de calcio y magnesio, y si estuviese por encima de 35, habría respuesta a la fertilización potásica sin tener contenidos adecuados de los otros nutrientes.

1.8. LITERATURA CITADA

ALBERS, D. W., HEFNER, S., KLOBE, D. (1993). Fertility management of cotton. Columbia: University of Missouri: University Extension. (Agricultural publication, G4256).

ARMSTRONG, D. L. (Ed.). Potassium for agriculture. (1998). **Better Crops with Plant Food**, 82: 3.

AZCON-BIETO, J., TALON, M. (2000). Fundamentos de fisiología vegetal. McGraw-Hill/Iberoamericana de España. Madrid. 522 p.

BARBOSA, M. Z., NOGUEIRA JÚNIOR, S. (2001). Aspectos quali-quantitativos do consumo recente de algodão no Brasil. **Informações Econômicas.** 31 (4): 37-39.

BARRAGÁN, E., DIAZ, A., NORATO., CAICEDO, A., MONTENEGRO, O., MENDOZA, L. A. (2005). El algodonero: manejo integrado del cultivo en el Valle Calido del alto Magdalena. Modulo 2 del tutorial: El algodonero manejo integrado del cultivo en Colombia. 143p.

BEDNARZ, C. W., OOSTERHUIS, D. M. (1996). Partitioning of potassium in the cotton plant during development of a potassium deficiency. **Journal of Plant Nutrition**. 19 (12): 1629-1638.

BEDNARZ, C. W., OOSTERHUIS, D. M., EVANS, R. D. (1998). Leaf photosynthesis and carbon isotope discrimination of cotton in response to potassium deficiency. **Environmental and Experimental Botany**. 39 (2): 131-139.

BEDNARZ, C. W., HOPPER, N. W., HICKEY, M. G. (1999). Effects of foliar fertilization of Texas southern high plains cotton: leaf phosphorus, potassium, zinc, iron, manganese, boron, calcium, and yield distribution. **Journal of Plant Nutrition**. 22 (6): 863-875.

BENNETT, O. L., ROUSE, R., ASHLEY, D. A., DOSS, B. D. (1965). Yield, fiber quality and potassium content of irrigated cotton plants as affected by rates of potassium. **Agronomy Journal**. 57: 296-299.

BOLAN, N. S., NAIDU, R., SYERS, J. K., TILLMAN, R. W. (1999). Surface charge and solute interactions in soils. **Advances in Agronomy.** 67 (2): 87-140.

BOLONHEZI, D., ATHAYDE, M. L. F., SABINO, N. P., KONDO, J. I., FUZATTO, M. G.; BOLONHEZI, A. C., BORTOLETTO, N., CASTRO, J. L. (1999). Efeito da época de semeadura sobre as características tecnológicas das fibras de três variedades de algodoeiro. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ALGODÃO, 2, Ribeirão Preto. **Anais**. Campina Grande: Embrapa-CNPA. **Anais**. pp. 709-712.

BRADOW, J. M., DAVIDONIS, G. H. (2000). Quantitation of fiber quality and the cotton production-processing interface: a physiologist´s perspective. **Journal of Cotton Science**. 4: 34-64.

BROUDER, S. M., CASSMAN, K. G. (1994). Cotton root and shoot response to localized supply of nitrate, phosphate and potassium: split-pot studies with nutrient solution and vermiculitic soil. **Plant and Soil**. 161: 179-193.

BROUDER, S. M., CASSMAN, K. G. (1990). Root development of two cotton cultivars in relation to potassium uptake and plant growth in a vermiculitic soil. **Field Crops Research**, 23: 187-203.

CAKMAK, I. (2005). The role of potassium in alleviating detrimental effects of abiotic stresses in plants. **J. Plant Nutrit. Soil**. Sci. 168: 521-530

CASSMAN, K. G. Cotton. In: BENNETT, W. F. (Ed). (1993). Saint Paul: APS Press. **Nutrient deficiencies & toxicities in crop plants**. 10: 111-119.

CASSMAN, K. G., KERBY, T. A., ROBERTS, B. A., BRYANT, D. C., BROUDER, S. M. (1989). Differential response o two cotton cultivars to fertilizer and soil potassium. **Agronomy Journal.** 81: 870-876.

CASSMAN, K. G., KERBY, T. A., ROBERTS, B. A., BRYANT, D. C., HIGASHI, S. L. (1990). Potassium nutrition effects on lint yield and fiber quality of Acala cotton. **Crop Science**. 30: 672-677.

CHANG, M. A., OOSTERHUIS, D. M. (1995). Cotton response to foliar application of potassium compounds at different pH levels. **Better Crops with Plant Food.** 2: 20-22.

CHIAVEGATO, E. J., FUZATTO, M. G., ABRAHÃO, J. T. M., KONDO, J. I. (1999). Efeito do ambiente e de cultivares em componentes da produção e características tecnológicas da fibra e do fio de algodão. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ALGODÃO, 2, Ribeirão Preto. Campina Grande: Embrapa-CNPA. **Anais.** 578-581.

CLELAND, R. E. (1987). The mechanic of wall loosening and wall extension. In: Physiology of cell expansion during plant growth. The Amer. Soc. of Plant Phys. Rockville MD. pp. 18–27.

COKER, D. L., OOSTERHUIS, D. M. (1999). Water deficit and potassium partitioning in cotton. In: COTTON RESEARCH MEETING, 1999. **Proceedings**… Fayetteville: Arkansas Agricultural Experiment Station, 97-102. (Special Report, n. 193).

CUIN, T. A., MILLER, A. J., LAURIE, S.A. AND LEIGH, R. A. (2003). Potassium activities in cell compartments of salt-grown barley leaves. J. Exp. Bot. 54: 657-661

DHINDSA, R. S., BEASLEY, C. A., TING, I. P. (1975). Osmoregulation in cotton fiber: Accumulation of potassium and malate during growth. **Plant Physiol.** 56 (3): 394-398.

DONG, H. Z., LI. W. J., TANG, W., ZHANG, D. M. (2005). Research progress in physiological premature senescence in cotton. **Cotton Science**. 17: 56-60.

EVANS, H., WILDES, R. (1971). Potassium and its role in enzyme activation. *In*: Potassium in Biochemistry and physiology. 8º Colloquium of the international Potash institute. International Potash Institute, Bern. 13-39.

FAGERIA, N. K., BALIGAR, V. C., JONES, C. A. (1997). Cotton. In: Growth and mineral nutrition of field crops. 2. ed. New York: Marcel Dekker Inc., 17: 561-582.

FIBRATOLIMA, (2005). Conferencia sobre calidad de la fibra. Cadena Algodón-Textil-Confecciones. Trabajo presentado en reunión cadena algodón-textil confecciones, Junio, Ibagué.

GAO, P., ZHAO, P.H., WANG, J., WANG, H. Y., WU. X-M., XIA, G-X. (2007). Identification of genes preferentially expressed in cotton fibers: A possible role of calcium signaling in cotton fiber elongation. **Plant Science**. 173: 61-69.

GORMUS, O., YUCEL, C. (2002). Different planting date and potassium fertility effects on cotton yield and fiber properties in the Çukurova region, Turkey. **Field Crops Research.** 78 (2-3): 141-149.

GRASSI, F. H. (2000). Nutrição mineral de plantas. Botucatu. (Apostila da disciplina Nutrição Mineral das Plantas do Curso de Pós-Graduação em Agronomia/UNESP/Botucatu-SP).

GWATHMEY, C. O., HOWARD, D. D. (1998). Potassium effects on canopy light interception and earliness of no-tillage cotton. **Agronomy Journal**. 90 (2): 144-149.

HARRIS, G. (2001). Deficiência de potássio em algodoeiro relacionada à mancha foliar. **Informações Agronômicas.** 96: 1-2.

HODGES, S. C. (2002). Fertilization. In: NORTH CAROLINA STATE UNIVERSITY. **Cotton production guide**. North Carolina, 2002. cap 7.

HOWARD, D. D., ESSINGTON, M. E., HAYES, R. M., PERCELL, W. M. (2001). Potassium fertilization of conventional- and no-till cotton. **Journal of Cotton Science**. 5: 197-205.

HOWARD, D. D., GWATHMEY, C. O., SAMS, C. E. (1998). Foliar feeding of cotton: evaluating potassium sources, potassium solution buffering, and boron. **Agronomy Journal.** 90 (6): 740-746.

HUBER, S. C. (1983). Role of sucrose phosphate synthase in partitioning of carbon in leaves. **Plant Physiol.** 71: 818-821.

KAFKAFI, U. (1992). Foliar feeding of potassium nitrate in cotton. **Better Crops with Plant Food.** 76: 16-17.

KARLEY, A. J., LEIGH, R. A. AND SANDERS. D. (2000). Differential ion accumulation and ion fluxes in the mesophyll and epidermis of barley. **Plant Physiol**. 122: 835-844

KERBY, T. A., ADAMS, F. (1985). Potassium nutrition of cotton. In: MUNSON, R. D. (Ed.). Potassium in agriculture. Madison: American Society of Agronomy, 1985. 36: 843-860.

KIM, H. J., TRIPLETT, B. A. (2001). Cotton fiber growth in plant and in vitro. Models for plant cell elongation and cell wall biogenesis. **Plant Physiol.** 127: 1361-1366.

MacROBBIE, E. A. C. (1998). Signal transduction and ion channels in guards cell. Phil. Trans. Royal. London Series B. 353: 1475-1488

MALAVOLTA, E., VITTI, G. C., OLIVEIRA, S. A. (1989). Avaliação do estado nutricional das plantas: princípios e aplicações. Piracicaba: Associação Brasileira para Pesquisa da Potassa e do Fosfato, 201 p.

MARSCHNER, H. (2002). Mineral Nutrition of Higher Plants. Academic Press, Londres. 889 p.

MÄSER, P., THOMINE, S., SCHROEDER, J. I., WARD, J. M., HIRSCHI, K., SZE, H., TALKE. I. N., AMTMMANN, A., MAATHUIS, F. J. M., SANDERS, D., HARPER, J. F., TCHIEU, J., GRISBKOV, M., PERSANS, M. W., SALT, D. E., KIM, S.A. AND GUERINOT, M. L. (2001). Phylogenetic relationships within cation transporter families of Arabidopsis. **Plant Physiol**. 126: 1646-1667

MENDES, H. C. (1960). Nutrição do algodoeiro. II - Absorção mineral por plantas cultivadas em soluções nutritivas. Campinas, **Bragantia.** 19 (28): 435-458.

MINTON, E. B., EBELHAR, M. W. (1991). Potassium and aldicarb-disulfoton effects on verticillium wilt, yield, and quality of cotton. **Crop Science.** 31: 209-212.

MULLINS, G. L., BURMESTER, C. H., REEVES, D. W. (1997). Cotton response to in row subsoiling and potassium fertilizer placement in Alabama. **Soil and Tillage Research.** 40 (3-4): 145-154.

MULLINS, G. L., REEVES, D. W., BURMESTER, C. H., BRYANT, H. H. (1994). In-row subsoiling and potassium placement effects on root growth and potassium content of cotton. **Agronomy Journal.** 86: 136-139.

ÖBORN, I., ANDRIST-RANGEL, Y., ASKEGAARD, M., GRANT, C. A., WATSON, C. A. AND EDWARDS, A. C. (2005). Critical aspects of potassium management in agricultural systems. Soil Use Manag 21: 102-112.

OLIVEIRA, R. H., ROSOLEM, C. A. AND TRIGUEIRO, R. M. (2004). Importance of mass flow and diffusion on the potassium supply to cotton plants as affected by soil water and potassium. **Revista Brasileira de ciencia do solo**. 28: 439-445

OOSTERHUIS, D. M. (1999). Growth and development of a cotton plant. In: CIA, E.; FREIRE, E. C.; SANTOS, W. J. dos (Eds). **Cultura do algodoeiro**. Piracicaba: Potafós, pp. 35-55.

OOSTERHUIS, D. M. (2001). Physiology and nutrition of high yielding cotton in the USA. **Informações Agronômicas.** 95: 18-24. (Encarte Técnico).

OOSTERHUIS, D. M., WULLSCHLEGER, S. D., MAPLES, R. L., MILEY, W. N. (1990). Foliar-feeding of potassium nitrate in cotton. **Better Crops with Plant Food**. 74 (3): 8-9.

PETTIGREW, W. T., HEITHOLD, J. J., MEREDITH JR., W.R. (1996). Genotypic interactions with potassium and nitrogen in cotton of varied maturity. **Agronomy Journal.** 88: 89-93.

PETTIGREW, W. T., MEREDITH JR., W. R. (1997). Dry matter production, nutrient uptake, and growth of cotton as affected by potassium fertilization. **Journal of Plant Nutrition.** 20 (4-5): 531-548.

PETTIGREW, W. T., MEREDITH JR. W. R. (1992). Potassium fertilization influences cotton dry matter and yield. **Better Crops with Plant Food.** 76: 22-23.

PETTIGREW, W.T. (2003). Relationships between insufficient potassium and crop maturity in cotton. Agron. J. 95: 1323–1329.

POTAFÓS. (1998). Manual internacional de fertilidade do solo. 2. ed. Piracicaba, Associação Brasileira para Pesquisa da Potassa e do Fosfato, 177.

REDDY, K. R., HODGES, H. F., VARCO, J. (2000). Potassium nutrition of cotton. Mississippi: Mississippi Agricultural and Forestry Experiment Station, 10p. (Bulletin, n. 1094).

ROELFSEMA, M. R. G., AND HEDRICH. R. (2002). Studying guard cells in the intact plant: modulation of stomatal movement by apoplastic factors. **New. Phytol**. 153: 425-431.

ROSOLEM, C. A. (2001). Problemas em nutrição mineral, calagem e adubação do algodoeiro. **Informações Agronômicas**, Piracicaba, 95: 10-17. (Encarte Técnico).

ROSOLEM, C. A., BASTOS, G. B. (1997). Deficiências minerais no cultivar de algodão IAC 22. Campinas. Bragantia. 2 (56): 377-387.

ROSOLEM, C. A., MIKKELSEN, D. S. (1991). Potassium absorption and partitioning in cotton as affected by periods of potassium deficiency. **Journal of Plant Nutrition**, Athens, 14 (9): 1001-1016.

ROSOLEM, C. A., WHITAKER, J. P. T., VANZOLINI, S., RAMOS, V. J. (1999). The significance of root growth on cotton nutrition in acidic low-P soil. **Plant and Soil**. 212 (2): 183-188.

ROSOLEM, C. A., MATEUS, G. P., GODOY, L. J. G.,FELTRAN, J. C., AND BRANCALIA, S. R. (2003). Root morphology and potassium supply to pearl millet roots as affected by soil water and potassium contents. **Revista Brasileira de ciencia do solo**. 27: 875-884

SABINO, N. P., SILVA, N. M. da., KONDO, J. I. (1999). Componentes da produção e qualidade da fibra do algodoeiro em função do potássio e gesso. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ALGODÃO, 2, 1999, Ribeirão Preto.. Campina Grande: Embrapa-CNPA. **Anais** 703-705.

SEAGULL, R. W., OLIVERI, V., MURPHY, K., BINDER, A., KOTHARI, S. (2000). Cotton fiber growth and development 2: Changes in cell diameter and wall birefringence. **Journal of Cotton Science**, 4: 97-104.

SILVA, N. M. da. (1998). Nutrição mineral e adubação de algodoeiro no Brasil. **Informações Agronômicas.** 81: 7.

SILVA, N. M. da. (1999). Nutrição mineral e adubação de algodoeiro no Brasil. In: CIA, E.; FREIRE, E. C.; SANTOS, W. J. Dos (Eds). **Cultura do algodoeiro**. Piracicaba: Potafós, 57-92.

SILVA, N. M. da., CARVALHO, L. H., CIA, E., FUZZATTO, M. G., CHIAVEGATO, E. J., ALLEONI, L. R. F. (1995). Seja doutor do seu algodoeiro. **Informações Agronômicas**, Piracicaba, 69. Encarte, Arquivo do Agrônomo n. 8.

SILVA, N. M. da., FERRAZ, C. A. M., GRIDI-PAPP, I. L., CIA, E. (1974). Efeitos da aplicação de N e de K sobre características gerais do algodoeiro cultivado em latossolos não deficientes em potássio. Campinas. **Bragantia.** 33 (13): 129-138.

SILVA, N. M. da., KONDO, J. I., SABINO, N. P. (1994). Importância da adubação na qualidade do algodão e outras plantas fibrosas. In: EUSTÁQUIO, M de S.; BUZZETI, S. (Coord.). **Importância da adubação na qualidade de produtos agrícolas**. São Paulo: Ícone, pp. 189-215.

SNYDER, C. S. (1997). Adubação da cultura do algodoeiro nos Estados Unidos. **Informações Agronômicas.** 79.

STAUT, L. A., KURIHARA, C. H. (2001). Calagem e adubação. In: Embrapa Agropecuária Oeste. Algodão: tecnologia de produção. Dourados: Embrapa, Algodão e Embrapa Agropecuária Oeste, 103-123.

STEWART, W. M. (2000). Fertilize cotton for optimum yield and quality. News & Views: a regional newsletter of Potash & Phosphate Institute, Norcross, 2000 (Beltwide Edition).

TAYLOR, H. M., KLEPPER, B. (1978). The role of rooting characteristics in supply of water to plants. **Advances in Agronomy**. 30: 99-128.

THOMPSON, W. R. (1999). Fertilization of cotton for yields and quality. In: CIA, E.; FREIRE, E. C.; SANTOS, W. J. dos (Eds). **Cultura do algodoeiro.** 93-99.

VARCO, J. J. (2000). No-tillage cotton responds to potassium fertilization on high CEC soils. **Better Crops with Plant Food.** 84 (4): 21-23

YAMADA, T. (1996). La nutrición mineral y la resistencia de las plantas a las enfermedades. Informaciones Agronómicas. Instituto de la potasa y el fósforo. 23: 7–10.

YAMADA, T. (2002). Melhoria na eficiência da adubação aproveitando as interações entre os nutrientes. **Informações Agronômicas**, Piracicaba. 00: 1-5. Encarte Técnico.

ZHAO, D., OOSTERHUIS, D. M. (1998). Influence of shade on mineral nutrient status of field-grown cotton. **Journal of Plant Nutrition.** 21 (8): 1681-1695.

ZHAO, D., OOSTERHUIS, D. M. (1999). Dynamics of mineral nutrient element concentration in developing cotton leaves, bracts and floral buds in relation to position in the canopy. **Journal of Plant Nutrition.** 22 (7): 1107-1122.

ZHAO, D., OOSTERHUIS, D. M., BEDNARZ, C.W. (2001). Influence of potassium deficiency on photosynthesis, chlorophyll content, and chloroplast ultrastructure of cotton plants. **Photosynthetica.** 39 (1): 103-109.

CAPÍTULO 2. EFECTO DEL POTASIO EN EL CRECIMIENTO, DISTRIBUCIÓN DE BIOMASA, TASA DE FOTOSÍNTESIS Y CALIDAD DE FIBRA DE ALGODÓN (*Gossypium hirsutum* L.)

2.1. RESUMEN

El potasio es uno de los nutrientes minerales cuya deficiencia en algodón afecta el crecimiento, desarrollo, rendimiento en algodón-fibra y calidad de fibra; comparado con otros cultivos comerciales aparece como el más susceptible a la disponibilidad de potasio, mostrando síntomas tempranos de deficiencia sobre el límite disponible de potasio en el suelo, condiciones encontradas en las zonas productoras de Colombia y el cerrado Brasilero. El objetivo fue determinar el efecto de dosis basales de potasio sobre la fotosíntesis, crecimiento, distribución de biomasa, calidad de la fibra y actividad de la sacarosa sintetasa y sacarosa fosfato sintetasa en el cultivo de algodón. El diseño utilizado fue bloques completos al azar con cuatro repeticiones y la variedad utilizada fue FMX-966, evaluada con cinco dosis de potasio 0, 30, 60, 120 y 240 mg kg^{-1} en la Universidad Estadual Paulista, Botucatu, Brasil. Se encontró que la deficiencia de potasio afecta las variables de crecimiento, desarrollo, distribución y fracción porcentual de biomasa; la fotosíntesis disminuyó por menor área foliar, menor conductancia estomática, menor contenido de clorofila y mayor peso específico foliar. El contenido de clorofila estuvo altamente correlacionada (R^2 0,99) con la fotosíntesis. La conductancia estomática estuvo directamente relacionada con la fotosíntesis y dosis de potasio. La concentración interna de CO_2 se correlacionó con fotosíntesis para las dosis de potasio y fue menor bajo deficiencia de K por baja conductancia estomática y no estomática. En calidad de fibra la deficiencia de potasio afectó micronaire y longitud; para uniformidad, elongación e índice de fibra corta se encontró diferencia estadística respecto de la deficiencia por potasio. El contenido de celulosa fue menor para la deficiencia de potasio. Además, se encontró que, bajas dosis de potasio restringen la síntesis de celulosa y reduce la actividad de SS y SFS involucradas

en el metabolismo de sacarosa, los resultados indican que con dosis de potasio mayor o igual a 60 mg kg^{-1} hay mayor actividad de SS y que para SFS la dosis óptima fue 60 mg kg^{-1}, con mejoramiento en la calidad de fibra.

Palabras clave: Área foliar, deficiencia de potasio, peso foliar específico (PFE), sacarosa sintetasa (SS), (SFS) sacarosa fosfato sintetasa.

Abreviaturas: (A) tasa de fotosíntesis, (MS) Materia seca.

2.2. INTRODUCCIÓN

Durante los últimos años la deficiencia de potasio en los suelos algodoneros de Brasil y Colombia ha aumentando su expresión. Entre los factores que contribuyen a la deficiencia de potasio en la etapa media de los nuevos materiales de algodón, están entre otros, que estos se caracterizan por rápida fructificación, alto número de cápsulas, alto rendimiento en algodón-fibra, y por presentar reducción en el crecimiento radical y en la toma de iones durante la etapa reproductiva (Oosterhuis, 1994). El algodón comparado con otros cultivos comerciales aparece como el más susceptible a la disponibilidad de potasio y muestra muy temprano síntomas de deficiencia sobre el límite disponible de potasio en el suelo (Cope, 1981; Cassman *et al.,* 1989). Varios estudios han reportado que la deficiencia de potasio afecta negativamente la fotosíntesis (Bednarz *et al.,* 1998; Zhao *et al.,* 2001), el área foliar (Zhao *et al.,* 2001; Pettigrew, 2003), la producción de biomasa (Zhao *et al.,* 2001), el rendimiento de algodón-fibra (Pettigrew, 2003) y la calidad de fibra (Pettigrew *et al.,* 1996).

Pettigrew y Meredith (1992) encontraron que plantas deficientes en potasio disminuyeron 18% el índice de área foliar, aumentaron 16% el peso específico foliar y redujeron en 7% el índice micronaire de la fibra, sin alteración del perímetro. Además, la deficiencia de potasio genera una menor deposición de celulosa en la pared secundaria de la fibra, disminuyendo el micronaire y la madurez.

Zhao *et al.* (2001) reportaron que la tasa de fotosíntesis neta (Pn), en algodón, disminuyó en hojas con deficiencia de potasio y, este comportamiento está asociado, principalmente, con una drástica disminución en el contenido de clorofila, pobre ultraestructura del cloroplasto

y alta restricción en la translocación de sacarosa, que limita la conductancia estomática en hojas deficientes de potasio. Bajos contenidos de K disminuyeron la actividad de la reacción de Hill (Jiang *et al.*, 1996), y la producción de ATP y NADP en cloroplastos de remolacha (Norman y Ulrich, 1973); también, bajos contenidos de K pueden incrementar la resistencia de carboxilación, a través del efecto sobre la reacciones fotoquímicas de la fotosíntesis.

En algodón, el efecto directo de la deficiencia de K, sobre la calidad de la fibra, fue observado para el micronaire con valores por debajo de 3,5, que se expresa en la célula de la fibra, por presentar una pared celular delgada, con pequeñas cantidades de celulosa. Adiciones de K mostraron incremento en los procesos metabólicos relacionados con el aumento en el espesor de la pared celular secundaria (Bradow y Davidonis, 2000). Estudios de nutrición, dirigidos a las propiedades de la fibra de algodón, son algunas veces contradictorios, debido a la interpretación del efecto de la interacción genotipo, clima y suelo (Minton y Ebelhar, 1991; Pettigrew, 2003; Reddy *et al.,* 2004). Adicionalmente, el hábito de crecimiento indeterminado del algodón y la variación en la tasa de desarrollo de los cultivares, puede causar que las propiedades de las fibras varíen en los diferentes estudios (Jones y Wells, 1998).

Durante un mismo día, cápsulas individuales pueden, justamente, iniciar elongación de la fibra, otras comenzar su engrosamiento y otras pueden estar completamente maduras (Davidonis *et al.,* 2004), razón por la cual, las plantas de algodón, producen cápsulas continuamente y éstas requieren una fuerte demanda de nutrientes; cuando hay deficiencia de N y K se afecta el desarrollo de la fibra (Bradow y Davidonis, 2000; Boquet y Moser, 2003). Consecuentemente, es difícil predecir los efectos de la deficiencia de N o K sobre el desarrollo de la fibra y su calidad, ya que se requiere del conocimiento previo del tiempo e intensidad del estrés (Ramey, 1986).

Las fibras se originan durante el desarrollo de la cubierta externa de la semilla, y su formación sucede en tres distintos procesos: elongación, engrosamiento de la pared celular o maduración y secado (Davidonis *et al.*, 2004). La elongación de la fibra comienza en la antesis, con una máxima longitud en aproximadamente 20 – 25 días después de la antesis (DDA) (DeLanghe, 1986). El alto contenido del ion potasio y malato son responsables del

incremento en la presión de turgor para el crecimiento y elongación (Ramey, 1986), y del 50% del potencial osmótico de la fibra (Rimon, 1989). El engrosamiento de la fibra comienza 15 – 20 DDA, y se deposita celulosa para la formación de la pared secundaria hasta cerca de 50 DDA. La celulosa es depositada, durante el proceso de engrosamiento, en ángulos ligeramente diferentes, en forma tal que su papel es conferir resistencia a la fibra (Davidonis *et al.*, 2004). El grado de deposición de la pared secundaria determina la madurez de la fibra. La tercera fase dura, en promedio, 15 días después del engrosamiento. El micronaire es un componente de la madurez y de la finura de la fibra, por lo tanto, células con el mismo ancho pueden tener diferente valor de micronaire (Davidonis *et al.,* 2004). El micronaire tiende a incrementarse cuando es amplio el suministro de carbohidratos de la planta a las cápsulas maduras (Pettigrew, 2001). El micronaire está directamente relacionado con la tasa de fotosíntesis del dosel, que ocurre entre los 15 y 45 días después de floración (Bauer *et al.,* 2000) y por tanto, con el metabolismo de la sacarosa.

Muchas enzimas están involucradas en el metabolismo de la sacarosa y pueden clasificarse dentro de dos tipos, enzima de síntesis de sacarosa como: la sacarosa fosfato sintetasa (SFS, EC 2.4.1.14) y enzimas de degradación de la sacarosa como la sacarosa sintetasa (SS, E.C. 2.4.1.13 e invertasa, E.C. 3.2.1.26). La SS puede degradar y sintetizar sacarosa, pero su función en la fibra de algodón es principalmente de degradación (Ruan y Chourey, 1998; Delmer y Haigler, 2002). Hay dos tipos de SS, una soluble S (SS-S) y otra asociada a membrana M (SS-M); la SS-M son los canales de carbono, desde donde la sacarosa se une directamente a la celulosa sintetasa en la membrana plasmática; durante el desarrollo de la fibra de algodón, cerca de la mitad del total de SS está altamente asociada con la membrana plasmática, con base en esto, Delmer y Amor (1995) propusieron un modelo donde algunas formas de SS están asociadas con el complejo de síntesis de celulosa y sirve como canal directo de carbono para la sacarosa vía el complejo de UDP-glucosa.

La sacarosa sintetasa (SS, E.C. 2.4.1.13) desempeña un papel potencial en la biosíntesis de almidón y celulosa, por el suministro de UDP-glucosa, como precursor y sustrato inmediato respectivamente (Chourey *et al.*, 1991; Chourey y Miller, 1995; Delmer y Amor, 1995). Como fuente inicial de carbono, la sacarosa es degradada por la SS (sacarosa + UDP ↔

UDP-glucosa + fructosa) suministrando UDP-glucosa para la síntesis de celulosa (Delmer y Amor, 1995; Haigler *et al.*, 2001, Chourey y Nelson, 1979; Geingenberger y Stitt, 1991), y la porción de fructosa liberada por la SS es reciclada al metabolismo adicional de la sacarosa que soporta la síntesis de celulosa posterior. Este ciclo en células heterótrofas, como las de la fibra, fue previamente descrito como un 'ciclo inútil' (Geingenberger y Stitt, 1991; Haigler *et al.*, 2001). Por lo tanto, el ciclo de la fructosa es una parte del metabolismo de la sacarosa que soporta y/o regula la síntesis de celulosa bajo estrés (Haigler *et al.*, 2001). Con análisis bioquímicos realizados en fibra de algodón por Amor *et al.* (1995) se ha estudiado la actividad de la SS. La formación de la pared secundaria de la fibra comienza 15 DDA y es caracterizada por la deposición masiva de celulosa, que constituye más del 90% del peso seco de la célula de fibra madura (Basra y Malik, 1984; Delmer y Amor, 1995). Huber (1983) concluyó que, la deficiencia de K disminuye la tasa de exportación de fotoasimilados por estar asociada con la disminución de la actividad de la SFS, enzima clave en la síntesis de sacarosa

Con la información generada, se podrá entender la relación del potasio con el crecimiento del cultivo de algodón, por lo tanto el objetivo de este trabajo fue determinar el efecto de dosis de potasio sobre la tasa de fotosíntesis, crecimiento, distribución de biomasa, calidad de la fibra y la actividad de la sacarosa sintetasa y sacarosa fosfato sintetasa en hojas y fibras de algodón.

2.3. MATERIALES Y MÉTODOS

El experimento se realizó con la variedad de algodón FiberMax-966, bajo condiciones de invernadero, a temperatura promedio de 26°C y humedad relativa del 75%, crecidas hasta que formaran 3 hojas verdaderas y posteriormente, fueron trasladadas a libre exposición en la Facultad de Ciencias Agronómicas, Universidad Estadual Paulista (UNESP), Botucatu, SP, Brasil, con coordenadas geográficas de 22º51' latitud sur y 48º26'42" longitud este y con altitud de 804 msnm, clima según el sistema de clasificación de Wilhelm Köppen, tipo Cwa, la temperatura media del mes más frío es inferior a 18,0°C, y del mes más caliente es superior a 24,1°C, con precipitación mínima mensual superior a 37,7 mm y media anual de 1.358,6 mm.

El suelo utilizado fue un latosol rojo distroférrico típico (EMBRAPA, 1999), con 630 mg kg^{-1} de arena, 40 mg kg^{-1} de limo y 330 mg kg^{-1} de arcilla, con las siguientes características de fertilidad, determinadas según Raij y Quaggio (1983): pH en $CaCl_2$ 0,01 M L^{-1} de 4,1; 18 g dm^{-3} de M.O.; 1 mg dm^{-3} de P_{resina}; 75 mmolc dm^{-3} de H^+ Al; 4 mmolc dm^{-3} de Ca^{2+} ; 1 mmolc dm^{-3} de Mg^{2+} ; 0,1 mmolc dm^{-3} de K^+; 5 mmolc dm^{-3} de suma de bases; CIC a pH 7,0 de 80 mmolc dm^{-3} y 6% de saturación de bases; razón por la cual se encaló para elevar su valor hasta 60%. Después de este período, se realizó la fertilización con N (50 mg dm^{-3}), P (150 mg dm^{-3}) y micronutrientes, con las fuentes de sulfato de amonio y superfosfato simple. Las materas utilizadas contenían 12 kilos de este suelo, preparados con las dosis a evaluar de potasio. Las semillas de la variedad FiberMax-966 fueron pre-germinadas en papel toalla a 28ºC, 100 ml de agua por cada 50 semillas y después de 24 horas fueron sembradas cinco semillas pre germinadas por matera; cuando se definieron las hojas cotiledonales, por matera se seleccionaron las mejores tres plántulas para las respectivas evaluaciones. La emergencia fue evaluada a los 5 días después de la siembra.

Se utilizaron cinco tratamientos de potasio 0, 30, 60, 120 y 240 mg kg^{-1} de suelo, aplicados antes de la siembra en cada matera, como abonamiento único. El tratamiento K=0 correspondio a un suelo que por análisis fisicoquímico no contenia potasio. Como unidad experimental se trabajó con tres plantas, con cuatro repeticiones en un diseño de bloques completos al azar.

Las variables evaluadas por unidad experimental, durante las fases de aparición de la primera flor blanca, máxima floración, fase de elongación de la fibra, fase de engrosamiento y secamiento del tercio inferior de la planta, correspondieron en tiempo cronológico a 56, 68, 76, 97 y 109 días después de emergencia (DDE) y fueron: altura de la planta, número de nudos del tallo principal, área foliar, masa seca de hojas, tallos, frutos y raíz. El área foliar se determinó usando un LICOR-3100 área meter (LICOR Inc. Lincoln, NE, USA). Las partes de las plantas (raíz, tallo, hojas, flores y cápsulas) se secaron en estufa a 65ºC por 72 horas hasta peso constante y luego se pesaron en balanza de precisión. Con los datos de biomasa seca (BS) foliar y área foliar, para cada muestreo se estimó el peso foliar específico como (PFE mg cm^{-2} de hojas), además se determinó la tasa fotosintética (A) tomando la quinta hoja de arriba hacia abajo totalmente expandida con un

analizador de gases infrarrojos (LICOR, Modelo LI-6400-2B, Lincoln, NE, USA) mediante medidas puntuales, fijando la luz a 1500 µmoles fotones cm^{-2} y CO_2 con 390 µmoles por cm^{-2}. En cada uno de los muestreos efectuados a los 59, 68, 76, 97 y 109 días después de emergencia (DDE), se colectó la quinta hoja de arriba hacia abajo o totalmente expandida, inmediatamente se colocó en nitrógeno líquido y luego se conservó a -86°C. De la misma manera las cápsulas colectadas a los 97 DDE, ubicadas en la posición 1, rama simpodial 3 y 4, de abajo hacia arriba del dosel, que coincidía con la etapa de máximo engrosamiento de la fibra fueron colocadas en nitrógeno líquido y posteriormente almacenadas a -86°C hasta su análisis. Los muestreos se realizaron a las 8:00h, 9:00h, 11:00h y 12:00h.

El contenido de clorofila se determinó sobre la quinta hoja de arriba hacia abajo, totalmente expandida, en una planta por unidad experimental, usando un equipo Minolta SPAD-502 chlorophyll meter (Minolta Corp., Osaka, Japón), el valor promedio obtenido resultó de la lectura de seis puntos sobre la hoja. El contenido de potasio foliar se evaluó en la quinta hoja de una planta por unidad experimental, posteriormente se secó a 65ºC por 72 horas y se determinó por absorción atómica en el laboratorio de relación planta-suelo del departamento de producción vegetal y Agricultura de la UNESP, Botucatu. El análisis de calidad de fibra para las variables micronaire, longitud, resistencia, madurez, elongación y SFI (Índice de fibra corta) se realizó por medio de HVI (High Volumen Instrument), en los laboratorios de Diagonal, Colombia.

Para la extracción de SS y SFS las muestras de hojas fueron maceradas con nitrógeno líquido. Igualmente las fibras fueron retiradas de la cápsula con bisturí y maceradas con nitrógeno líquido. Posteriormente, para cada uno de los casos los tejidos fueron homogenizados en la proporción de 0,2 g de muestra en 1,5 ml de solución extractora (Tris-HCl 500 mM pH 7,5 conteniendo EDTA 40 mM y ácido ascórbico 50 mM) y 100 mg de PVPP. El extracto resultante fue centrifugado a 11000*g durante 10 minutos a 4°C. El sobrenadante de 300 µlitros, fue desalinizado en 300 mg de Sephadex G-25 previamente hidratado en la solución extractora y agitado por 1 minuto, se dejó en reposo durante 15 minutos a 4ºC repitiendo la actividad tres veces y posteriormente fue centrifugado a 4000 * g por 5 min a 4ºC. El sobrenandante obtenido fue utilizado para la determinación de la actividad enzimática.

La cuantificación de la proteína total soluble de los extractos enzimáticos fue realizada con kit de Bradford basado en lo descrito por Bradford (1976), utilizando albúmina de suero bovino BSA, como patrón.

La actividad de la SS fue determinada en medio saturante compuesto por 50 µL Tris-HCl 54 mM pH 7,5, conteniendo fructosa 10 mM, UDP-glucosa 10 mM, $MgCl_2$ 15 mM y 50 µL de extracto enzimático. La reacción se inició incubando el extracto enzimático a 33°C durante 45 minutos y ésta se interrumpió con la adición de 200 µL de NaOH 1 M y 10 minutos de calentamiento a 100 ºC para destruir las hexosas no reactivas y hexosas fosfato. La sacarosa formada fue determinada por el método del ácido tiobarbitúrico (TBA), descrito por Percherón (1962) y calculada por la curva estándar medida a 432 nm.

La actividad de la SFS fue determinada de la misma manera, utilizando como medio de actividad HEPES-KOH 50 mM pH 7,5 conteniendo fructosa-6-fosfato 5 mM, UDP-glucosa 10 mM y $MgCl_2$ 15 mM.

Para determinar el efecto de las dosis de potasio sobre el crecimiento, desarrollo, fotosíntesis, distribución de biomasa, contenido de clorofila y contenido de potasio tisular, los datos se analizaron estadísticamente utilizando el ANOVA. Para la comparación de medias de las variables de crecimiento se utilizó el test de Tukey; y para fotosíntesis y calidad de fibra el test de Fisher´s DMS (Diferencias Mínimas Significativas) con un nivel de probabilidad del 0,05 y se realizaron correlaciones.

2.4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

2.4.1. Concentración de K en hoja

La evaluación de la concentración de K se realizó en la quinta hoja, debido a su importancia e implicación en la interceptación de luz, producción de materia seca y porque ésta expresa los efectos ambientales de toma de agua y nutrientes (Perera *et al.*, 1995; Pettigrew, 1999). La Figura 2.1 muestra que la concentración de K foliar presentó tendencia decreciente. Para los tratamientos 0 y 30 mg K por kg de suelo no se encontró diferencias estadísticas, resultado similar a lo reportado| por Read *et al.* (2006) quienes encontraron

que a valores menores a 5 g kg^{-1} MS de K se presenta déficit foliar. Igualmente se muestra que para los tratamientos mayores a 30 mg kg^{-1} se mantiene una tendencia lineal de mayor a menor contenido foliar, lo que significa que en las etapas finales del desarrollo es menor la absorción, por menor disponibilidad de K en el suelo, y por su mayor translocación a los sitios de demanda que son los botones florales y cápsulas que aparecieron en este intervalo de tiempo entre los 59 y 76 DDE, resultados similares a los encontrados por Thompson (1999); Boquet y Breitenbeck (2000), y Rosolem y Mikkelsen, (1991), quienes encontraron que cerca del 65% del K requerido es absorbido del suelo entre el inicio de la floración y la maduración plena del algodón. Kafkafi (1992) y Kerby y Adams (1985) reportan que valores mayores a 5 y menores de 15 g kg^{-1} MS de K no muestran síntomas de deficiencia, comportamiento similar a lo encontrado en este estudio. Estos resultados encontrados, son similares a lo reportado por Bednarz y Oosterhuis (1996), quienes encontraron que el nivel critico foliar se presento entre 6,7 – 9,5 g kg^{-1} de MS, durante la formación de botones florales. Sin embargo, estos resultados difieren de lo reportado por Gopal *et al*. (2001), quienes encontraron que el valor de deficiencia es igual a 20 y el de consumo de lujo de 49 g kg^{-1} MS . De los resultados se deduce que la concentración de K foliar estuvo relacionado con las tasas suministradas y por la etapa de desarrollo de las plantas.

Los síntomas visuales de deficiencia de potasio en las hojas se expresaron en el tratamiento sin potasio a partir de los 40 DDE y fue similar a lo descrito por Cassman (1993) y Silva *et al.* (1995); a partir de los 56 DDE la necrosis intervenal en las hojas fue observada, y varios estados de los síntomas de deficiencia en el dosel de las plantas fue observado.

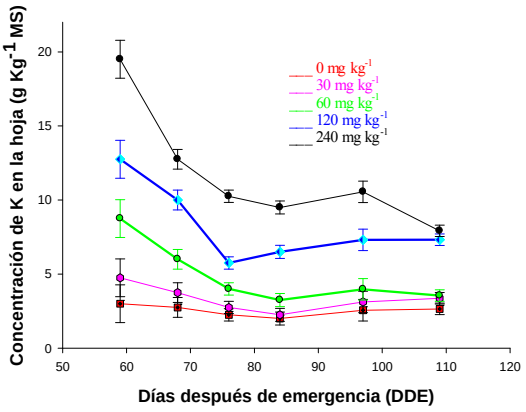


Figura 2.1 Concentración de K en la 5ª hoja de algodón

2.4.2. Concentración de K foliar vs crecimiento del área foliar

El área foliar se relacionó con la concentración de K foliar (Figura 2.2) resultando su comportamiento en una ecuación polinomial cúbica $y = y_0 + ax + bx^2 + cx^3$, donde y es el área foliar y x el contenido de K (g kg^{-1} MS) en la quinta hoja. Cuando la concentración de K inicial estuvo entre 9 y 20 g kg^{-1} MS, estos valores no afectaron el aumento en el área foliar; sin embargo, el punto crítico para que culmine el incremento en área foliar es diferente según el contenido de K; para 60 mg kg^{-1} se alcanzó con 5 g kg^{-1} MS, para 120 mg kg^{-1} con 7 g kg^{-1} MS y para 240 con 10 g kg^{-1} MS, siendo estos valores menores a los encontrados por Reddy y Zhao (2005) quienes reportan que el valor crítico de K foliar para la fotosíntesis, biomasa y crecimiento del tallo es de 12 g kg^{-1} MS y para la expansión del área foliar de 17 g kg^{-1} MS. Los resultados encontrados muestran diferencial para la expansión foliar según dosis de K, como respuesta del material genético.

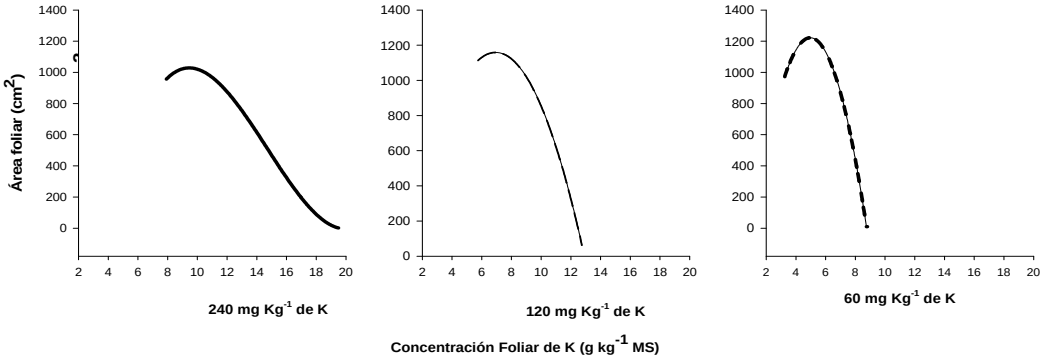


Figura 2.2 Concentración de K foliar vs área foliar

Las ecuaciones fueron polinomial de tercer grado con R^2 = 0,96, 1,00 y 1,00 para 240, 120 y 60 mg kg^{-1} respectivamente

2.4.3. Número de entrenudos y altura de planta

El efecto de potasio sobre el número total de entrenudos (Figura 2.3) muestra que su deficiencia incrementa significativamente el número desde los 76 hasta los 109 DDE respecto a las demás dosis crecientes. Sin embargo, Reddy y Zhao (2005) también

encontraron mayor número de entrenudos en plantas deficientes de potasio respecto a los demás tratamientos, pero sin diferencia estadística.

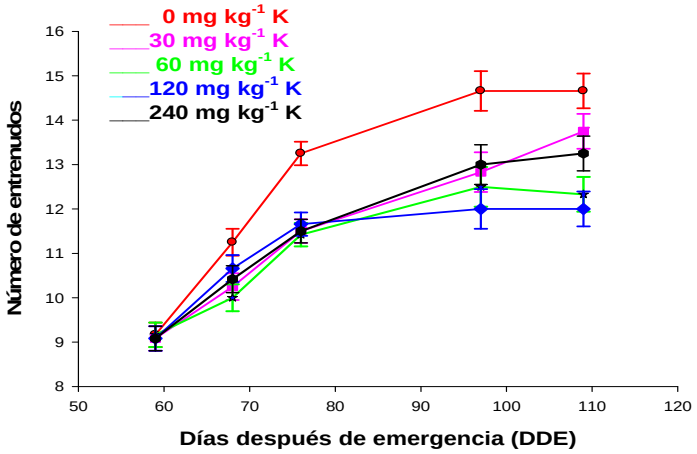


Figura 2.3 Cambio en el número de entrenudos por efecto del potasio

Cambios en la altura de planta durante el crecimiento y desarrollo del algodón mostraron un modelo de crecimiento sigmoidal y= a/(1+exp(-(x-x0)/b)) para todos los tratamientos con R^2 = 0,99, sin presentar diferencia estadística entre los tratamientos a través del ciclo de las plantas de algodón (Figura 2.4), este mismo comportamiento se presentó cuando Reddy y Zhao (2005) trabajaron con dos niveles de concentración de CO_2 y cinco niveles de K. Aunque el número de entrenudos es un componente de la altura de la planta, este no influyó en una mayor altura de las plantas con deficiencia de potasio (Figura 2.3), mostrando que cuando el tallo principal dirige el crecimiento vertical, este no se ve afectado en su altura por el mayor número de entrenudos cuando hay deficiencia de K, dado que cuando se aumenta el suministro de K estos compensan el número de entrenudos por mayor longitud entre los mismos. Se puede deducir que el mayor número de entrenudos por las plantas deficientes en K, se produce según lo reportado por Rosolem y Mikkelsen (1991) por que el tallo es el primer organo en mostrar disminución enel contenido de K, además de acuerdo a Silva *et al*. (1995), plantas deficientes en K, su ciclo de cultivo es mas corto o precoces, por lo tanto alcanza el mayor número de entrenudos en menor tiempo.

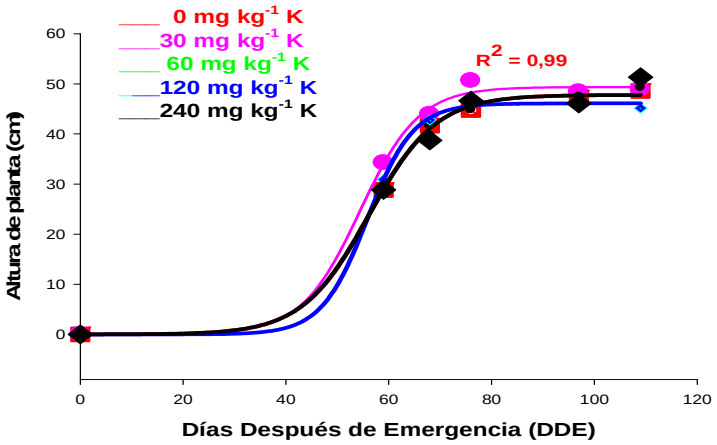


Figura 2.4 Altura de la planta de algodón por efecto de Potasio.
Cada punto es el promedio de 12 plantas

2.4.4. Área foliar, biomasa total y peso específico foliar (PEF)

Según la Figura 2.5 el área foliar hasta los 68 días no difirió estadísticamente para las dosis, pero a partir de los 76 DDE la diferencia respecto a las plantas deficientes de potasio son significativas, especialmente para los tratamientos 60 y 120 mg kg^{-1}, mas no sucedió lo mismo para 240 mg kg^{-1}; sin embargo Zhao *et al.* (2001) encontró comportamiento similar a los resultados encontrados, al reportar que la deficiencia en K, presento disminución en el área foliar.

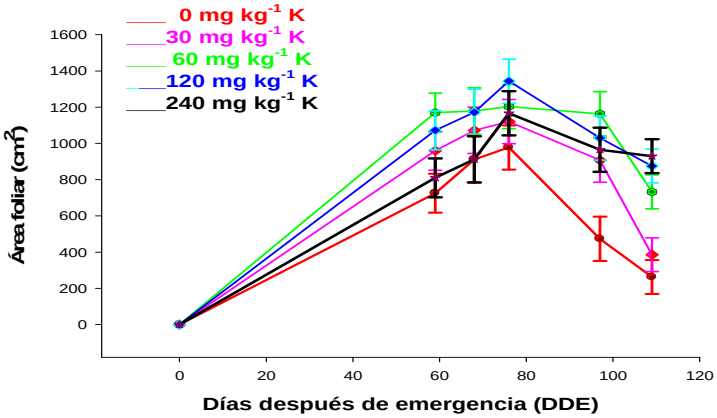


Figura 2.5 Área foliar para algodón según dosis de potasio.
Cada punto promedio de 12 plantas (4 repeticiones)

.

La materia seca total difirió significativamente para los tratamientos, siendo mayor la diferencia para las plantas deficientes en potasio (Figura 2.6), comportamiento similar con lo reportado por Mullins *et al.* (1994) quienes trabajando con fertilización potásica y subsolación al suelo y Cassman *et al.* (1989) reportaron también reducción de materia seca del tallo, cápsula, hojas y de la biomasa total cuando se presenta deficiencia por potasio. También, Zhao *et al*. (2001) y Bednarz *et al*. (1998) reportaron resultados similares, respecto a menor producción de materia seca total para plantas deficientes en potasio.

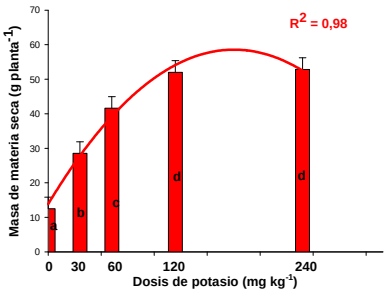


Figura 2.6 Biomasa seca total para algodón según dosis de potasio a 109 DDE

$Y = 13{,}856 + 0{,}5098x - 0{,}0015x^2$. Letras con el mismo valor a nivel de columnas no presentan diferencia significativa.

La deficiencia de potasio afecta la producción de biomasa y también su distribución; analizando sólo el efecto de la deficiencia de potasio, ésta mostró aumento en la materia seca de hojas y tallo, y disminución en cápsulas; expresando mayor fracción de carbono para las estructuras vegetativas que reproductivas, explicando de esta manera la baja participación en el rendimiento por la poca producción de cápsulas y mayor número de nudos. Aunque los tratamientos 120 y 240 mg kg^{-1} presentaron los mayores valores de materia seca total, su fracción para frutos no difirió respecto a 60 mg kg^{-1}, indicando que este punto marca la diferencia en el efecto del potasio en la producción (Tabla 2.1). Para los tratamientos con adición de potasio la mayor fracción correspondió para los frutos, es decir en la productividad. Reddy y Zhao (2005) encontraron que la menor distribución de biomasa por las cápsulas fue debido al incremento en la abscisión por el estrés por déficit de K y contenidos de K foliar de 5–10 g kg^{-1} MS observado en el tratamiento de 0% K, el cual presentó disminución en el crecimiento foliar y fotosíntesis, y alteración en la distribución de biomasa de varios componentes de la planta. Las cápsulas durante su

desarrollo son las mayores demandantes de K, y principalmente sus semillas (Usherwood, 2000), porque el K está involucrado en las relaciones hídricas y translocación de carbohidratos, por lo tanto deficiencias de K desde la etapa vegetativa disminuyen la producción de cápsulas (Kerby y Adams, 1985; Pettigrew y Meredith, 1997).

Tabla 2.1 Efecto del potasio sobre la distribución de biomasa en algodón, a los 109 DDE

Tratamiento K (mg kg^{-1})	Biomasa tisular (g planta^{-1} MS)				Fracción de la Biomasa total (%)			
	Hoja	Tallo	Raíz	Cápsula	Hoja	Tallo	Raíz	Cápsula
0	2,39 a	4,10 a	2,32 a	1,65 a	22,55 b	39,58 c	22,68 ab	15,19 a
30	3,26 ab	7,97 b	5,79 b	8,10 a	13,67 a	30,60 b	24,37 b	31,36 b
60	4,81 bc	9,08 b	6,12 b	15,67 b	13,74 a	25,26 ab	18,05 ab	42,95 bc
120	6,03 cd	10,16 bc	7,31 c	21,62 b	13,64 a	22,54 a	17,70 a	46,12 c
240	6,88 d	13,52 c	8,26 c	15,67 b	15,61 ab	30,40 b	18,70 ab	35,29 bc
	**	**	**	**	**	**	*	**

NS= No Significativo * Significativo al 5%, ** Significativo al 1%, según Tukey. Letras iguales a nivel de columnas no presentan diferencia significativa.

En la tabla 2.2 se observa que a partir de los 97 DDE el peso foliar específico (PFE) fue mayor para el tratamiento sin potasio, comportamiento encontrado en forma similar por Reddy y Zhao (2005) y por Pettigrew y Meredith (1997) explicado como parte de la diferencia en la biomasa total y también por el mayor grosor de las hojas. Además, atribuible a menor espacio intercelular y alta concentración en la hoja de carbohidratos no estructurales (Zhao *et al*., 2001), porque la translocación de fotoasimilados es inhibida por la deficiencia de K. Este mayor grosor de las hojas, resulta en la disminución en el área foliar en las plantas deficientes, respecto a aquellas con suministro de potasio, y por lo tanto disminuye la actividad fotosintética (Figura 2.5).

Tabla 2.2 Peso foliar específico (mg cm^{-2}) para algodón según dosis de potasio

Tratamiento K (mg kg^{-1})	Días después de emergencia (DDE)				
	59	68	76	97	109
0	5,55 (1,09)	6,17 a (0,92)	5,65 a (1,09)	14,89 b (12,5)	23,36 b (33,8)
30	5,89 (0,76)	7,19 ab (1,19)	6,90 ab (0,90)	7,77 a (0,88)	9,07 a (11,6)
60	5,44 (0,96)	8,31 bc (1,05)	7,61 b (1,42)	7,14 a (0,78)	7,77 a (3,0)
120	5,85 (0,72)	9,46 c (3,13)	7,31 b (0,94)	7,64 a (1,85)	7,36 a (1,6)
240	6,02 (1,09)	8,10 bc (0,95)	8,46 b (2,12)	7,58 a (0,94)	7,70 a (1,3)
Desv. Est.( )	0,924	1,448	1,294	3,39	10,26
DMS	0,76	1,36	1,12	4,73	13,24
	NS	**	**	**	**

NS= No Significativo * Significativo al 5%, ** Significativo al 1%, según Tukey. Letras iguales a nivel de columnas no presentan diferencia significativa.

2.4.5. Fotosíntesis respecto a clorofila

En la figura 2.7 se encontró que para cada uno de los muestreos (59, 76, 97 y 109 DDE) se presentó correlación entre la fotosíntesis y la lectura de clorofila con SPAD, expresando la tendencia que a menor contenido de potasio menor contenido de clorofila y menor fotosíntesis. La disminución en el contenido de clorofila es un indicador de desorden en el cloroplasto. Jiang *et al.* 1996, trabajando con bajo contenido de K en cloroplastos de remolacha, mostraron disminución en la actividad de la reacción de Hill y en la producción de ATP y NADP (Norman y Ulric ,1973); bajos contenidos de K incrementan la resistencia a la carboxilación a través de un efecto sobre las reacciones fotoquímicas de la fotosíntesis. El R^2 disminuyó a través de los DDE dado por el envejecimiento de las hojas, resultado de un menor contenido de clorofila.

Estudios han demostrado que la deficiencia nutricional por potasio afecta el contenido de clorofila. Oosterhuis y Bednarz (1997) reportaron que el contenido de clorofila a y total fue reducida en plantas deficientes de potasio. Pettigrew y Meredith (1997) encontraron que bajo condiciones controladas de invernadero en plantas de algodón deficientes de potasio su respuesta en la fotosíntesis fue baja (Longstreth y Nobel, 1980; Bednarz y Oosterhuis, 1996).

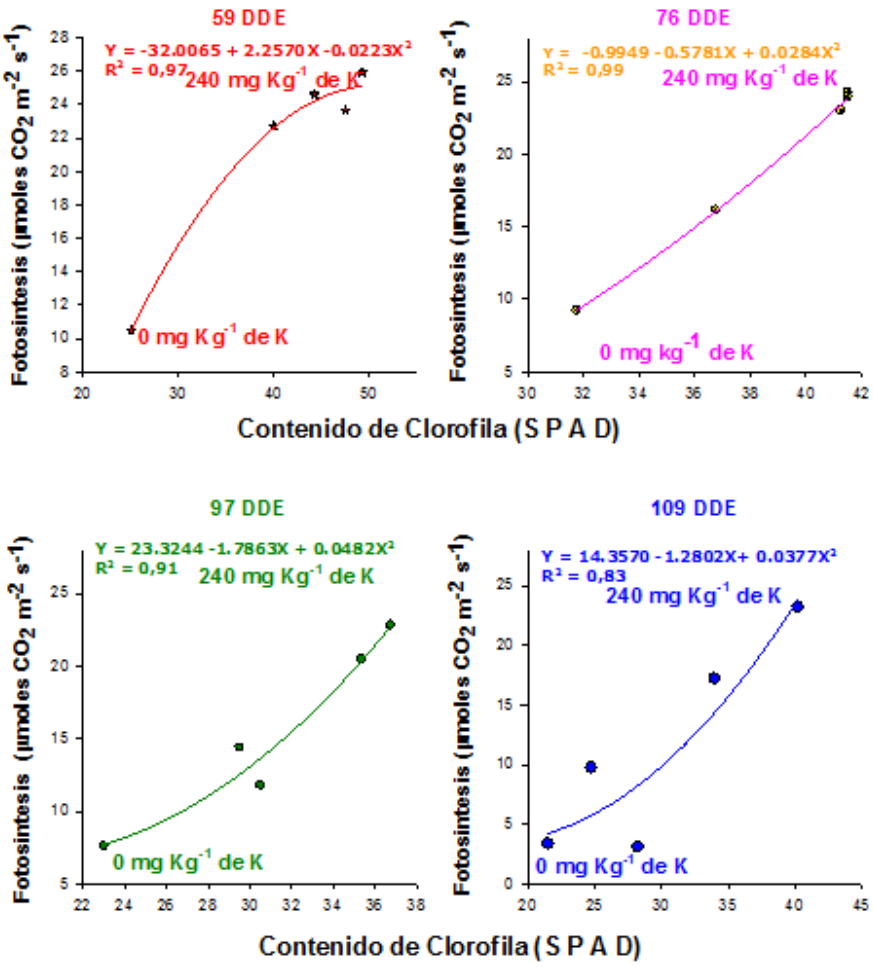


Figura 2.7 Relación entre la fotosintesis y el contenido de clorofila por efecto de dosis de potasio. Los datos de cada punto son el promedio de 4 repeticiones

2.4.6. Fotosíntesis (A_{max}) respecto al contenido interno de CO_2 (C_i)

Para las curvas A – C_i generadas para los 59 y 68 DDE, la conductancia estomática fue baja para el tratamiento sin potasio, A fue baja comparada con los demás tratamientos de potasio (30, 60, 120 y 240 mg kg^{-1}), que se incrementaron conjuntamente con los valores de Ci. También, A_{max} fue mayor para los tratamientos con potasio, sin diferencia estadística entre estos a los 59 DDE, comparada con los demás muestreos. Para los 76 DDE se presentaron las mayores limitaciones estomáticas para A, en todos los tratamientos. Sin embargo, para los 97 DDE los tratamientos igual y mayor a 60 mg kg^{-1} presentaron menor limitacion estomática y no estomática. Entendida como no estomática, la disminución en la capacidad fotosintética principalmente por inhibición de la actividad fotoquímica y de la carboxilación de la RuBP. La A_{max} para los tratamientos sin potasio fue menor a los 76 DDE (Figura 2.8).

Hutmacher y Krieg (1983) reportaron reducción en la conductancia estomática (g_s) en plantas sometidas a estrés hídrico e incremento de C_i en algodón, que es interpretado como un indicador de una mayor inhibición no estomática de A. Longstreth y Nobel (1980), trabajando con algodón, atribuyen la reducción de A por la deficiencia moderada de K que produce disminución en la conductancia del mesófilo.

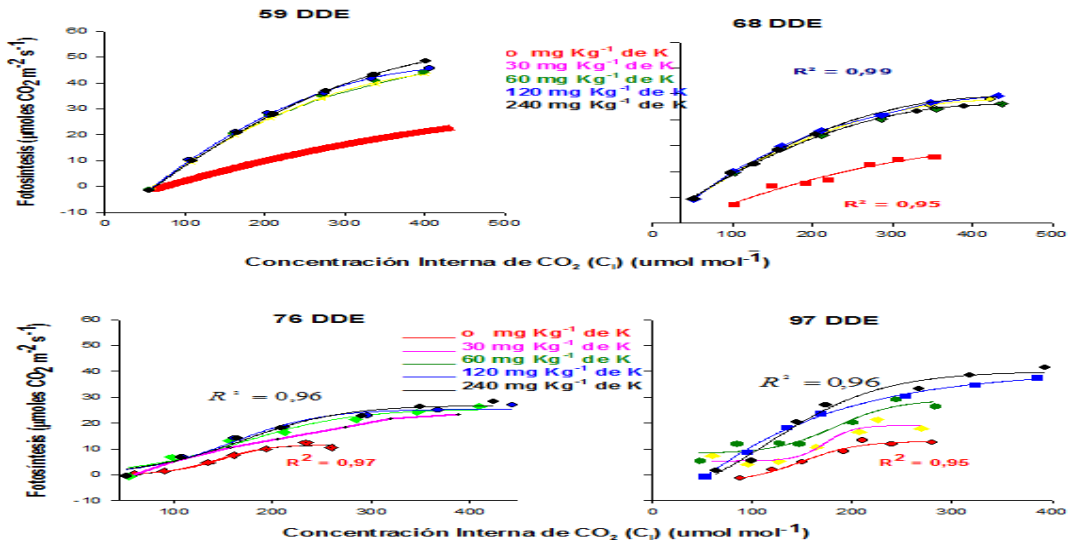


Figura 2.8 Tasa de asimilación de CO_2 vs. Concentración intercelular (Ci) en algodón a los 59, 68, 76 y 97 DDE.

2.4.7. Fotosíntesis respecto a dosis de potasio y conductancia estomática

El tratamiento con deficiencia de K presentó para todos los muestreos el menor valor de fotosíntesis, mostrando el efecto de los tratamientos sobre A en algodón. La tendencia de las ecuaciones fue cuadrática para todos los muestreos y con R^2 superiores a 0,95 para 59 y 76 DDE; y 0,98 y 0,92 respectivamente para 97 y 109 DDE. Las dosis de potasio superiores a 60 mg kg^{-1} presentaron los mayores valores de fotosíntesis sin encontrarse diferencias estadísticas entre estas (Figura 2.9). De los resultados se deduce que la deficiencia de K al afectar directamente el crecimiento foliar, el indice de área foliar y por consiguiente la fijación del CO_2 (Marschner, 2002), disminuye la fotosíntesis en estas plantas, comportamiento similar a los resultados encontrados.

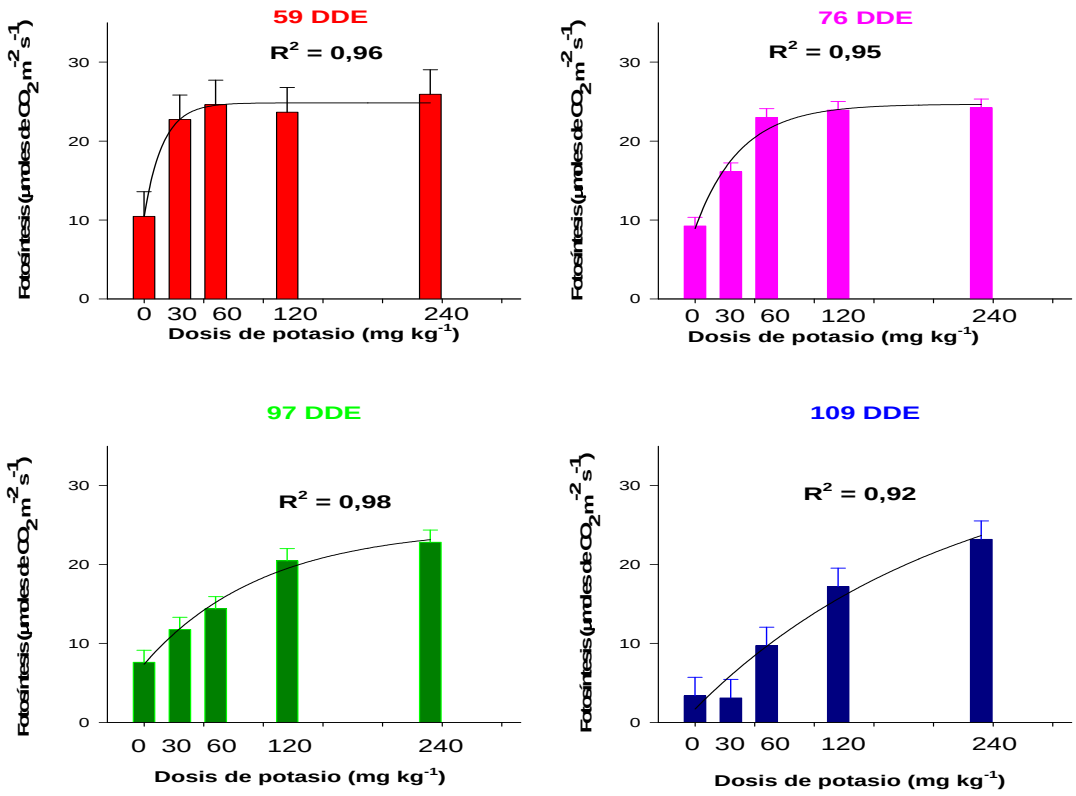
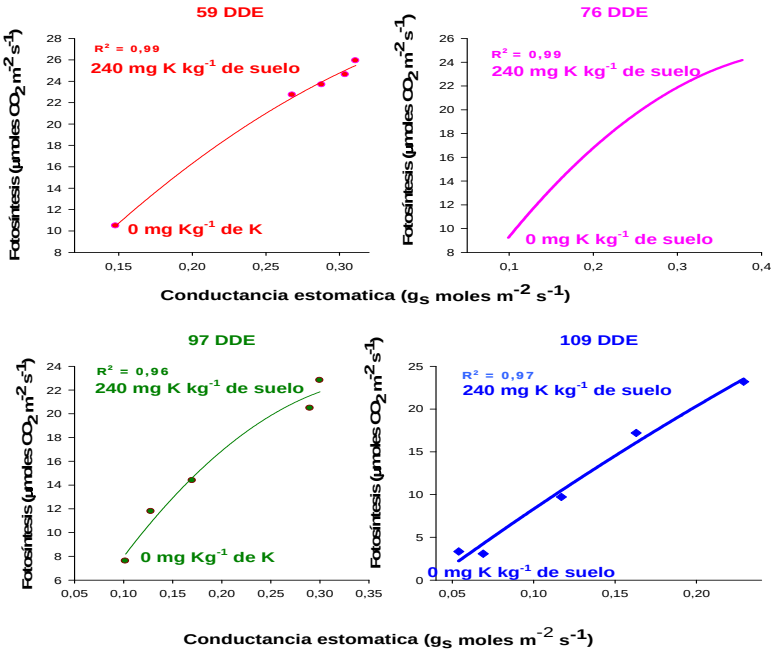


Figura 2.9 Efecto de las dosis de potasio sobre la fotosíntesis en algodón. Los datos de cada punto son el promedio de 4 repeticiones.

La figura 2.10 muestra el efecto de la conductancia estomática sobre la fotosíntesis según dosis de potasio, resaltándose que la tendencia de sus ecuaciones fue cuadrática con R^2 ajustados mayores a 0,96. Las mayores limitaciones por conductancia estomática en la

fotosíntesis fueron para las plantas deficientes en K para todos los muestreos. Además, se muestra la correlación directa que a mayores dosis de potasio mayor conductancia estomática y mayor tasa fotosintética. Para Humble y Raschke (1971), el potasio participa en el proceso de cierre y apertura de los estomas y esto afecta la conductancia estomática (Peaslee y Moss, 1968), resultados estos similares a los encontrados en el estudio, donde a mayor dosis de potasio mayor conductancia estomática y mayor fotosíntesis.

Figura 2.10 Fotosíntesis respecto a la conductancia estomática por dosis de potasio en algodón**.**



2.4.8. Calidad de la fibra

La tabla 2.3 muestra que para el análisis de calidad de la fibra las variables micronaire, longitud, resistencia, uniformidad, elongación, índice de fibras cortas (SFI) y madurez expresaron diferencia estadística con respecto al tratamiento deficiente en potasio. Siendo el efecto directo sobre el micronaire para los tratamientos 0 y 30 con valores menores de 3,5 µg pulg^{-1}, indicando que poseen una pared celular delgada con poca celulosa en sus fibras como se muestra en la tabla 2.4; los datos restantes estuvieron entre los valores normales de 3,5 y 4,9 µg pulg^{-1}. Pettigrew (1999, 2003) encontró que plantas con 0 kg·ha^{-1}

de K producían fibras con valores de micronaire considerados bajo, pero su valor no fue menor de 3,8 µg pulg^{-1}, como si sucedió en el experimento. La deficiencia de K afectó la longitud de fibra por presentar valor medio (1,0 pulg), comparado con largos y muy largos (>1,19 pulg.) de las dosis mayores a 30 mg kg^{-1}. Similar fue reportado por Pettigrew *et al*. (1996) quienes encontraron que deficiencias de K disminuyen el rendimiento de algodón-fibra, la elongación de la fibra, la longitud 50% span y el micronaire en 8 genotipos de diferente precocidad y adaptación regional.

La resistencia mostró diferencia estadística; por escala HVI todos los valores se encontraron de muy alta resistencia (28 – 35 g tex^{-1}). Pettigrew *et al*. (1996) encontraron que suplementos de N y K no afectaron la resistencia de la fibra, pero adiciones de K incrementaron la elongación de la fibra. La uniformidad, elongación y SFI (índice de fibra corta) presentaron diferencia estadística y mostraron consistencia con el efecto de la deficiencia de potasio.

Tabla 2.3 Efecto de diferentes dosis de potasio sobre la calidad de la fibra en el algodón. UNESP, Botucatu, SP. Brasil.

Tratamiento (mg K kg^{-1})	Calidad de la fibra						
	Micronaire (µg pulg^{-1})	Longitud (pulg)	Resistencia (g tex^{-1})	Uniformidad (%)	Elongación	SFI	Madurez
0	2,50 a	1,00 a	30,0 a	86,3 a	5,00 a	3,20 b	1,00 d
30	2,55 a	1,17 b	30,3 a	87,1 ab	5,30 b	3,16 b	0,79 a
60	3,65 b	1,19 bc	32,9 b	86,5 a	5,46 b	2,43 ab	0,84 b
120	4,22 c	1,20 c	33,4 b	88,3 b	5,43 b	2,20 a	0,89 c
240	4,40 c	1,24 d	33,4 b	87,4 ab	5,33 b	2,56 ab	0,89 c
K	**	**	**	*	*	*	**

NS= no significativo * Significativo al 5%, ** Significativo al 1%, según Fisher´s LSD. Letras con el mismo valor a nivel de columnas no presentan diferencia significativa.

La tabla 2.4 muestra la evaluación de la fibra, por el método detergente ácida, y de celulosa. De los resultados obtenidos se deduce que por deficiencia de potasio se presenta el menor valor, producto de la baja eficiencia en la deposición de celulosa en la pared secundaria de la fibra (Dhindsa *et al*., 1975), que está relacionada con el bajo valor del micronaire (Bennett *et al.*, 1965) (Tabla 2.3).

Tabla 2.4 Contenido (%) de Fibra por detergente Acida y celulosa en algodón.

Tratamiento (mg K kg^{-1})	Fibra detergente Acida	Celulosa
0	89,5 b	89,5 b
30	92,0 ab	92,0 ab
60	94,5 a	94,2 a
120	91,0 b	91,2 ab
240	92,2 ab	92,2 ab
	**	**

** Significativo al 1%, según Fisher´s LSD. Letras con el mismo valor a nivel de columnas no presentan diferencia significativa.

2.4.9. Sacarosa sintetasa en fibra de algodón

En numerosos estudios se observa que factores ambientales como temperatura, precipitación, irradianza y manejo pueden alterar el desarrollo de la semilla y fibra del algodón (Pettigrew, 2001; Davidonis *et al*., 2004), así como algunos procesos metabólicos. En las figuras 2.11 y 2.12 se observa el comportamiento de la enzima SS por efecto de las dosis de potasio en la etapa de engrosamiento de la fibra. Se observa que en todos los tratamientos se presentó actividad de la SS, siendo menor el deficiente en K y mayor para los demás tratamientos, con desviación estandar muy pequeña. La mayor actividad se observó a las 11h, para 60 y 120 mg kg^{-1} de K; también se observó incremento en la actividad desde las 8h hasta un máximo a las 11h, se sugiere que esta tendencia está relacionada con la mayor disponibilidad de sustrato al final del medio día, explicado por la acumulación de fotoasimilados producidos en las primeras horas del día.

En la figura 2.12 se observa incremento en la actividad enzimática, de un valor mínimo alcanzado con 0 mg kg^{-1} a un máximo con 60 mg kg^{-1}, con estos resultados se puede deducir que para la fibra de algodón a mayor dosis de potasio mayor actividad de la SS.

En este estudio la actividad de SS, en la fibra de algodón, involucrada en el metabolismo de sacarosa fue afectada por las dosis de potasio. Con la metodología utilizada se determinó la actividad total (SS-S y SS-M); es posible que el incremento en la actividad de SS a mayores dosis de potasio se deba a un aumento de la actividad de la SS-M. Adicionalmente

al presentarse mayor degradación de sacarosa se produce UDP-glucosa libre, que puede usarse en la síntesis de celulosa, contrario a lo sucedido cuando se presenta un estrés por baja temperatura (Haigler *et al*., 2001). Es evidente que la transformación de sacarosa y síntesis de celulosa en la fibra de algodón es afectada por la disponibilidad de potasio, de acuerdo a la correlación que se encontró entre el contenido de celulosa y la actividad de la SS con un valor de 0,76.

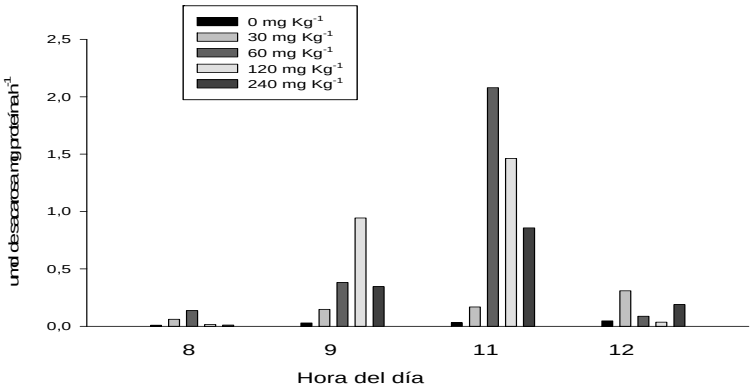


Figura 2.11 Actividad específicade la sacarosa sintetasa en fibra de algodón durante 4 horas del día. Cada punto representa la media en triplicado.

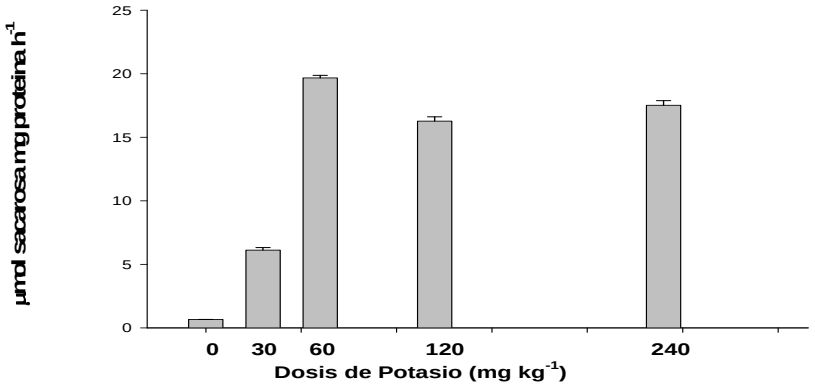


Figura 2.12 Actividad específica de la sacarosa sintetasa en fibra de algodón por efecto de dosis de potasio. Cada punto representa la media en triplicado.

2.4.10. Sacarosa fosfato sintetasa en fibra de algodón

En la figura 2.13 se muestra el comportamiento de la enzima SFS por efecto de las dosis de potasio en la etapa de engrosamiento de la fibra, encontrándose que el tratamiento de 60 mg kg^{-1} presentó la mayor actividad enzimática. Haigler *et al*. (2007) indican que sobre el control de las condiciones ambientales, algodón con sobre producción de SFS incrementa la síntesis de sacarosa y la calidad de la fibra, como sucedió para el tratamiento de 60 mg kg^{-1} de potasio.

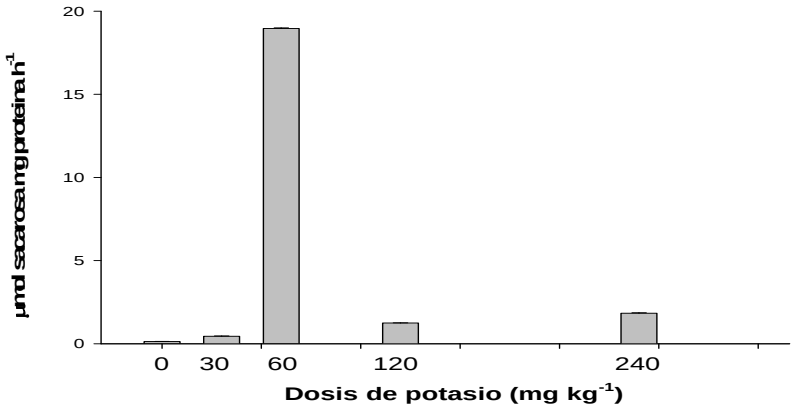


Figura 2.13 Actividad específica de la sacarosa fosfato sintetasa por efecto de dosis de potasio en fibra de algodón. Cada punto representa la media en triplicada

2.4.11. Sacarosa sintetasa en hojas

En la figura 2.14 se muestra el comportamiento de SS por efecto de las dosis de potasio en las diferentes etapas de desarrollo del cultivo, encontrándose que la mayor actividad correspondió para el tratamiento 60 mg kg^{-1} tanto a los 60 DDE etapa juvenil como a los 76 DDE etapa reproductiva. Esta respuesta a nivel de la hoja muestra la mayor disponibilidad de sacarosa como resultado de una mayor disponibilidad de fotoasimilados. Para 0 y 30 mg kg^{-1} presentó altos valores, pero que no se reflejaron en mayor acumulación de celulosa en dichos tratamientos. La actividad foliar, por el balance con la demanda de las cápsulas, también mostró la misma tendencia que en la etapa de engrosamiento de la fibra

(Figura 2.12). Para todos los tratamientos a partir de los 76 DDE la tendencia de la actividad de la SS fue descendente, dado el proceso normal de envejecimiento de la hoja y del efecto de las dosis de potasio sobre el tejido foliar.

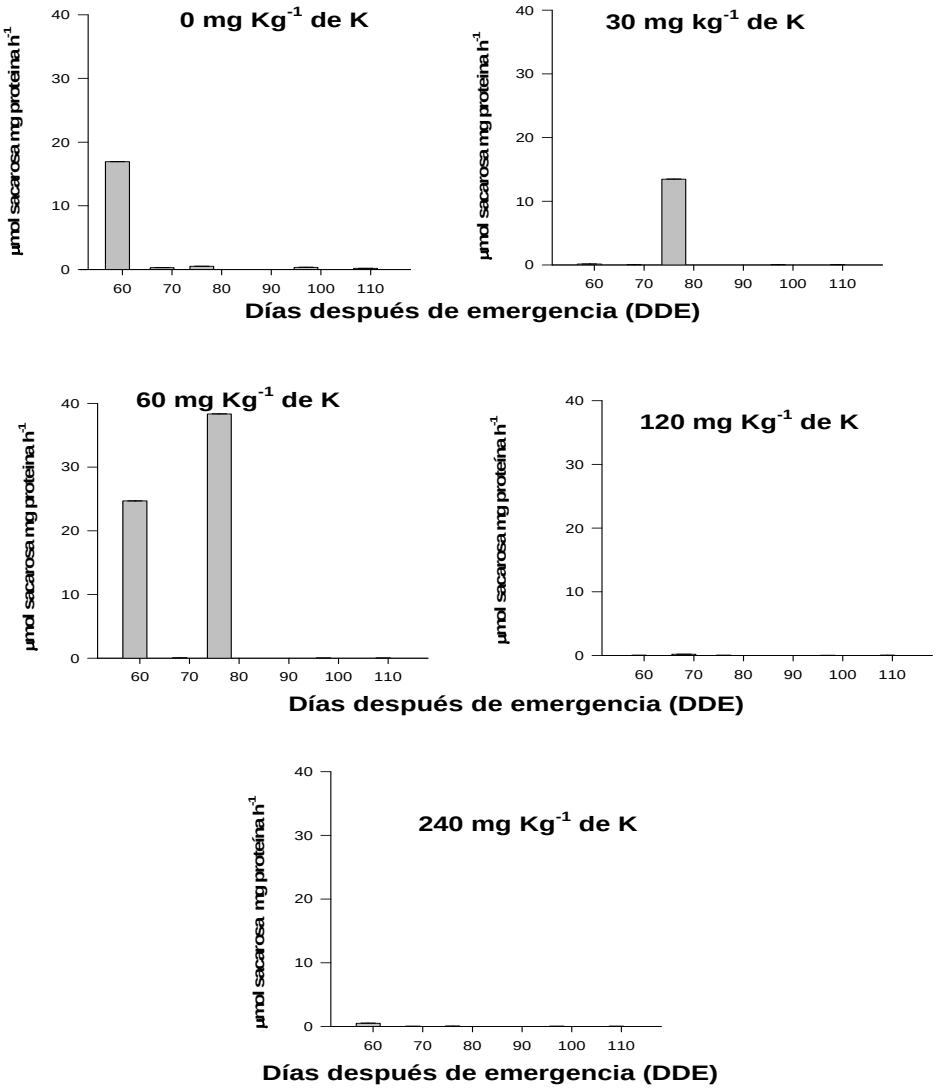


Figura 2.14 Actividad de la sacarosa sintetasa por efecto de dosis de potasio en hojas de algodón. Cada punto representa la media en triplicada

2.5. CONCLUSIONES

La deficiencia de potasio redujo el crecimiento foliar, desarrollo, fotosíntesis y distribución de materia seca respecto a los tratamientos con suministro de potasio. La reducción de la fotosíntesis y crecimiento foliar disminuyó la producción de biomasa e incrementó la distribución de biomasa a órganos vegetativos como hojas. El peso foliar específico fue la variable que mostró mayor expresión morfo-fisiológica en plantas deficientes de potasio y la lectura de clorofila con SPAD mostró una alta correlación con la fotosíntesis. La conductancia estomática estuvo directamente relacionada con la fotosíntesis y dosis de potasio. La concentración interna de CO_2 se correlacionó directamente con la fotosíntesis para los tratamientos de potasio, y fue menor para el tratamiento con deficiencia por limitaciones estomáticas y no estomáticas. Los resultados indican que el nivel crítico de K depende de las variables de crecimiento y parámetros fisiológicos medidos. Para la calidad de la fibra la deficiencia de potasio afectó principalmente el micronaire y longitud de la fibra; para la uniformidad, elongación, SFI y madurez mostraron diferencia estadística y para el contenido de celulosa la deficiencia de potasio mostró el menor valor.

La enzima SS en la fibra de algodón respondió en forma positiva a las dosis de potasio, correspondiendo la mayor actividad a partir de 60 mg kg^{-1} y la mínima para 0 mg kg^{-1} e igualmente durante las lecturas diarias la máxima actividad correspondió a las 11h momento en que hay mayor disponibilidad de sustrato debido a la actividad fotosintética. La SS en las hojas mostró su mayor actividad con 60 mg kg^{-1} tanto a los 60 DDE como para los 76 DDE o etapa reproductiva; e igual comportamiento para SFS en fibra con mayor actividad para 60 mg kg^{-1}. Las dos enzimas (SS y SFS) expresaron su máxima actividad a la misma dosis de potasio de 60 mg kg^{-1}.

Los resultados indican que la síntesis de celulosa y el metabolismo de sacarosa disminuyeron a bajas concentraciones de potasio y fue principalmente atribuido a los cambios en la actividad de las enzimas (SFS y SS). La diferencia en la síntesis de celulosa y metabolismo de sacarosa en respuesta al potasio en células de la fibra para el cultivar FiberMax-966 de algodón, fue principalmente determinada por el nivel de actividad de la SS.

2.6. LITERATURA CITADA

AMOR Y, HAIGLER CH, JOHNSON S, WAINSCOTT M, DELMER DP. (1995). A membrane-associated form of sucrose synthase and its potential role in synthesis of cellulose and callose in plants. Proc Nat Acad Sci USA 92: 9353-9357.

BAUER, P.J., FREDERICK, J.R., BRADOW, J.M., SADLER, E.J., EVANS, D.E. (2000). Canopy photosynthesis and fiber properties of normal- and late-planted cotton. Agron. J. 92: 518–523.

BASRA **A,** MALIK C.P. (1984). Development of the cotton fiber. Int. Rev. Cytol. 89: 65-113

BEDNARZ, C.W., OOSTERHUIS, D.M. (1996). Physiological aspects of potassium deficiency in cotton. Special Report Agric. Exp. St. Div. Agric., Univ. Ark. No. 178: 86–91.

BEDNARZ, C.W., OOSTERHUIS, D.M., EVANS, R.D. (1998). Leaf photosynthesis and carbon isotope discrimination of cotton in response to potassium deficiency. Environ. Exp. Bot. 39, 131–139.

BENNETT, O. L., ROUSE, R., ASHLEY, D. A., DOSS, B. D. (1965). Yield, fiber quality and potassium content of irrigated cotton plants as affected by rates of potassium. Agronomy Journal. 57: 296-299.

BOQUET, D.J., BREITENBECK, G.A. (2000). Nitrogen rate effect on partitioning of nitrogen and dry matter by cotton. **Crop Sci.** 40: 1685–1693.

BOQUET, D.J., MOSER, E.B. (2003). Boll retention and boll size among intrasympodial fruiting sites in cotton. **Crop Sci**. 43: 195–201.

BRADFORD, M. A. (1976). A rapid and sensitive method for the quantitation of microgram quantities of protein-dye binding. Anal. Biochem. 72: 248 – 254.

BRADOW, J.M., DAVIDONIS, G.H. (2000). Quantitation of fiber quality and the cotton production-processing interface: A physiologist's perspective. J. Cotton Sci. 4, 34–64.

CASSMAN, K.G., KERBY, T.A., ROBERTS, B.A., BRYANT, D.C., BROUDER, S.M. (1989). Differential response of two cotton cultivars to fertilizer and soil potassium. **Agron. J**. 81: 870–876.

CASSMAN, K. G. (1993). Cotton. In: BENNET, W., ed, Nutrient deficiencies & toxicities in crop plants. St Paul. APS Press. pp. 111-119.

COPE Jr., J.T. (1981). Effect of 50 years of fertilization with phosphorous and potassium on soil test levels and yields at six locations. Soil Sci. Soc. Am. J. 45: 342–347.

CHOUREY P. S, NELSON O. (1979) Interallelic complementation at the sh locus in maize at the enzyme level. Genetics 91: 317-325.

CHOUREY PS, CHEN YC, MILLER ME (1991) Early cell degeneration in developing endosperm is unique to the Shrunken mutation in maize. Maydica 36: 141-146.

CHOUREY PS, MILLER ME (1995) On the role of sucrose synthase in cellulose and callose biosynthesis in plants. In HG Pontis, GL Salerno, EJ Echeverria, eds, Sucrose Metabolism, Biochemistry, Physiology and Molecular Biology. American Society of Plant Physiologists, Rockville, MD, pp 80-87

DAVIDONIS, G. H., JOHNSON, A.S., LANDIVAR, J.A., FERNANDEZ, C.J. (2004). Cotton fiber quality is related to boll location and planting date. **Crop Sci**. 96, 42–47.

DELMER, D.P., AMOR, Y. (1995). Cellulose biosynthesis. Plant Cell 7: 987–1000.

DELMER, D.P., HAIGLER, C.H. (2002). The regulation of metabolic flux to cellulose, a major sink for carbon in plants. Metabol. Eng. 4: 22–28.

DeLANGHE, E.A.L. (1986). Lint development. In: Mauney, J.R., Stewart, J.McD. (Eds.), Cotton Physiology. The Cotton Foundation, Memphis, TN, pp. 325–350.

DHINDSA, R. S., BEASLEY, C. A., TING, I. P. (1975). Osmoregulation in cotton fiber: Accumulation of potassium and malate during growth. **Plant Physiol**. 56 (3): 394-398.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. (1999). Centro de Pesquisa de Solos (Rio de Janeiro, RJ). Sistema Brasileiro de Classificação de Solos. Rio de Janeiro. 412 p.

GEIGENBERGER, P., STITT, M. (1991). A “futile” cycle of sucrose synthesis and degradation is involved in regulating partitioning between sucrose, starch and respiration in cotyledons of germinating *Ricinus communis* L seedlings when phloem transport is inhibited. **Planta**. 185: 81–90.

GOPAL, R., DUBE, B, K., SINHA, P., CHATTERJEEC. (2001). Potassium stress changes in cotton metabolism. Ann. Agric. Res. 22: 253–257.

HAIGLER, C.H., MILKA, I.D., HOGAN, P.S., SALNIKOV, V.V., H WANG, S., MARTIN, K., DELMER, D.P. (2001). Carbon partitioning to cellulose synthesis. **Plant Mol. Biol**. 47: 29–51.

HAIGLER, C.H., SINGH, B., ZHANG, D., HWANG, S., WU, C., CAI, W., HOZAIN, M., KANG, W., RICHARD, B.K., STRAUSS, R.E., HEQUENT, E.F., WYATT, B.G., JIVIDEN, G.M., SCOTT, H.A. (2007). Transgenic cotton over-prducing spinach SPS showed enhanced leaf sucrose synthesis and improved fiber quality under controlled environmental conditions. **Plant Mol. Biol**. 63: 815–832.

HUBER, S. C. (1983). Role of sucrose phosphate synthase in partitioning of carbon in leaves. **Plant Physiol.** 71: 818-821.

HUMBLE, G. D., RASCHKE, K. (1971). Stomatal opening quantitatively related to potassium transport. **Plant Physiol**. 48: 447-453.

HUTMACHER, R. B., KRIEG, D. R. (1983). Photosynthetic rate control in cotton: Stomatal and nonstomatal factors. **Plant Physiol**. 73: 658 – 661.

JIANG, D.A., X. Y. WENG, Q. LU. (1996). Effect of Potassium on diurnal variations in Pn, hill reaction and SOD activities in rice plant. Acta Phytophysiotogica Sinica. 22(1): 87–93.

JONES, M.A., WELLS, R. (1998). Fiber yield and quality of cotton grown at two divergent population densities. **Crop Sci**. 38: 1190–1195.

KAFKAFI, U. (1992). Foliar feeding of potassium nitrate in cotton. Better Crops with Plant Food. 76: 16-17.

KERBY, T.A., ADAMS, F. (1985). Potassium nutrition of cotton. In: Robert, P.C., Rust, R.H., Larson, W.E. (Eds.), Potassium in Agriculture. ASA–CSSA–SSSA, Madison, WI, USA, pp. 843–860.

LONGSTRETH, D. J., NOBEL, P. S. (1980). Nutrient influences on leaf photosynthesis. Effects of nitrogen, phosphorous, and potassium for Gossypium hirsutum L. **Plant Physiol.** 65: 541 – 543.

MARTIN, L.K., HAIGLER, C.H. (2004). Cool temperature hinders flux from glucose to sucrose during cellulose synthesis in secondary wall stage cotton fibers. Cellulose. 11: 339–349.

MINTON, E.B., EBELHAR, M.W. (1991). Potassium and aldicarb-disulfoton effects on verticillium wilt, yield, and quality of cotton. **Crop Sci**. 31: 209– 212.

MULLINS G.L., REEVES D.W., BUMMESTGER C.H., BRYANT H.H. (1994). In-row subsoiling and potassium placement effects on root growth and potassium content of cotton. **Agron. J**. 86:136-139.

NORMAN, T., AND A. ULRICH. (1973). Effect of potassium deficiency on the photosynthesis and respiration of leaves of sugar beet. **Plant Physiol**. 51:783–786.

OOSTERHUIS, D.M., 1994. Potassium nutrition of cotton in the USA with particular reference to foliar fertilization. In: Constable, G. A., Forrester, N.W. (Eds.), Proceeding of the World Cotton Research Conference 1. CSISO, Canberra, pp. 133–146.

OOSTERHUIS, D.M., AND BEDNARZ. C. W. (1997). Physiological changes during the development of potassium deficiency in cotton. p. 347–351. In T. Ando et al. (ed.) Plant nutrition for sustainable food production and environment. Kluwer Academic Publ., Dordrecht, The Netherlands.

PEASLEE, D. E., MOSS, D. N. (1968). Stomatal conductivities in K deficient leave of maize (Zea mays L). **Crop. Sci**. 8: 427 – 430.

PERCHERON, F. (1962). Colorimetric determination of sucrose and fructofuranosidase by the tiobarbituric acid reaction. C. R. Hebb. Seances Acad. Scie., Paris, 255: 2521 – 2522.

PETTIGREW, W.T., HEITHOL, J.J., MEREDITH, W.R. (1996). Genotypic interactions with potassium and nitrogen in cotton of varied maturity. **Agron. J**. 88: 89–93.

PETTIGREW, W. T.; MEREDITH JR.; W. R. (1992). Potassium fertilization influences cotton dry matter and yield. Better Crops with Plant Food. 76: 22-23.

PETTIGREW, W.T., MEREDITH Jr., W.R. (1997). Dry matter production, nutrient uptake, and growth of cotton as affected by potassium fertilization. **J. Plant Nutr**. 20: 531–548.

PETTIGREW, W.T. (1999). Potassium deficiency increase specific leaf weights and leaf glucose levels in field-grown cotton. **Agron. J**. 91: 962– 968.

PERERA, H. N., HARTMANN, E., HOLADAY, S. (1995). Regulation of cotton photosynthesis during moderate chilling. **Plant Science**. 111: 133-143.

PETTIGREW, W. T. (2003). Relationships between insufficient potassium and crop maturity in cotton. **Agron. J.** 95: 1323–1329.

PETTIGREW, W.T. (2001). Environmental effects on cotton fiber carbohydrate concentration and quality. **Crop Sci.** 41: 1108–1113.

RAIJ, B. VAN; QUAGGIO, J.A. (1983). Métodos de análises de solos para fins de fertilidade. Campinas: Instituto Agronômico. 31p. (IAC. Boletim técnico, 81).

RAMEY Jr., H.H. (1986). Stress influences on fiber development. In: Mauney,J. R., Stewart, J.McD. (Eds.), Cotton Physiology. The Cotton Foundation, Ramey Jr., H.H., 1986. Stress influences on fiber development. In: Mauney, J.R., Stewart, J.McD. (Eds.), Cotton Physiology. The Cotton Foundation, Memphis, TN, USA, pp. 315–359.

READ, J, J., REDDY, R, J., JENKINS, J, N. (2006). Yield and fiber quality of upland cotton as influenced by nitrogen and potassium nutrition. **Europ. J. Agronomy** 24: 282–290.

REDDY, K.R., KOTI, S., DAVIDONIS, G.H., REDDY, V.R. (2004). Interactive effects of carbon dioxide and nitrogen nutrition on cotton growth, development, yield and fiber quality. **Agron. J**. 96: 1148–1157.

REDDY, R, K., ZHAO, D. (2005). Interactive effects of elevated CO2 and potassium deficiency on photosynthesis, growth and biomass partitioning of cotton. Field Crops Research. 94. 201-213.

RIMON, D. (1989). Functions of potassium in improving fiber quality of cotton. In: Methods of K-research in plants. Proceeding of the 21 colloquium, pp. 319 – 333.

ROSOLEM, C. A., MIKKELSEN, D. S. (1991). Potassium absorption and partitioning in cotton as affected by periods of potassium deficiency. **Journal of Plant Nutrition**, Athens, 14 (9): 1001-1016.

RUAN, Y.L., CHOUREY, P.S. (1998). A fiberless seed mutation in cotton is associated with lack of fiber initiation in ovule epidermis and alterations in SuSy expression and carbon partitioning in developing seeds**. Plant Physiol**. 118: 399–406.

SILVA, N.M., CARVALHO, L. H. De., CIA, E., FUZATTO, M. G., CHIAVEGATO, E. J. & ALLEONI, L. R. F. (1995). Seja o doutor do seu algodoeiro. Potafos, Piracicaba. 24 p. (Arquivo do Agrônomo, 8).

THOMPSON, W. R. (1999). Fertilization of cotton for yields and quality. In: CIA, E.; FREIRE, E. C.; SANTOS, W. J. dos (Eds). Cultura do algodoeiro. Piracicaba: Potafós. p. 93-99.

USHERWOOD, N.R. (2000). The influence of potassium on cotton quality. In: Agri-Briefs, Agronomic News, No. 8., Spring 2000. Potash and Phosphate Institute, Norcross, GA, USA.

YONG-LING, R., CHOUREY, S. P., DELMER, P. D., PEREZ-GRAU, L. (1997). The differential expression of sucrose synthase in relation to diverse patterns of carbon partitioning in developing cotton seed. 115: 375 – 385.

ZHAO, D., OOSTERHUIS, D.M., BEDNARZ, C.W. (2001). Influence of potassium deficiency on photosynthesis, chlorophyll content, and chloroplast ultrastracture of cotton plants. Photosynthetica 39, 103–109.

CAPÍTULO 3. LA NUTRICIÓN CON POTASIO EN EL CRECIMIENTO, RENDIMIENTO, CALIDAD DE FIBRA, EFICIENCIA FOTOSINTÉTICA Y ACTIVIDAD DE LA SACAROSA SINTETASA EN ALGODÓN (*Gossypium hirsutum* L.), BAJO CONDICIONES DE CAMPO

3.1. RESUMEN

El experimento se realizó en el Centro de Investigación "Nataima", de CORPOICA, localizado en el municipio de Espinal (Tolima). Las variedades evaluadas fueron CORPOICA-M-123 y DELTA–OPAL con cinco dosis: 30, 60, 90, 120 y 150 kg·ha^{-1} de K, aplicado en forma edáfica. Cada dosis se distribuyó durante tres épocas: 1) al momento de la siembra (100% de P + 30% de K + 100% elementos menores), 2) etapa vegetativa (5 hojas) (40% de K + 50% de N) y, 3) en la etapa juvenil (10 nudos) (50% de N y 30% restante de K), como fuente se utilizó KCl, colocándolo en banda a un lado del surco. Para el análisis de crecimiento se realizaron cinco muestreos uno por cada etapa de desarrollo y se evaluaron cuatro índices de crecimiento: índice de área foliar (IAF), tasa de crecimiento del cultivo (TCC), tasa de asimilación neta (TAN) y tasa relativa de crecimiento (TRC); el modelo potencial de crecimiento se calibró con los datos del tratamiento de 150 kg K·ha^{-1} asumiendo que no tuvo limitaciones en su manejo agronómico y usando un modelo matemático multiplicativo determinístico con los siguientes componentes: radiación fotosintéticamente activa (PAR) y fracción de luz interceptada (F_{LINT}) en función del índice de área foliar (IAF), del coeficiente de extinción (k) y uso eficiente de la radiación (RUE). El objetivo del experimento fue determinar por material genético la influencia de las dosis de potasio en el crecimiento, producción de algodón-semilla, fibra y calidad, así como en la fluorescencia de la clorofila y en la actividad sacarosa sintetasa. Los modelos generados muestran buen ajuste, tanto para la biomasa total como para la distribución en los diferentes órganos de las dos variedades. El coeficiente de extinción para la etapa vegetativa-juvenil y reproductiva, mostró valores similares a los reportados por otros autores. Las curvas de crecimiento para materia seca total en las dos variedades se ajustaron a un modelo de crecimiento sigmoidal, y para la masa seca foliar y el área foliar se ajustaron a un modelo

gaussiano. El tratamiento de 120 kg·ha^{-1} de K para CORPOICA-M-123 presentó los mayores valores de IAF, TCC, TAN y TRC; para DELTA-OPAL su respuesta fue inconsistente. El tratamiento que presentó para las dos variedades las menores TCC e IAF fue 30 kg·ha^{-1} de K, evidenciando respuesta diferencial entre las variedades y los niveles de potasio. La dosis de potasio presentó influencia sobre el rendimiento de algodón-semilla, fibra, porcentaje de fibra y en la eficiencia fotosintética (F_v/F_m). Para las variedades, la propiedad de calidad que expresó diferencia significativa fue la elongación y para la interacción variedad*dosis de potasio fueron micronaire, madurez y uniformidad. La actividad de sacarosa sintetasa (SS) se observó diferencial entre hojas, carpelo, brácteas y pecíolo, por variedad y dosis de potasio; la actividad de la enzima en la fibra se relacionó con propiedades de calidad de la fibra que definen la finura.

Palabras clave: Índices de crecimiento, fracción de luz interceptada (F_{LINT}), uso eficiente de la radiación (RUE), micronaire, madurez, uniformidad, eficiencia del PS II (F_v/F_m), fluorescencia máxima (F_m), sacarosa sintetasa (SS).

3.2. INTRODUCCIÓN

En Colombia se cultivan diferentes variedades de algodón de fibra media, todas de la especie *Gossypium hirsutum* L, siendo la mayoría provenientes de semillas de Norteamérica y Australia, dentro de las cuales se destaca la DELTA-OPAL caracterizada por su alto rendimiento (Barragán *et al*., 2005). El país ha desarrollado algunas variedades mejoradas a través del cruzamiento entre variedades introducidas con altos rendimientos y variedades colombianas con alta productividad, con base en esta metodología se liberó la CORPOICA-M-123 (Mendoza *et al*., 2001). Igual que en el resto del mundo, el algodón se cultiva principalmente por su fibra, la cual es empleada para la industria textil nacional (MINAGRICULTURA, 2005). Una de las problemáticas identificadas con los productores es el poco conocimiento de estas nuevas variedades en cuanto a su crecimiento y manejo, especialmente en los nutrientes como el potasio, que en los últimos años por su deficiente manejo ha presentado disminución en el rendimiento y productividad del algodón para el Valle cálido del alto Magdalena.

Comercial y agronómicamente el algodón (*Gossypium hirsutum* L.) se maneja como una planta anual y no como una perenne (Mauney, 1986; Oosterhuis, 1990). Esto significa que presenta hábito de crecimiento indeterminado y después de antesis la planta continúa produciendo simultáneamente nuevas estructuras reproductivas y manteniendo el crecimiento vegetativo (Plant *et al*., 1998).

El potasio (K) es el catión libre más abundante en las plantas, es cofactor que activa numerosas e importantes enzimas que están involucradas en muchos procesos de la planta como fotosíntesis, respiración, metabolismo de carbohidratos, translocación y síntesis de proteínas. El K también está presente en la regulación osmótica de la turgencia (Marschner, 2002). En la planta de algodón, el K está presente como mineral y forma compuestos complejos con sustancias orgánicas (Belousou, 1985). El papel fisiológico del K durante la etapa de formación y maduración de las cápsulas de algodón está principalmente expresado en el metabolismo de carbohidratos y en la translocación de metabolitos desde las hojas y otros órganos vegetativos. La mayor acumulación de azúcares y almidón en hojas deficientes de K afectan el desarrollo de las cápsulas debido a la deficiencia de metabolitos. La deficiencia durante la etapa reproductiva cambia marcadamente la estructura del fruto según la posición y disminuye el rendimiento y calidad de la fibra (Belousou, 1985).

La participación del K en la síntesis de proteínas se manifiesta con la acumulación de compuestos solubles de nitrógeno (aminoácidos, amidas y nitrato) en plantas deficientes de potasio y también con la incorporación de nitrógeno inorgánico en la fracción proteínica. Por otro lado, con deficiencia de K la expresión de un número de polipéptidos es incrementado, especialmente los de 45 kDa enlazados a la membrana (Marschner, 2002).

Para Azcon-Bieto y Talon (2000) los cultivos con deficiencia de K son muy sensibles a los ataques fúngicos. En plantas deficientes de K la síntesis de compuestos de alto peso molecular (proteínas, almidón y celulosa) se desacopla, razón por la cual se acumulan compuestos de bajo peso molecular que favorecen la invasión y crecimiento de los hongos.

Con la producción de nuevos materiales de algodón de rápida fructificación, alto número de cápsulas, alto rendimiento en algodón-fibra y por presentar reducción en el crecimiento radical y la toma de iones durante la etapa reproductiva pueden ser un factor que contribuye

a la deficiencia de potasio observada en la etapa media del cultivo (Oosterhuis, 1994). El algodón comparado con otros cultivos comerciales aparece como el más susceptible a la disponibilidad de potasio y muestra muy temprano síntomas de deficiencia sobre el límite disponible de potasio en el suelo (Cope, 1981). Muchos estudios han reportado que la deficiencia de potasio afecta negativamente la fotosíntesis (Bednarz *et al*., 1998; Zhao *et al*., 2001), el área foliar (Zhao *et al*., 2001; Pettigrew, 2003), la producción de biomasa (Zhao *et al*., 2001), el rendimiento algodón-fibra (Pettigrew, 2003), y la calidad de fibra (Pettigrew *et al*., 1996).

Algunos autores han clasificado los modelos de simulación de acuerdo a características, grado de complejidad y niveles jerárquicos; Penning de Vries *et al*. (1989) clasifican los modelos en descriptivos o explicativos. Descriptivos, estadísticos o empíricos son aquellos que usan regresiones y reflejan poco o nada los mecanismos que causan el comportamiento del sistema, mientras que los explicativos consisten en una descripción cuantitativa de esos mecanismos y procesos. France y Thornley (1984) proponen una clasificación de los modelos de acuerdo a su función, en empíricos, cuando sirven para describir, mecanísticos cuando la descripción se da con cierto grado de comprensión; estáticos, aquellos que no tienen en cuenta el tiempo; y dinámicos, aquellos en los cuales esta variable es explícita. Los modelos determinísticos predicen valores sin asociarles ninguna distribución probabilística, en cambio, los modelos estocásticos, que contienen elementos de azar, contemplan una distribución de probabilidad al hacer la estimación.

En un modelo de simulación es posible conocer el comportamiento ante variaciones ambientales y prácticas culturales, como respuesta a valores totales diarios u horarios de radiación solar, temperatura, lluvia o riego. También, suministra información de la comparación del efecto de estrategias alternativas de manejo del cultivo y determina en orden cuál es la mejor (Boote *et al*., 1996). Acerca del cultivo se puede obtener información sobre fenología, acumulación de masa seca por diferentes órganos de la planta y contenidos de nitrógeno en cada órgano, entre otros (Jones y Ritchie, 1990).

Algunos modelos usan un parámetro de conversión de radiación solar a masa seca acumulada, los cuales no incluyen específicamente los procesos de fotosíntesis y respiración, ya que diversos estudios han mostrado que la relación de respiración a

fotosíntesis es constante en muchos cultivos (Gifford, 1995; Dewar,1996). Experimentos de Olesen y Grevsen (1997), para coliflor, y de Wheeler *et al*. (1993), para lechuga, demuestran que el valor del coeficiente de conversión decrece con el incremento en la intensidad de la luz.

La función de demanda de asimilados se presenta no sólo para regular su asimilación, sino que también sirve como mecanismo para su distribución en varios órganos. Muchos modelos usan un esquema simple en donde el coeficiente de distribución depende de la edad del cultivo (Weir *et al*., 1984; Spitters *et al*., 1989). La distribución de la masa seca es el resultado final del flujo de asimilados transportados desde los órganos fuente hasta los órganos de demanda (Marcelis, 1996).

El diseño, formulación, estructuración y uso de los modelos de simulación de cultivos se ha incrementado durante los últimos años, principalmente para asegurar la productividad del cultivo y evaluar el impacto que el ambiente y el tipo de manejo puedan tener sobre las características del cultivo. El estudio de modelos de crecimiento comenzó en 1960 y algodón (*Gossypium hirsutum* L) fue uno de los primeros estudiados (Li *et al*., 2009). Para algodón existen numerosos modelos de crecimiento, entre otros: SIMCOT (Duncan, 1972), SIMCOT II (McKinion *et al*., 1975), COTCROP (Jones *et al.,* 1980), GOSSYM (Baker *et al*., 1983), KUTUN modelo mecanístico (Mutsaers, 1984), OZCOT (Hearn, 1994), COTCO2 (Wall *et al.*, 1994), COTGROW (Pan *et al*., 1997), Virtual COTONS (Jallas *et al*., 2000; Hanan y Hearn, 2003). GOSSYM (Fye *et al*., 1984; Reddy y Baker, 1988, 1990; Boone *et al.*, 1993) simula la dinámica del desarrollo, crecimiento y rendimiento de las plantas de algodón. Con estudios de ecofisiología en algodón, se desarrolló COTTAM (Jackson *et al*., 1988; Larson *et al*., 1996), más amigable en la entrada de datos como condiciones de clima, parámetros de suelo y variables de manejo encadenadas a modelos fisiológicos y de arquitectura de algodón. Sin embargo, ninguno de los modelos simula distribución de biomasa para el trópico.

La distribución de la materia seca entre las distintas demandas de la planta, es un parámetro que en la actualidad tiene bastante peso en la selección de materiales por productividad, dado que es más importante la mayor distribución hacia órganos económicos que la fotosíntesis total de la planta (Daie, 1985; Azcon-Bieto y Talon, 2000).

El genotipo, el estado de desarrollo de la planta, diferentes condiciones de crecimiento y la regulación interna de la planta pueden afectar la distribución de masa seca (Marcelis, 1996). La distribución de la masa seca dentro de los órganos cosechables contribuye al rendimiento del cultivo, por lo que es importante hacer correctamente la simulación de la distribución de la masa seca (Marcelis *et al*., 1998). Para algodón la dinámica de producción de materia seca y la demanda reproductiva tienen un significativo impacto sobre el rendimiento de diferentes genotipos (Wells y Meredith, 1984; Quisenberry y Roark, 1976; Stiller, 2000).

La estructura básica del modelo potencial generado en el presente estudio se fundamenta en la interceptación de luz, su conversión en producción de fitomasa seca diaria y la distribución entre los diferentes órganos de la planta, modelo basado en el trabajo propuesto para estudiar el crecimiento de cultivos desarrollado en Wageningen por Spitters y Schapendonk (1990), y Kooman (1995).

El crecimiento se define como un aumento constante en el tamaño de un organismo, acompañado de procesos como la morfogénesis y la diferenciación Taiz y Zeiger (1991). Un primer nivel de estudio, se centra en el aumento de materia seca en el tiempo, (Goudriaan y Van Laar, 1995).

En el análisis del crecimiento de los cultivos, se utiliza el área foliar, como una medida de la magnitud del sistema asimilatorio, y la materia seca, como medida del material vegetal presente. La interpretación cuantitativa del crecimiento se ha desarrollado mediante enfoques matemáticos que describen el comportamiento fisiológico de la planta a partir de los procesos de división y alargamiento celular, métodos utilizados de forma convencional para los cultivos a libre exposición y en menor proporción para cultivos en sustratos (Floréz *et al*., 2006).

Los modelos funcionales de crecimiento no tienen en cuenta explícitamente los efectos del ambiente. Por lo tanto, las funciones son básicamente descriptivas y se ajustan a unas condiciones específicas, sin que se puedan extrapolar los resultados a otras condiciones (Marcelis *et al*., 1998). Además, para la determinación de los valores de estos índices, se requieren muestreos destructivos secuenciales durante el ciclo del cultivo, lo cual no

permite la obtención de curvas precisas que describan el crecimiento, y dificulta la demostración de diferencias entre tratamientos en el análisis estadístico (Poorter, 1989).

Por el contrario los modelos mecanísticos proveen explicaciones y respuestas que integran el mecanismo y contribuyen al entendimiento del proceso bajo estudio (Prusinkiewicz, 1998).

Loomis y Williams (1963), con base en la radiación incidente calcularon que la máxima producción de carbohidratos producida por el dosel fue de 77 g de fitomasa seca m^{-2} d^{-1}, este valor incluía la corrección del 33% de la pérdida por la respiración. Sin embargo, Baker y Hesketh (1969) calcularon para algodón bajo las condiciones de Mississippi en el mes de Julio de 1966 la máxima tasa de crecimiento del cultivo (TCC), utilizando el 10% como respiración de mantenimiento y el 56% de crecimiento su valor fue de 42 g m^{-2} d^{-1} y decreció hasta 10 g m^{-2} d^{-1} en Septiembre, el potencial de rendimiento fue de 3.650 $kg \cdot ha^{-1}$, valor que se alcanzó con aproximadamente 240 cápsulas por metro cuadrado (1,5 g de fibra por cápsula).

Kerby *et al*. (1987) citado por Bourland y Watson (1990), reportaron que típicamente la TCC del algodonero durante la floración está entre 17 y 19 g m^{-2} d^{-1}.

La tasa de difusión del K, la tasa de crecimiento radical, la longitud de la raíz y su superficie, están asociadas con la eficiencia en la adquisición de K por el sistema radical (Silberbush y Barber, 1983; Chen y Gabelman, 2000). La tasa de absorción de K por el algodón depende de la longitud de raíces, densidad y área total superficial (Brouder y Cassman, 1990); aunque el sistema radical del algodón presenta baja densidad relativa comparada con los demás cultivos limpios (surcos), es un factor que disminuye la tasa de absorción.

La cantidad total de K absorbido por una planta de algodón es afectada por la dosis del abono potásico (Halevy y Bazelet 1992), y su valor total varía de 85 a 390 $kg \cdot ha^{-1}$ a medida que la cantidad de abono se incrementa de 0 a 560 $kg \cdot ha^{-1}$. Con 280 $kg \cdot ha^{-1}$ se alcanzó la máxima producción del algodón sin desmotar y el equivalente a una relación de 0,13 kg de K por kg de fibra. La absorción de K por encima de este nivel resulta en consumo de lujo. Igualmente, Halevy (1977) encontró que la absorción total de K para una producción

promedio de fibra de 1700 kg (0,11 kg de K por kg de fibra) fue de 185 kg·ha^{-1} y que el intervalo de eficiencia del K está entre 0,11 y 0,13 kg por kg de fibra. Halevy y Bazelet (1992) realizaron análisis de absorción por estructura de la planta del algodón y encontraron que los carpelos fueron el mayor depósito de K con un contenido hasta de 4% de K, que representa el 60% del total de K acumulado por la planta.

Halevy (1976) y Basset *et al*. (1970) reportaron que la tasa de absorción de K es lenta al comienzo y se incrementa rápidamente en la floración alcanzando su máximo de 4,6 kg·ha^{-1} d^{-1} entre los 72 y 84 días. Para la fase final de maduración (90 y 127 días) su valor está entre 2,1 y 3,4 kg·ha^{-1} d^{-1}. Malik (1998) reporto que el cultivo del algodón puede absorber de 2 a 3 kg·ha^{-1} de K d^{-1} durante el período de máxima demanda. Cantidades adecuadas de potasio son importantes en la adaptación de los cultivos al estrés causado por factores bióticos y abióticos, tales como sequías, salinidad, heladas, ataques de insectos o enfermedades (Kafkafi, 1990, 1997). El potasio se encuentra normalmente en un rango entre 1 a 4 % de la materia seca (MS), pudiendo alcanzar más del 8 % en algunos casos (Leigh y Wyn-Jones, 1984).

Rimon (1989), Dhindsa *et al*. (1975) y Ting *et al*. (1976) reportaron que el crecimiento de la fibra depende de la presión de turgor y que éste es inhibido cuando decrece el potencial hídrico. La acumulación de malato^{-} y K^{+} en la fibra fueron altos cuando se incrementó la tasa de crecimiento. Ruan *et al*. 2003, encontraron que el potencial osmótico y de turgor fue elevado en la primera fase de elongación de la fibra (10 días después de antesis DDA); sin embargo, el nivel de la extensina fue alto en la fase temprana de elongación (6 DDA) y posteriormente decreció rápidamente. Respecto a los plasmodesmos éstos son permeables de 0 a 9 DDA, se cierran a los 10 DDA y se reabren a los 16 DDA. Tan pronto se cierran los plasmodesmos, la sacarosa y el K^{+} actúan como poder osmótico en la fibra. Estos resultados sugieren que la elongación de la fibra inicialmente se da por el ablandamiento de la pared celular y finalmente termina por el incremento en la rigidez de la pared celular y menor poder turgor. Para el desarrollo de la fibra las fases son cuatro: fase de elongación 0 a 15 después de antesis (DDA), fase de transición de 16 a 21 DDA, fase de engrosamiento o de síntesis de pared secundaria de 22 a 32 DDA y fase de maduración después de 32 DDA (Yong-Ling *et al.,* 1997).

El efecto del K sobre el rendimiento de algodón-semilla fue positivo para las aplicaciones edáficas; según Gormus y Kanat (1998) aplicando 20 lb. acre^{-1} de KNO_3 se incrementó el rendimiento significativamente en 81 lb. acre^{-1}, por el aumento en el tamaño y número de cápsulas. De las propiedades de calidad sólo la resistencia se incrementó.

Según Frye (1986) el mayor efecto del potasio se manifiesta en presencia de nitrógeno; por otra parte, la influencia positiva de la fertilización fosfórica en suelos que simultáneamente presentan baja capacidad de suministro de potasio sólo se observa en presencia de este elemento y de nitrógeno.

Cassman *et al*. (1990) trabajando el efecto de la nutrición con potasio sobre el rendimiento en fibra y semilla utilizaron dos variedades del algodón, SJ2 y GC 510, durante 1986 y 1987, y dosis de 0, 120, 240 y 480 kg·ha^{-1}. En el primer año la variedad SJ2 obtuvo un rendimiento en fibra y semilla de 927 y 1579 kg·ha^{-1} respectivamente, mientras que para la variedad GC 510 fueron 1179 y 1842 kg·ha^{-1}. En el segundo año los rendimientos para SJ2 fueron de 980 y 1552 kg·ha^{-1} respectivamente, mientras que para la variedad GC 510 fueron 1220 kg·ha^{-1} para fibra y 1719 kg·ha^{-1} para semilla. Fauconnier (1973) encontró que un cultivo del algodón que produce 560 kg ha^{-1} de fibra absorbe un total de 105 kg N, 42 kg P_2O_5 y 80 kg·ha^{-1} de K_2O, mientras que remueve 40 kg N, 16 kg P_2O_5 y 17 kg·ha^{-1} de K_2O; los 80 kg de K_2O se distribuyeron en la planta así: 5,96 en raíces, 17,31 en tallo, 19.33 en hojas, 20,06 en cápsulas, 14,29 en semillas y 2,58 en fibra.

Gormus y Kanat (1998), utilizando cuatro dosis de K (K_2SO_4) (0, 80, 160 y 240 kg·ha^{-1}), aplicadas la mitad al momento de la siembra y la otra en la etapa de la primera flor, encontraron diferencias estadísticas en el rendimiento de algodón-semilla, siendo el mejor tratamiento el de 160 kg·ha^{-1} de K con 3680 kg·ha^{-1}, superando en 24.3% al testigo, igual comportamiento presentó el rendimiento en fibra.

Gormus y Yucel (2002) trabajando con 0 y 150 kg de K_2O y en fechas de siembra temprana y tardía, encontraron que con la aplicación de K el rendimiento de fibra se incrementó en 11,2%; en general la aplicación de 150 kg de K_2O disminuye el número de días requeridos para iniciar la apertura de cápsulas en 1,8%, comparado con el de no-aplicación de K.

Varios autores reportan que al aplicar K se incrementa en las propiedades: longitud, resistencia y finura. Sabino *et al*. (1984) consolidaron los datos de 10 experimentos desarrollados durante 6 años en suelos latosoles rojos de Brasil, encontraron que trabajando con dosis de 0, 50 y 100 $kg \cdot ha^{-1}$ de K se incrementó la longitud de la fibra, la finura, el índice de madurez, el valor promedio del peso de las cápsulas y de 1000 semillas. Similar comportamiento lo reportó Usherwood (1985), indicando que el K aumenta la finura (de 3,7 a 4,8 $\mu g\ pulg^{-1}$.), el tamaño y la resistencia de la fibra. Lachover y Arnon (1964) también encontraron un incremento en el porcentaje de aceite de la semilla, de 20,3 a 27,3%, al comparar plantas sin fertilización y plantas fertilizadas con K en un suelo con deficiencia de dicho elemento.

El efecto conjunto sobre el rendimiento y la calidad de la fibra también mostró tendencia al aumento, como lo demuestra Dosterhuis *et al*. (1990) evaluando en Arkansas la efectividad de aplicaciones foliares de nitrato de potasio, los resultados indicaron que los rendimientos aumentaron con aplicaciones de nitrato de potasio vía foliar sólo, o en combinación con aplicaciones de cloruro de potasio al suelo, de igual manera sucedió cuando se evaluó calidad de fibra, ya que se incrementó la uniformidad de la fibra.

Pettigrew *et al*. (1996), evaluando varios genotipos, reportaron que la deficiencia de K asociada al tratamiento de 0 potasio redujo el rendimiento de fibra en 9%, el porcentaje de fibra en 1%, la elongación en 3%, la finura en 10%, la madurez de la fibra en 5% y el perímetro en 1%.

En China (Planicie de Jianghan), en varias localidades, desde 1981 a 1985, y en suelos con bajos contenidos de K, encontraron que la aplicación de K incrementó el rendimiento en 16,5%. El rendimiento de fibra se incrementó por 1,15 kg por kg de K aplicado. El número de cápsulas por planta incrementó del 8 – 20%, el peso de 100 cápsulas de 5 – 10%, el porcentaje de fibra de 0,1 a 0,3%, la longitud de fibra en 2,12 mm y la resistencia de la fibra 0,36 g tex^{-1}. Además el abonamiento potásico incrementó el vigor radical, previniendo la senescencia temprana y mejorando la resistencia al marchitamiento (Chaina, Soils and Fertilizers Working Station, 1987).

Halevy y Markovitz (1988), trabajando con aplicación edáfica y foliar de NPKS, no encontraron diferencia en el rendimiento de fibra, ni en el peso promedio de cápsulas y reportaron que la utilización de abonos foliares depende de la disponibilidad de nutrientes en el suelo.

Las brácteas en la formación del botón floral producen solamente la mitad de las necesidades de asimilados para dicho órgano en crecimiento y con apenas el 5% y máximo 8%, las necesidades del fruto en crecimiento (Hearn y Constable, 1984). El período de floración en algodón es de cerca de 6 semanas y está asociado con el incremento en la toma de nutrientes del suelo. En condiciones ideales de crecimiento (temperatura promedio del aire 30°C) las flores son producidas a intervalos de 3 días sobre el primer nudo de las ramas fructíferas (simpodiales) de la planta, y en intervalos de 3–4 días en nudos fuera de las ramas simpodiales (Gerik *et al*., 1998). Las fibras se originan de la cubierta externa de la semilla en desarrollo y su desarrollo ocurre en tres procesos conocidos como elongación, engrosamiento de la pared secundaria o maduración y secamiento (Davidonis *et al*., 2004). La elongación de la fibra comienza cerca a la antesis, con máxima longitud hasta 20-25 días después de antesis (DDA) (DeLanghe, 1986). Para el crecimiento y elongación la interacción malato potasio es usada para incrementar la presión de turgor (Ramey, 1986). La fibra comienza a engrosar a los 15–20 DDA y la celulosa en la pared secundaria en formación hasta cerca de los 50 DDA. La celulosa es depositada formando diferentes ángulos durante el proceso de engrosamiento, influyendo en la determinación de la resistencia de la fibra (Davidonis *et al*., 2004). El grado de deposición de la pared secundaria determina la madurez de la fibra.

Micronaire es una propiedad de la fibra que mide la madurez y la finura de la fibra, entonces, células de fibra con igual grosor de pared pueden presentar diferente valor de micronaire (Davidonis *et al*., 2004). El micronaire tiende a incrementarse cuando hay un amplio suministro de carbohidratos en la madurez de las cápsulas en la planta (Pettigrew, 2001), y está relacionado linealmente con la cantidad de fotosíntesis del dosel producida entre los 15 a 45 días después de floración (Bauer *et al*., 2000). Según Meredith (1994) la finura se define 40 días después de la floración y tiene gran influencia del ambiente y del manejo agronómico del cultivo.

La longitud de la fibra siempre ha sido importante en la textilería; sin embargo, con la introducción de la tecnología de rotor en la industria textil en 1970, el micronaire y la resistencia incrementaron su importancia relativa frente a las otras características de calidad. Deussen (1986) y Pettigrew *et al*. (1996) encontraron que suplementos de N y K no afectaron la resistencia, pero adiciones de K incrementaron la elongación de la fibra.

Plantas bien nutridas con potasio presentan mayor síntesis de material para la formación de pared celular y frecuentemente las paredes son más gruesas debido a la mayor deposición de celulosa y compuestos relacionados, promoviendo mayor estabilidad y aumento en la resistencia de las plantas al acame e infestaciones por enfermedades y plagas (Pretty, 1982; Beringer y Nothdurft, 1985).

Ruan *et al*. (2003) encontraron que fibras de algodón con alto contenido de celulosa no se forman si la actividad de la sacarosa sintetasa disminuye significativamente, y concluyeron que existe asociación entre la sacarosa sintetasa y la biosíntesis de la pared celular. La UDP-glucosa, producto de la sacarosa sintetasa está implicada en la formación de almidón (Asano, 2002), en la síntesis de calosa en fibras de algodón (Subbaiah y Sachs, 2001; Salnikov *et al*., 2003), y en la síntesis de diversos polisacáridos constituyentes de la pared celular (Albrecht y Mustroph, 2003).

El K es activador de más de 50 sistemas enzimáticos, entre los que se destacan óxido reductasas, deshidrogenasas, transferasas, sintetasas y quinasas (Azcon-Bieto y Talon 2000; Marschner, 2002). Otra función del K es la activación de la ATPasa protónica que a su vez requiere de Mg^{+2} (Fischer y Hodges, 1969). Esta activación no sólo facilita el transporte de K desde la solución externa a través de la membrana plasmática hacia el interior de las células radicales, sino que también hace al potasio el elemento mineral más importante en la extensión celular y osmorregulación (Marschner, 2002).

La sacarosa sintetasa (SS, EC.2.4.1.13) está implicada en la biosíntesis de almidón y celulosa por el suministro de UDP-glucosa, como precursor y por ser un sustrato inmediato respectivamente (Chourey *et al.,* 1991; Chourey y Miller 1995; Delmer y Amor, 1995).

El potasio actúa en el metabolismo enzimático activando la almidón sintetasa, sacarosa fosfato sintetasa y otras enzimas, y en el transporte de carbohidratos (Mengel y Kirkby,

1979); Malavolta, 1980; Marschner, 2002). De acuerdo con Marschner (2002), existe relación inversa entre la concentración de potasio y el contenido de azúcares en los tejidos.

El potasio desempeña un papel importante en el transporte de sacarosa y de los fotosintetizados de las hojas para los órganos de almacenamiento. Durante este camino, los productos asimilados pasan por tres sistemas: a) difusión en el simplasto y espacio libre; b) transporte activo a través de la membrana citoplasmática para el floema y c) flujo pasivo por los tubos cribosos. El potasio influencia los tres procesos, en particular los dos últimos (Header, 1977, citado por Malavolta y Crocomo, 1982). En relación al último proceso, Marschner (2002) reporta que la función del potasio es mantener el pH alto en los tubos cribosos, facilitando así el transporte de sacarosa. Por tanto, un suministro adecuado de potasio aumenta la síntesis de carbohidratos en razón de la mayor tasa fotosintética, y la eficiencia en la translocación de esos compuestos.

La SS presenta una característica potencial de movilizar sacarosa dentro de diversas vías que son importantes para funciones metabólicas, estructurales y de almacenamiento en las células vegetales (Heinleing y Starlinger, 1989). Esta enzima cataliza una reacción reversible, pero está preferencialmente presente en la conversión de sacarosa en fructosa y UDP-glucosa (Chourey y Nelson, 1979; Geingenberger y Stitt, 1993).

La SS desempeña un papel importante en la formación de la pared celular del endospermo de algodón por el suministro de UDP-glucosa para la biosíntesis de celulosa (Chourey *et al*., 1991; Chourey y Miller, 1995; Carlson y Chourey, 1996). En fibra de algodón también está fuertemente soportada ésta actividad por estudios bioquímicos realizados por Amor *et al*. (1995). La formación de la pared secundaria de la fibra comienza 15 DDA y es caracterizada por la deposición masiva de celulosa, que constituye más del 90% del peso seco de la célula de fibra madura (Basra y Malik, 1984; Delmer y Amor, 1995).

Es importante la función de la SS en el desarrollo de la semilla de algodón, dado que es el único sistema donde simultáneamente se presentan diversos modelos de distribución de carbono. La semilla de algodón la constituyen tres tipos de tejidos: (a) fibras de celulosa derivadas de la cubierta epidermal de la semilla, (b) testa de la semilla, donde termina el floema y (c) el embrión, que está constituido principalmente por cotiledones aislados de la

testa de la semilla (Hendrix, 1990). La SS aparece como la enzima de mayor actividad comparada con la invertasa en la degradación de sacarosa en semillas de algodón (Hendrix, 1990).

Trabajando *in vitro* con sacarosa [^{14}C] en fibras independientes de algodón, se encontró una rápida incorporación de ^{14}C en la nueva síntesis de celulosa (Amor *et al.,* 1995), esto indica el papel de control de la SS en la biosíntesis de celulosa en fibra de algodón (Amor *et al.,* 1995; Delmer y Amor 1995). Huber (1983) concluyó que la deficiencia de K disminuye la tasa de exportación de fotoasimilados por estar asociado con la disminución de la actividad de la sacarosa fosfato sintetasa, enzima clave en la síntesis de sacarosa, además, la hidrólisis de la sacarosa se incrementa. Hendrix y Grange (1991) también encontraron que la tasa de exportación de carbono de la hoja en la noche está relacionada con la concentración de almidón al final del día.

Para Amor *et al.* (1995) durante el desarrollo de la fibra de algodón, cerca de la mitad del total de SS está altamente asociada con la membrana plasmática, con base en esto, Delmer y Amor (1995) propusieron un modelo en que algunas formas de SS están asociadas con el complejo de síntesis de celulosa y sirve como el canal directo de carbono para la sacarosa vía el complejo de UDP-glucosa.

La fluorescencia de la clorofila es ampliamente usada como una prueba muy sensible e intrínseca de las reacciones fotosintéticas (Papageorgiou, 1975; Schreiber *et al*., 1994; Mohammed *et al*., 1995). La fluorescencia inicial (F_0) representa el tamaño de la antena de clorofila en el PS II, la integridad funcional de los centros de reacción del PS II (Krause y Weis, 1991) y el mínimo rendimiento de muestra adaptada a la oscuridad cuando todos los centros de reacción de PS II están completamente abiertos (Maxwell y Johnson, 2000); y la máxima fluorescencia (F_m) refleja el estado del PS II cuando todos los centros de reacción están cerrados. Por lo tanto, la proporción de la variable de máxima fluorescencia (F_v/F_m) es una medida de la óptima eficiencia fotosintética del PS II (Genty *et al*., 1987). La eficiencia fotosintética del PS II (F_v/F_m) es un método ampliamente utilizado para detectar estrés temprano (Baker y Rosenqvist, 2004).

En algodón durante el inicio del estrés por déficit hídrico, el transporte de electrones es promovido por la alta eficiencia en la apertura de los centros de reacción del PS II. La energía adicional es usada para incrementar la tasa de fotorrespiración, mientras que la fotosíntesis permanece constante o disminuye un poco (Massacci *et al*., 2008). Pettigrew (2004) trabajando bajo condiciones de déficit hídrico e irrigación con seis genotipos de algodón de hoja normal y dos tipos okra de algodón UPLAND, encontró que para F_v/F_m no hubo diferencias entre los genotipos y lo tratamientos.

El bajo número de publicaciones encontradas y de temáticas tratadas dan cuenta del estado elemental del conocimiento trabajando bajo condiciones tropicales.

El objetivo de este trabajo fue establecer un modelo simple de distribución de masa seca y determinar el efecto del potasio en el crecimiento,producción de algodón-semilla, fibra, calidad, la fluorescencia de la clorofila y en la actividad de sacarosa sintetasa en las plantas de algodón. La información generada permitirá un manejo eficiente del potasio en algodón para la zona de estudio.

3.3. MATERIALES Y MÉTODOS

El experimento se realizó en el Centro de Investigación (C.I.) "Nataima", de CORPOICA, localizado en el municipio de Espinal (Tolima), ubicado en las coordenadas geográficas: 4° 12' Latitud Norte y 74° 56´Longitud Oeste, altitud de 430 msnm, temperatura promedio de 28°C, humedad relativa del 70% y precipitación promedio de 1300 mm·año^{-1}. Las características del suelo en el sitio experimental fueron textura franco-arenosa, pH 6,59, materia orgánica 0,57%, P 15,5 mg kg^{-1}; Ca 2,0, Mg 0,15 y K 0,13 mmol kg^{-1}, contenidos en el horizonte A o primeros 20 cm de profundidad del suelo. Por medio de la estación meteorológica del C.I. Nataima fueron medidas las variables ambientales como temperatura, humedad relativa, brillo solar, precipitación y evaporación durante el tiempo del experimento de marzo a Julio de 2006 (Tabla 3.1).

Tabla 3.1 Promedio diario para temperatura máxima, temperatura mínima, humedad relativa, brillo solar y radiación, y mensual para precipitación y evaporación durante el tiempo del experimento, año 2006

Variable climática	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio
Temperatura Máxima (°C)	31,37	31,26	32,37	32,28	34,10
Temperatura Mínima (°C)	21,75	20,95	21,32	21,25	20,57
Humedad Relativa (%)	76,16	78,56	74,26	69,82	61,12
Brillo solar (h)	3,36	4,67	5,98	6,13	6,47
Precipitación (mm)	185,00	183,80	255,80	69,90	46,20
Evaporación (mm)	123,90	119.66	134,23	154,00	212,88
Radiación (MJ m^{-2} d^{-1})	14,7	16,6	17,8	17,5	18,2

Las variedades sembradas fueron CORPOICA-M-123 y DELTA–OPAL, ésta última se caracteriza por presentar alta rentabilidad en el Valle Cálido del Alto Magdalena, y representar el 18% del área sembrada en el 2005-A. Las principales características de CORPOICA-M-123 en el Valle Cálido del alto Magdalena son: rendimiento de algodón-semilla en campo 2791 kg·ha^{-1}, 1173 rendimiento fibra kg·ha^{-1}, porcentaje de fibra 43 y de calidad micronaire 4,2 µg $pulg^{-1}$, longitud 29,7 mm, uniformidad 51,3%, resistencia 31,2 g tex^{-1} (Mendoza, *et al*., 2001). Para DELTA-OPAL el rendimiento de algodón semilla en campo fue de 2800 kg·ha^{-1}, 39% de fibra, micronaire 4,6 µg $pulg^{-1}$, resistencia 29,2 g tex^{-1} (ICA, 2006).

Los dos materiales genéticos fueron evaluados con cinco dosis de potasio 30, 60, 90, 120 y 150 (kg·ha^{-1} de K) y aplicado en forma edáfica. Cada dosis se distribuyó durante tres épocas: 1) al momento de la siembra (100% de P + 30% de K + 100% de elementos menores), 2) etapa vegetativa (5 hojas) (40% de K + 50% de N) y, 3) en la etapa juvenil (10 nudos) (50% de N y 30% restante de K). Como fuente se utilizó KCl, colocándolo en banda a un lado del surco. Para la nutrición del ensayo los elementos restantes, excepto el potasio, se suministraron según las demandas del cultivo y su disponibilidad dada por el análisis de suelos. El manejo del riego se realizó con base en el balance hídrico.

El diseño estadístico utilizado fue el de bloques completos al azar en arreglo de parcelas divididas, como parcela principal se asignaron las variedades y a las subparcelas las dosis de potasio con 4 repeticiones. Cada tratamiento constó de 12 surcos distanciados a 0,75 m y

con una longitud de 20 m que cubrió 180 m^2, y por repetición 900 m^2. El área útil total de experimento fue de 3600 m^2 y de cosecha 30 m^2.

Se realizaron 5 lecturas de evaluación, correspondientes a cada etapa de desarrollo del cultivo. (1) Etapa vegetativa a la 4ª hoja, (2) etapa juvenil, nudo 11º o 3ª – 4ª rama fructífera, (3) Etapa reproductiva (60 días), (4) Maduración, apertura de primeras cápsulas (105 días) y (5) a cosecha.

Para el modelo de masa seca se utilizaron los datos del tratamiento con máxima utilización de potasio en cada una de las variedades y, porque su manejo agronómico se realizó sin restricción.

Para la determinación del crecimiento en cada muestreo se tomaron 5 plantas al azar por tratamiento de los surcos laterales sin incluir los bordes. Las plantas fueron disectadas en hojas, tallo, ramas, pecíolo, flores y cápsulas, y para determinar su peso seco las muestras se colocaron en estufas a 72°C durante 72 horas hasta alcanzar peso constante y luego se pesaron en balanzas OHIOS. Así mismo, se midieron variables directas indicadoras de crecimiento como altura, número de nudos y área foliar.

Con los datos colectados se calculó, para cada tratamiento y variedad, el peso total y se ajustaron modelos exponenciales (Flórez *et al.,* 2006) de crecimiento utilizando el procedimiento NLIN del módulo STAT del programa estadístico SAS. A partir de las ecuaciones generadas se calcularon algunos índices de crecimiento o determinantes fisiológicos empleando las ecuaciones descritas por Hunt (1982); Hunt (1990); Gardner *et al*. (2003) y Floréz *et al*. (2006):

La tasa relativa de crecimiento (TRC) es un índice de eficiencia que expresa el crecimiento en términos de una tasa de incremento en tamaño por unidad de tamaño y tiempo, este índice representa la eficiencia de la planta como productor de nuevo material y se propone como una medida que integra el comportamiento fisiológico de las plantas, tomando como referencia el valor inicial de la masa seca producida y acumulada (Hunt 1982; Hunt 1990; Gardner *et al*., 1985; Floréz *et al.,* 2006).

$TRC = \frac{1}{w} * \frac{\partial w}{\partial t}$, , en donde w= peso seco total; t= tiempo.

La tasa de asimilación neta (TAN) indica la eficiencia fotosintética promedio, individual o en una comunidad de plantas; la capacidad de la planta para incrementar su masa seca en función del área asimilatoria en periodos cortos, a lo largo del ciclo de crecimiento; depende del área foliar, de la disposición y edad de las hojas y de los procesos de regulación interna relacionados con la demanda de los fotoasimilados (Hunt, 1982). Este índice es una medida promedio de la eficiencia de las hojas de la planta o del dosel del cultivo (Brown, 1984).

$TAN = \frac{1}{AFO} * \frac{\partial w}{\partial t}$, en donde w= peso seco total; t= tiempo; AFO=área foliar total.

El índice de área foliar (IAF) expresa la superficie de la hoja por unidad de área de superficie ocupada por la planta. Aumenta con el crecimiento del cultivo hasta alcanzar valor máximo, en el cual se alcanza la máxima capacidad para interceptar energía solar (Hunt 1982; Hunt 1990; Gardner *et al*., 1985).

$IAF = \frac{AFO}{p}$, AFO= área foliar y P= área ocupada por la planta.

La tasa de crecimiento del cultivo (TCC) se expresa en términos de masa seca por unidad de superficie y tiempo, mide la ganancia de biomasa vegetal en el área de superficie ocupada por la planta. Es aplicable a las plantas que crecen juntas en cultivos cerrados (Hunt, 1982). La máxima TCC ocurre cuando las plantas son suficientemente grandes o suficientemente densas para explotar todos los factores ambientales en mayor grado (Hunt 1982; Hunt 1990; Gardner *et al.,* 1985; Floréz *et al*., 2006). En ambientes favorables la máxima TCC ocurre cuando la cobertura de las hojas es completa y puede representar el máximo potencial de producción de masa seca y de tasas de conversión de energía en una especie dada.

TCC = TAN * IAF

Modelo de producción potencial:

Estimación de los parámetros

Los parámetros del modelo de masa seca son: uso eficiente de la radiación (RUE), coeficiente de extinción de la luz (k) y los coeficientes de distribución de la masa seca por órgano de la planta. Estos parámetros se obtuvieron por medio de la herramienta SOLVER del programa EXCEL que es un método iterativo de estimación lineal que busca estimar los parámetros de manera que la suma de cuadrados de las desviaciones entre valores observados y los estimados por el modelo sea mínima.

Componentes del modelo

Para la generación del modelo, las horas de brillo solar se transformaron en radiación fotosintéticamente activa (PAR en MJ), según la metodología propuesta por Angstrom (1924). Se usó un modelo matemático multiplicativo determinístico con los componentes: radiación fotosintéticamente activa (PAR) y fracción de luz interceptada (F_{LINT}), en función del índice de área foliar y de los parámetros coeficiente de extinción de luz (k) y uso eficiente de la radiación (RUE). El k se determinó por medio de la barra cuántica y utilizando la ley de Beer.

Tasa de crecimiento diario del cultivo ($g \cdot m^{-2}\ d^{-1}$)

Se determinó, con la ecuación propuesta por Monteith (1996), Gosse *et al.* (1986) y Kooman (1995): $\delta Wt = F_{LINT\ t} \cdot PARFt \cdot RUE$, donde:

δWt: incremento de la masa seca total de la planta ($g \cdot m^{-2} \cdot d^{-1}$) en el tiempo t.

$F_{LINT\ t} = (1-e^{-k \cdot IAF})$, fracción de luz interceptada en el tiempo t; k coeficiente de extinción de la luz y IAF índice de área foliar del cultivo.

PARt: radiación fotosintéticamente activa en el tiempo t ($MJ \cdot m^{-2} \cdot d^{-1}$).

RUE: uso eficiente de la radiación ($g \cdot MJ^{-1}$).

Simulación

La simulación es la integración numérica de la tasa de crecimiento diario del cultivo. Para obtener la masa acumulada en el tiempo t (Wt), se usó el método de Euler con

$\Delta t=1$ (día).

$Wt = Wt^{-1} + \delta wt\Delta t$

Para la estimación de los parámetros k y RUE se utilizó el método de optimización no lineal con SOLVER de Excel. Este método iterativo minimiza la suma de cuadrados de la diferencia entre el valor observado y el valor simulado.

Modelo de distribución de masa seca:

Los coeficientes de distribución α_o son las proporciones de la masa seca total que se asignan a hojas, tallos y frutos, dependiendo del estado de desarrollo vegetativo o reproductivo (Marcelis, 1994; Kooman, 1995).

La masa seca de cada órgano se simuló con la ecuación de Euler:

$W_{ot} = W_{ot-1} + \alpha_o\delta Wt\Delta t$, donde:

W_{ot}: es masa seca total de un órgano: hojas (W_{ht}), tallos (W_{tt}), flores (W_{ft}) o cápsula (W_{ct}) en el día t ($g\cdot m^{-2}\cdot d^{-1}$).

$W_{o(t-1)}$: es la masa seca de hojas (W_{ht-1}), tallos (W_{tt-1}), flores (W_{ft-1}) o cápsulas (W_{ct-1}) en el día t-1 ($g\cdot m^{-2}\cdot d^{-1}$).

α_o: coeficiente de distribución de hojas (α_h), tallos (α_t), flores (α_f) o cápsula (α_c) y $\Sigma\alpha_o=1$.

δW_t: tasa de crecimiento diario de masa seca total ($g\cdot m^{-2}\cdot d^{-1}$).

Δt: incremento a través del tiempo (1 día).

Para el análisis del contenido de potasio foliar se realizaron dos muestreos, el primero a los 35 DDE y el segundo a los 90 DDE, se seleccionaron 5 plantas al azar por tratamiento, y sobre éstas se tomó la quinta hoja totalmente expandida de arriba hacia abajo y con ellas se

conformó la muestra para el análisis de tejido. Las muestras se tomaron en las horas de la mañana (8:00 a 11:00 h).

Las variables evaluadas para cosecha fueron: rendimiento de algodón-semilla, rendimiento de fibra y calidad de la fibra. El análisis físico de la fibra se realizó usando el HVI (High Volume Instrument) en el laboratorio de Diagonal, determinando en cada uno de los tratamientos las principales características de calidad: diámetro o micronaire, longitud, resistencia, uniformidad, madurez y elongación.

La fluorescencia de la clorofila fue medida usando un fluorómetro portátil no modulado (Handy Pea-Hansatech). La lectura de la fluorescencia de la clorofila se realizó de las 2:00 a 4:00 h. para cada tratamiento, en la quinta hoja de arriba hacia abajo, de tres plantas seleccionadas. La máxima eficiencia fotoquímica del fotosistema II (PS II) fue calculada según (Butler, 1978; Maxwell y Johnson, 2000), como:

$$Eficiencia..PSII = \frac{(F_m - F_o)}{F_m}, \qquad (1)$$

Las lecturas se realizaron a los 88 y 95 días después de emergencia (DDE) en la etapa reproductiva del cultivo del algodón.

Para el análisis de laboratorio se colectaron hojas, pecíolos, brácteas, carpelos y fibra que en días correspondiera a 88 DDE. Se colectó la quinta hoja de arriba hacia abajo o totalmente expandida e inmediatamente se congeló. La cápsula compuesta por bráctea, carpelo y fibra se seleccionó del tercio medio, cápsulas previamente marcadas en posición 1 del 8° nudo de arriba hacia abajo y que en días correspondiera a 30 DDE (fase de máximo engrosamiento de la fibra), posteriormente se congelaron y almacenaron a -10°C hasta su procesamiento.

Para la extracción de SS (EC.2.4.1.13) las muestras de pecíolo, hoja, bráctea, carpelo y fibra fueron maceradas con nitrógeno líquido. Las fibras fueron retiradas de la cápsula con bisturí. Posteriormente, para cada uno de los casos, los tejidos fueron homogenizados en la proporción de 0,2 g de muestra en 1.5 ml de solución extractora (Tris-HCl 500 mM pH 7,5 conteniendo EDTA 40 mM y ácido ascórbico 50 mM) y 100 mg de PVPP. El extracto

resultante fue centrifugado a 11000*g durante 10 minutos a 4°C. El sobrenadante de 300 µL, fue desalinizado en 300 mg de Sephadex G-25 previamente hidratado en agua DD y se agitó por 1 minuto, se dejó en reposo durante 15 minutos a 4ºC repitiendo la actividad tres veces y posteriormente fue centrifugado a 4000 * g por 5 minutos a 4ºC. El sobrenandante obtenido fue utilizado para las determinaciones de actividad enzimática.

La cuantificación de la proteína total soluble de los extractos enzimáticos fue realizada con base en lo descrito por Bradford (1976), utilizando albúmina de suero bovino BSA 1mg ml^{-1}, como patrón y el cálculo se realizó con base en lo descrito por Zor y Selinger (1996).

La actividad de la SS fue determinada en medio saturante compuesto por 50 µL de Tris-HCl 54 mM pH 7,5, conteniendo fructosa 10 mM, UDP-glucosa 10 mM, MgCl2 15 mM y 50 µL de extracto enzimático. La reacción se inició incubando el extracto enzimático a 33°C durante 45 minutos y ésta se interrumpió con la adición de 200 µL de NaOH 1 M y 10 minutos de calentamiento a 100ºC para destruir las hexosas no reactivas y hexosas fosfato. La sacarosa formada fue determinada por el método del ácido tiobarbitúrico (TBA), descrito por Percherón (1962) y calculada por la curva estándar medida a 432 nm.

3.4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La figura 3.1 muestra los valores de los análisis foliares realizados a los 35 (1er análisis) y a los 90 DDE (2do análisis). En el primer muestreo la tendencia es consistente con las dosis utilizadas y con la segunda época de aplicación de potasio. Los valores encontrados en la figura 3.1, para el primer muestreo presenta deficiencia para el tratamiento de 30 $kg \cdot ha^{-1}$ de K, porque se encuentra su valor por debajo de 12 g kg^{-1} de MS según lo reportado por Reddy y Zhao (2005) quienes además, encontraron que el valor crítico de K foliar para la fotosíntesis, biomasa y crecimiento del tallo fue 12 g kg^{-1} MS y para la expansión del área foliar fue 17 g kg^{-1} MS. Para las dosis mayores o iguales a 60 $kg \cdot ha^{-1}$ de K sus valores están ligeramente por encima según lo reportado por Reddy y Zhao (2005).

En el segundo muestreo los valores no mostraron diferencia por ser la etapa final del ciclo del cultivo y sus valores están por debajo de 12 g kg^{-1} MS y se explica porque es el final del

ciclo del cultivo y la distribución del potasio está en las estructuras de demanda como las cápsulas y botones florales, siendo muy poco el que se encuentra en las hojas .

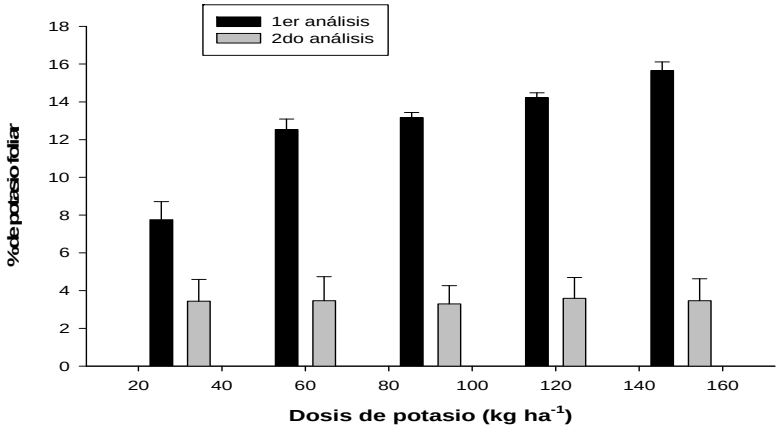


Figura 3.1 Análisis foliar de potasio durante los muestreos 35 y 90 DDE

3.4.1. Modelo potencial de distribución de materia seca

3.4.2. Radiación fotosintéticamente activa y fracción de luz interceptada

La radiación fotosintéticamente activa (PAR), durante los meses de marzo-julio de 2006 en el Centro de investigación de Nataima (Figura 3.2), presentó una fluctuación entre 8,8 y 23,6 $MJ \cdot m^{-2} \cdot d^{-1}$, durante todo el ciclo del cultivo. Para la etapa vegetativa-juvenil la fluctuación estuvo entre 9,10 y 23,65 $MJ \cdot m^{-2} \cdot d^{-1}$ que correspondió a los meses de marzo y abril, para la etapa reproductiva la fluctuación se presentó entre 10,17 y 23,54 $MJ \cdot m^{-2} \cdot d^{-1}$ que correspondió a los meses de mayo a julio.

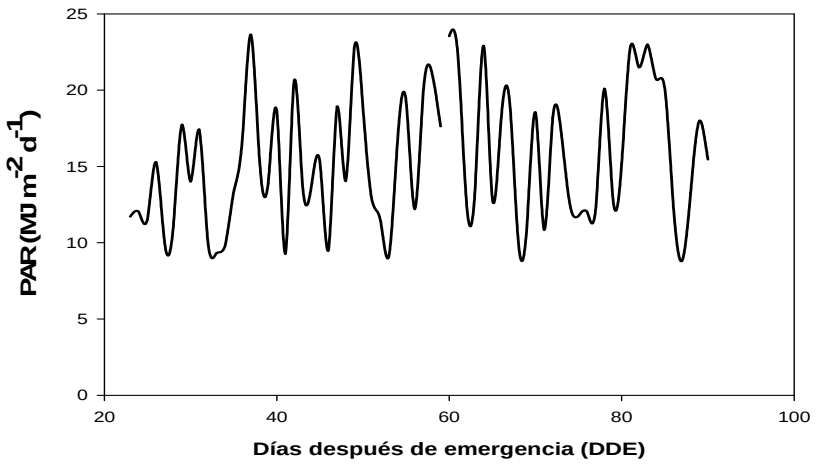


Figura 3.2 Comportamiento de la radiación fotosintéticamente activa (PAR) durante los meses de marzo – julio de 2006

En modelos que tienen como base la fotosíntesis, primero se calcula la intercepción de la luz por el área foliar para simular la producción de fotoasimilados; posteriormente, se calculan los fotoasimilados usados para la respiración, la conversión a masa seca estructural, la distribución de asimilados o masa seca de los diferentes órganos de la planta y, por último, el peso fresco se puede estimar a partir del peso seco (Marcelis *et al.,* 1998).

La variedad CORPOICA-M-123, 70 DDE alcanzó el máximo IAF de 5,95, con la F_{LINT} igual a 0,976; para DELTA-OPAL el máximo valor de IAF se alcanzó a los 72 DDE correspondiente a 6,31 y con la F_{LINT} igual a 0,985. La F_{LINT} se mantuvo constante de los 66 a los 76 DDE y su máximo valor fue similar para las dos variedades (Figura 3.3). Los valores de F_{LINT} fueron superior a lo reportado por Carranza *et al.* (2008) quienes trabajando con repollo y brócoli reportaron F_{LINT} de 0,59 y 0,92 respectivamente. Heitholt (1994), encontró que el IAF ideal en el algodonero es de 4,0 durante 3 años en el Sur medio de los Estados Unidos y reportó que IAF menores de 3,0 o mayores de 5,0 están asociados con reducción en el rendimiento. Igualmente, para Ashley *et al*. (1965) no siempre un IAF de 5,0 es benéfico para el rendimiento económico de la planta; porque IAF de 5,0 o mayor requieren cultivos de muy alto rendimiento y creciendo en áreas de alta radiación tales como Arizona y Australia (Heitholt, 1994). Para las condiciones del C.I. Nataima área con alta radiación como se muestra en la figura 3.2 y para las variedades CORPOICA-M-123 y DELTA-OPAL el IAF fue superior a 5,0. Similares resultados encontraron Baker y Meyer

(1966) quienes indican que dependiendo de las condiciones ambientales, se puede alcanzar valores mayores a 5,0 (Ashley *et al*., 1965; Beltraõ *et al*., 1990). Igualmente, como lo reporta Ashley *et al*. (1965), se encontró que para las dos variedades el IAF igual a 1,0 se alcanzó entre 6 y 7 semanas DDE y llegó a 5,0 después de 5 a 6 semanas más tarde, debido a que las dos variedades evaluadas son cultivares intermedios por presentar ciclo de vida entre 120 a 140 días.

Kooman, (1995) reporta que la luz interceptada varía durante el ciclo del cultivo y depende de la cantidad de follaje en el cultivo y puede describirse como una función del incremento en el IAF (Spitters *et al.*, 1989). Este comportamiento fue observado y se evidencia que a mayor IAF mayor F_{LINT} (DELTA-OPAL) y a menor IAF menor F_{LINT} (CORPOICA-M-123).

Bange y Milroy (2004) trabajaron con ocho variedades una de ciclo temprano y siete de tardío, encontrando valores de IAF máximo entre 4,2 y 5,5 entre los 80 y 95 DDE, valores similares a los encontrados en este trabajo.

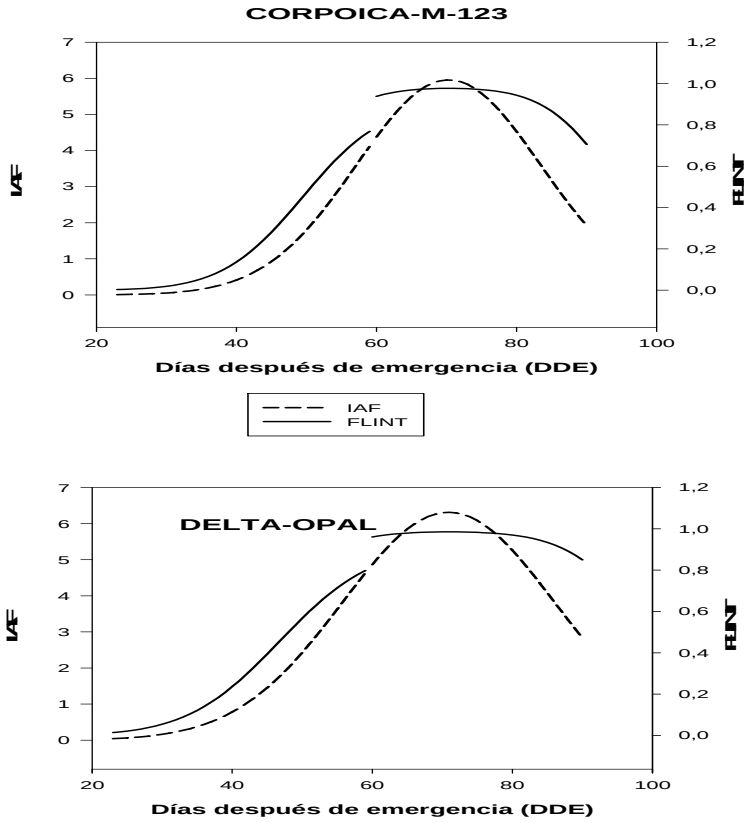


Figura 3.3 Comportamiento del índice de área foliar (IAF) y la fracción de luz interceptada (F_{LINT}) en CORPOICA-M-123 y DELTA-OPAL

El coeficiente de extinción de la luz (k) depende de la inclinación de los rayos de luz incidente, la posición y la orientación de las hojas. De Wit (1965) y Ross (1981) han desarrollado modelos más detallados en los que se incluyen otros aspectos que no se consideran usualmente en la estructuración de modelos. El coeficiente de extinción está relacionado con el IAF, por lo tanto aumentos en el IAF incrementa el sombreamiento entre las hojas y reduce la tasa asimilatoria debida a la reducción de la fotosíntesis aparente del algodón.

Las hojas del algodón, por su tendencia planófila presentan una baja transmisibilidad de la luz (10%) (Muramoto *et al.*, 1967), lo que explica la reducción de la fotosíntesis por el autosombreamiento de las hojas. En este trabajo con CORPOICA-M-123 y DELTA-OPAL se determinó el k específico para la etapa vegetativa-juvenil y para la reproductiva, los resulados para CORPOICA-M-123 fueron valores de 0,345 y 0,635 para cada etapa y para DELTA-OPAL 0,357 y 0,667 respectivamaente (Tabla 3.2). Sadras (1996) y Heitholt *et al.*

(1992) no encontraron diferencia en el k de varios genotipos, estimación que coincide con los valores de las dos variedades evaluadas en este trabajo. Los valores de k dependen del tipo de planta y de la etapa de desarrollo, según lo reportan Yunusa *et al*. (1993) en trigo, Imai *et al.* (1994) en *Canna edulis*, y Kubota *et al*. (1994), en *Pennisetum purpureum*, quienes evidenciaron que el k cambió con la edad de la planta en los cultivos evaluados. Similares resultados se encontraron con las dos variedades de algodón evaluadas, a diferencia de lo que se reporta para trigo (Weir *et al*., 1984), arroz (Graf *et al*., 1990) y girasol (Steer *et al*., 1993), las cuales presentan pocas variaciones durante el ciclo del cultivo.

En cultivos hortícolas se presentan valores promedio de k en un rango de 0,5 a 0,8, como lo estimado por Carranza *et al*. (2008) para brócoli y repollo el cual fue igual a 0,50 y 0,51 respectivamente. Bange y Milroy (2004), trabajando con ocho variedades de algodón en dos épocas de siembra encontraron valores entre 0,43 y 0,88, el menor valor correspondió a cv HQ95 caracterizada por ser de madurez temprana y rápida floración factores que determinaron su bajo k, mientras que el máximo con tendencia a la unidad correspondió a una variedad intermedia.

El algodón desde el punto de vista de captura, intercepción y distribución de la radiación solar y en función de la franja espectral de 400 a 700 nm sobre el dosel vegetal, y considerando el tipo de hoja normal cuyo ángulo de inclinación es menor a 30°, da origen a una estructura de dosel extremadamente planofilar que alcanza coeficientes de atenuación o extinción de luz (k) cercano a la unidad (Hearn, 1976). Debido al tipo de dosel planófilo la luz en el algodón sufre un gradiente energético a lo largo del mismo siguiendo la ley de Beer ($I = I_0\ e^{-K.IAF}$).

Por la organografía del algodón y por el sombreamiento mutuo entre las hojas por IAF mayores a 5,0 se reduce la fracción de radiación fotosintéticamente activa, que llegan a los macrófilos más bajos o inferiores, cuya relación está dada por la ecuación $I' = \exp(4.711 - 0.00068X^2 - 0.00528\ N + 0.000034\ X^2\ N)$, en donde I´ es una fracción de I (total de luz que incide en todo el dosel), que llega a un punto considerado, X^e como la edad de la hoja y a N como la posición del nudo (Constable y Rawson, 1980).

3.4.3. Uso eficiente de la radiación (RUE)

Mediante modelos empíricos es posible estimar la producción de masa seca como resultado de la radiación interceptada y empíricamente se derivan valores de RUE (Monteith, 1977; Gallagher y Biscoe, 1978; Jones y Kiniry, 1986; Williams *et al*., 1989). En modelos de crecimiento de cultivo debido básicamente a su simplicidad y a la evidencia experimental disponible, el RUE es una aproximación para calcular la conversión de energía MJ (Mega Joule) a producción (gramos de masa seca total). Kooman (1995) reporta que el valor de RUE cambia con las etapas de desarrollo de las plantas.

Monteith (1977), Gallagher y Biscoe (1978) y García *et al*. (1988) afirman que la relación entre el tiempo integral de intercepción de la radiación y la producción de masa seca es constante. Análisis teóricos realizados por Hammer y Wright (1994), Dewar (1996), Haxeltine y Prentice (1996), Dewar *et al*. (1998), Medlyn (1998) y Kage *et al*. (2001a) presentan al RUE, en un amplio rango de días, como equivalente a la suma de la radiación fotosintéticamente activa, en un efecto combinado de la adaptación del aparato fotosintético a la radiación ambiental dentro del dosel y en el tiempo (Kage *et al*., 2001b). Para el experimento se estimó que en la etapa vegetativa-juvenil, en las dos variedades CORPOICA-M-123 y DELTA-OPAL, el valor de RUE fue de 0,1963 y 0,1117 $g \cdot MJ^{-1}$ respectivamaente y para la etapa reproductiva 0,1647 y 0,1587 $g \cdot MJ^{-1}$ de RUE, mostrando que se presentó diferencia entre los materiales genéticos (Tabla 3.2). Bange y Milroy (2004) trabajaron con ocho variedades de algodón, una de ciclo temprano y siete de tardío, para las cuales estimaron el RUE entre 1,73 y 2,57 $g \cdot MJ^{-1}$, intervalo de valores superior a lo encontrado para las dos variedades del estudio.

En otros cultivos, Carranza *et al.* (2008), en brócoli estimaron un RUE de 0,2289 $g \cdot MJ^{-1}$ y en repollo, de 0,1181 $g \cdot MJ^{-1}$, valores inferiores comparados con otros cultivos hortícolas como coliflor donde Olesen y Grevsen (1997) encontraron valores de 3,2 y 4,1. Para otras especies, como el pasto ryegrass se obtuvo un RUE de 2,01 $g \cdot MJ^{-1}$ (Akmal y Janssens, 2004); en cereales, un rango de 1,0 a 4,0 $g \cdot MJ^{-1}$ (Curt *et al*., 1998); en maíz, 1,6 $g \cdot MJ^{-1}$ en sorgo, 1,25 $g \cdot MJ^{-1}$ (Muchow y Davies, 1988); en cebada, 1,4 $g \cdot MJ^{-1}$ (Monteith, 1969) y en uchuva, 0,46 y 2,62 $g \cdot MJ^{-1}$ para la etapa vegetativa y reproductiva respectivamente (Salazar

et al., 2008). Sin embargo, pueden ocurrir pequeñas variaciones de RUE en plantas de la misma especie, establecidas en un mismo sitio de plantación, como consecuencia de variaciones microclimáticas (Kage *et al*., 2001a).

En algodón, Rosenthal y Gerik (1991) encontraron diferencias en el uso eficiente de la radiación (RUE, cantidad de materia seca producida por la unidad de radiación fotosintéticamente activa interceptada) entre tres cultivares de USA; sin embargo, cuando se comparó únicamente sobre la etapa vegetativa no se encontró diferencia entre los genotipos. Sadras (1996) encontró una significante relación entre el RUE y el inverso de k, ésto se explica porque a mayor uniformidad en la distribución de la luz en el dosel, más hojas son expuestas a la alta intensidad de luz. La intercepción de la luz se caracterizó por la diferencia en la dinámica del área foliar y por la extinción de la luz dentro del dosel (Bange y Milroy, 2004).

Tabla 3.2 Parámetros estimados del modelo en algodón para las variedades CORPOICA-M-123 y DELTA-OPAL

PARAMETROS	CORPOICA-M-123		DELTA-OPAL	
	ETAPA VEGETATIVA-JUVENIL	ETAPA REPRODUCTIVA	ETAPA VEGETATIVA-JUVENIL	ETAPA REPRODUCTIVA
k	0,3568	0,6354	0,3457	0,6679
RUE ($g \cdot MJ^{-1}$)	0,1963	0,1647	0,1117	0,1587
Tallo (g MS)	0,4296	0,2987	0,4297	0,2987
Hojas (g MS)	0,5685	0.1202	0.5685	0,1200
Botones florales (g MS)	0,0018	0,0041	0,0018	0,0032
Cápsulas (g MS)		0,6076		0,6120

3.4.4. Distribución de la masa seca

Durante las etapas vegetativa-juvenil y reproductiva, la masa seca se distribuyó respectivamente así: en CORPOICA-M-123, el 42,96% y 29,87% en el tallo; el 56,85% y el 12,02% en las hojas; el 0,18%, el 0,41% en los botones florales y en cápsulas el 60,76%

en la etapa reproductiva (Tabla 3.2, Figura 3.4). En DELTA-OPAL se distribuyó el 42,97% y 29,87% en el tallo, el 56,85% y 12,00% en las hojas, el 0,18% y 0,32% en botones floralaes y en cápsulas el 61,20% en la etapa reproductiva (Tabla 3.2, Figura 3.5).

Sadras *et al*. (1997), no encontraron diferencias en la distribución de materia seca entre cultivares de algodón, ni tampoco variando su manejo agronómico. Este comportamiento es similar a lo encontrado en el presente trabajo. Sin embargo, Bange y Milroy (2000) encontraron diferencia en la distribución absoluta de materia seca en cultivares tempranos y tardíos por análisis alométrico, mostrando que este comportamiento está relacionado con la diferencia absoluta en el tamaño de la planta antes de iniciar la etapa reproductiva.

El genotipo, la etapa de desarrollo de la planta, las condiciones ambientales para el crecimiento y la regulación interna de la planta también pueden afectar la distribución de la masa seca (Marcelis, 1996).

La masa seca en los órganos cosechables contribuye al rendimiento del cultivo, esto indica la importancia de simular correctamente la distribución de la masa seca. Sin embargo, para plantas pequeñas (jóvenes) de crecimiento rápido, la distribución de la masa seca en hojas es importante porque una fracción grande de luz todavía no es interceptada por las hojas. Además, en muchos cultivos, como hortalizas y frutas, donde los órganos cosechables se producen durante un período extenso, se debe mantener un balance óptimo entre la distribución en los órganos cosechables, la productividad a corto plazo y la otra parte de la planta (partes vegetativas: la futura capacidad de producción) (Marcelis *et al*., 1998).

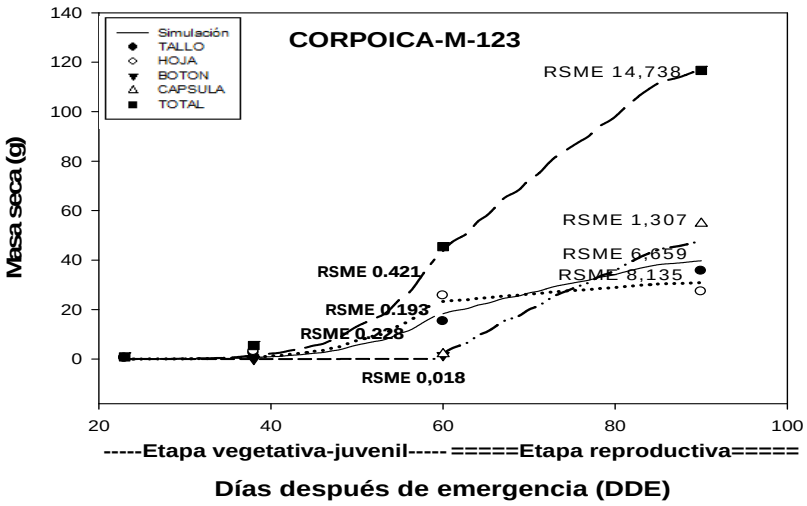


Figura 3.4 Observado (símbolos) y simulado (líneas) de la distribución de masa seca total en tallo, hoja, botón floral y cápsula en la variedad de algodón CORPOICA-M-123.

Los valores de la raíz cuadrada del cuadrado medio del error (RSME), tanto para la biomasa total como para las particiones en los diferentes órganos, en las dos etapas de desarrollo del cultivo evidencian el buen ajuste de los modelos generados, para CORPOICA-M-123 y DELTA-OPAL (Figuras 3.4 y 3.5).

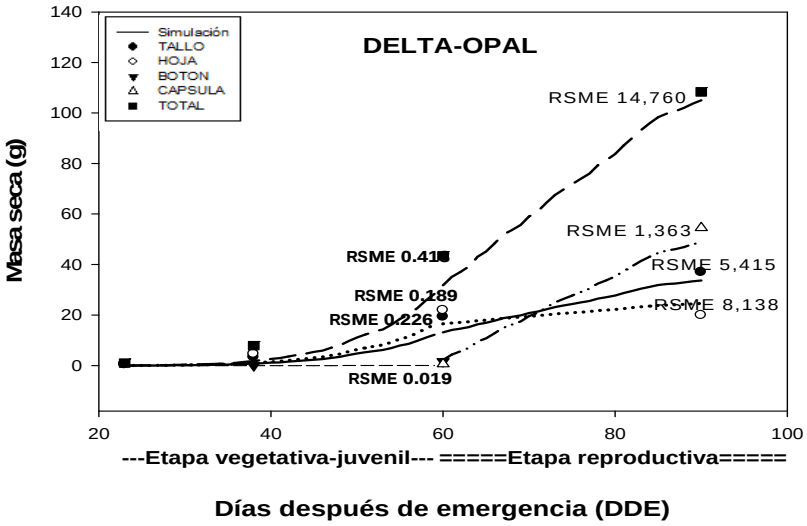


Figura 3.5 Observado (símbolos) y simulado (líneas) de la distribución de masa seca total en tallo, hoja, botón floral y cápsula en la variedad de algodón DELTA-OPAL

3.4.5. Análisis de crecimiento

Una de las principales debilidades de los modelos descriptivos es la incapacidad de integrar y explicar los mecanismos que causan el comportamiento del sistema que hacen parte de la dinámica de crecimiento; esto se da debido a que al ajustar los parámetros a las condiciones cambiantes del ambiente, algunas interacciones se escapan a la capacidad del modelo para hacer predicciones precisas (Galindo, 2006; Salazar, 2006). Teniendo en cuenta que el modelo de crecimiento empleado en este trabajo hace parte de la familia de modelos descriptivos se dará una explicación aproximada de la dinámica de crecimiento por efecto del potasio. Este método, es bastante utilizado para investigar el efecto de fenómenos ecológicos sobre el crecimiento vegetal, dentro de éstos el efecto de prácticas agronómicas como los nutrientes (Silva *et al*., 2000).

3.4.6. Curvas de crecimiento

En la tabla 3.3 se presentan los intervalos de confianza de los parámetros de las variables masa seca total, masa seca foliar y área foliar de la variedad CORPOICA-M-123. Para los parámetros α, y γ no se presentó traslape de los límites de confianza, por lo cual se evidencia que el comportamiento de las dosis de potasio es diferente para peso seco total, área foliar y peso foliar. En la figura 3.6 se muestra la curva y tasa de crecimiento para la masa seca total según dosis de potasio.

En los resultados obtenidos del modelo logístico ($y = a/ (1 + e^{(-k*(t- \beta)})$) de la masa seca total, para CORPOICA-M-123, se observó que con el tratamiento de 120 $kg{\cdot}ha^{-1}$ de K las plantas presentaron la máxima masa seca total (101,30 g). La tasa máxima de crecimiento se observó a los 63,6 DDE (Tabla 3.3 y Figura 3.6D). Mientras que, el tratamiento de menor dosis de potasio (30 $kg{\cdot}ha^{-1}$ de K) presentó la menor masa seca total (56,23 g) y a los 56,7 DDE presentó su máxima tasa de crecimiento (Tabla 3.3, Figura 3.6A).

Igualmente, para la variable masa seca foliar cuyo modelo ajustado fue el gaussiano ($y = a*e^{-k\ (t\ -\ \beta)2}$), las plantas establecidas en el tratamiento de 120 $kg{\cdot}ha^{-1}$ de K alcanzaron la máxima magnitud de la variable 27,27 g y a los 73,1 DDE presentaron su máxima tasa de crecimiento. La menor masa seca foliar (17,77 g) también correspondió a las plantas del

tratamiento 30 kg·ha^{-1} de K, cuya mayor tasa de crecimiento se obtuvo a los 70,3 DDE (Tabla 3.3). La variable área foliar, también se ajustó a un modelo gaussiano, encontrándose que las plantas del tratamiento de 120 kg·ha^{-1} de K alcanzaron la máxima magnitud, 5366,7 cm^2, con una máxima tasa de crecimiento a los 71,6 DDE. La menor área foliar (4170,5 cm^2) correspondió al tratamiento 150 kg·ha^{-1} de K, obtenida con una máxima tasa de crecimiento a los 70,3 DDE (Tabla 3.3)

Tabla 3.3 Intervalos de confianza de los parámetros α, *κ*, γ en el ajuste para el modelo logístico aplicado en la masa seca total y Gaussiano en masa seca foliar y el área foliar, para la variedad CORPOICA-M-123 sometida a cinco dosis de potasio

Tratamiento (kg·ha^{-1} de K)	Límite inferior	α	Límite superior	Error estándar	Límite inferior	*K*	Límite superior	Error estándar	Límite inferior	γ	Límite superior	Error estándar
Masa seca total												
30	50,077	56,238	62,3996	2,851	0,0675	0,1582	0,249	0,0420	56,751	59,769	62,787	1,397
60	59,026	67,185	75,3435	3,776	0,0500	0,1573	0,2646	0,0497	57,029	60,536	64,043	1,6234
90	58,018	70,380	82,7417	5,722	-0,00957	0,1623	0,3341	0,0795	55,763	60,832	65,902	2,3465
120	89,336	101,300	113,200	5,527	0,00493	0,1671	0,3293	0,0751	58,336	63,615	68,895	0,0751
150	65,891	76,365	86,8388	4,848	0,02750	0,1520	0,2766	0,0576	57,210	61,771	66,332	2,1112
Masa seca foliar												
30	12,226	17,778	23,3306	2,570	1,80E-03	0,0031	0,00441	0.000603	67,871	70,331	72,79	1,1384
60	15,728	20,616	25,5047	2,262	0,00201	0,0030	0,00395	4,49E-04	69,598	71,211	72,824	0,7467
90	14,680	20,333	25,9851	2,616	1,95E-03	0,0031	0,00426	5,35E-04	69,141	71,033	72,925	0,8758
120	16,307	27,275	38,2435	5,077	1,55E-03	0,0032	0,00493	7,82E-04	71,664	73,159	74,654	0,6921
150	12,898	20,072	27,2464	3,320	1,44E-03	0,0029	0,00433	6,68E-04	68,935	71,366	73,797	1,1253
Área foliar												
30	2582,1	4438,3	6294,4	859,2	1,39E-03	0,0032	0,0049	8,13E-04	66,939	70,249	73,559	1,532
60	3280,8	4410,2	5539,5	522,8	0,00192	0,003	0,00402	4,87E-04	68,032	70,178	72,325	0,9936
90	3207,4	4609,1	6010,9	648,8	0,00193	0,0032	0,00452	5,98E-04	67,614	70,065	72,515	1,1343
120	3336,1	5366,7	7397,2	939,9	1,61E-03	0,0032	69,4381	7,33E-04	69,438	71,621	73,805	1,0106
150	2516,7	4170,5	5824,4	765,5	1,29E-03	0,0029	0,00452	7,46E-04	66,992	70,299	73,606	1,5309

α = máxima magnitud de la variable, κ = constante que determina la pendiente de la curva; y = momento de mayor tasa de crecimiento (DDE).

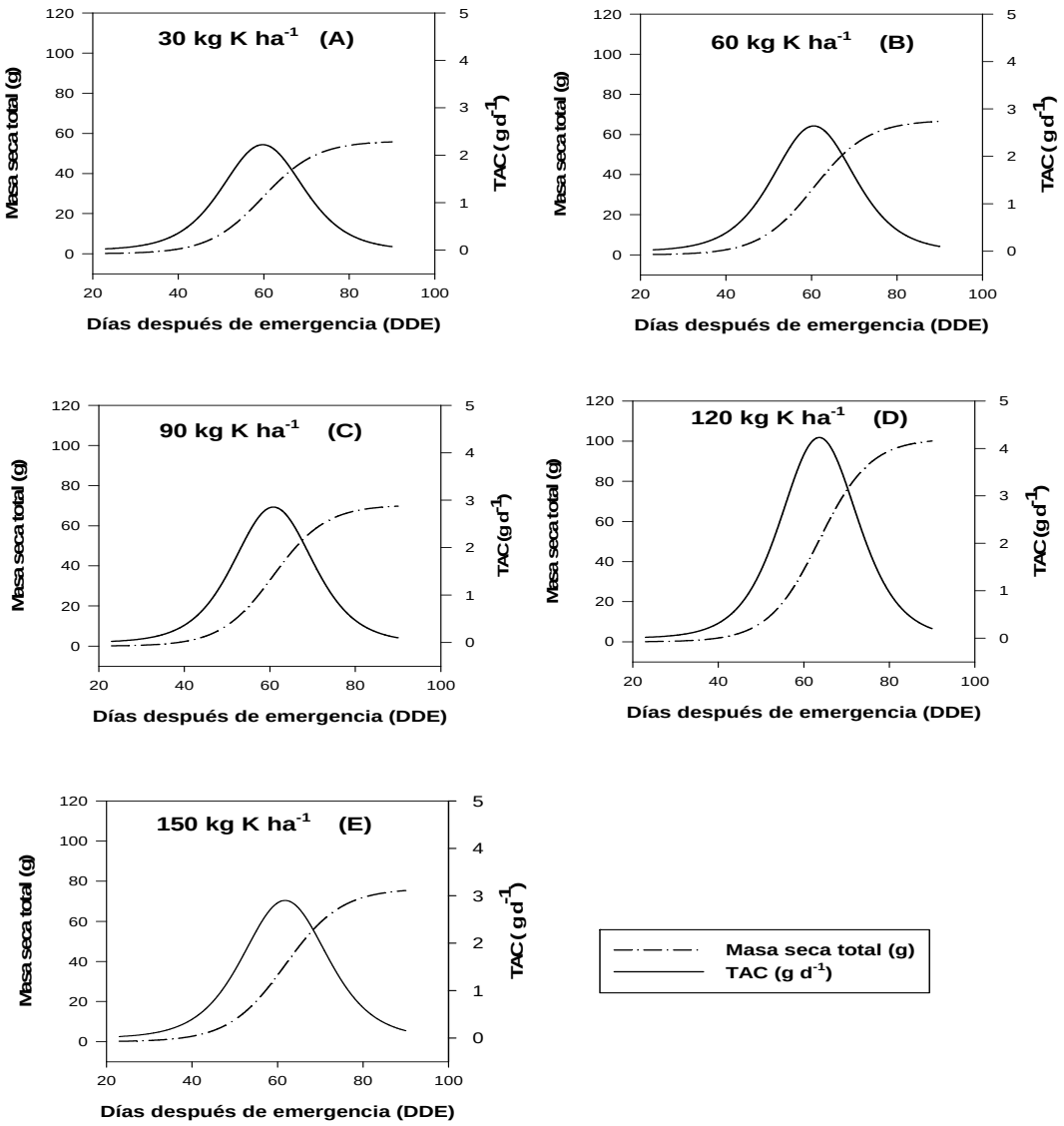


Figura 3.6 Comportamiento de la variable masa seca total y su respectiva tasa absoluta de crecimiento (TAC) para la variedad CORPOICA-M-123 bajo cinco dosis de potasio

En la tabla 3.4 se presentan los intervalos de confianza de los parámetros de las variables masa seca total, masa seca foliar y área foliar de la variedad DELTA-OPAL. Para los parámetros α, y γ no se presentó traslape de los límites de confianza, por lo cual se evidencia que el comportamiento de las dosis de potasio es diferente para peso seco total y peso foliar. En la figura 3.7 se muestra la curva y tasa de crecimiento para la masa seca total según dosis de potasio.

En los resultados obtenidos del modelo logístico de la masa seca total, para DELTA-OPAL, se observó que con el tratamiento de 150 kg·ha^{-1} de K las plantas presentaron la máxima magnitud de la masa seca total (103,4 g). La tasa máxima de crecimiento se observó a los 62,56 DDE (Tabla 3.4 y Figura 3.7E). Mientras que, el tratamiento de menor dosis de potasio (30 kg·ha^{-1} de K) presentó la menor masa seca total (69,33 g) y a los 61,1 DDE presentó su máxima tasa de crecimiento (Tabla 3.4, Figura 3.7A).

Igualmente, para la variable masa seca foliar cuyo modelo ajustado fue el gaussiano, las plantas establecidas en el tratamiento de 150 kg·ha^{-1} de K alcanzaron la máxima magnitud de la variable 25,7 g y a los 72,5 DDE presentaron su máxima tasa de crecimiento. La menor masa seca foliar (17,42 g) también correspondió a las plantas del tratamiento 30 kg·ha^{-1} de K, cuya mayor tasa de crecimiento se obtuvo a los 70,5 DDE. La variable área foliar, también se ajustó a un modelo gaussiano. Las plantas del tratamiento de 120 kg·ha^{-1} de K alcanzaron la máxima magnitud con 5096,9, cm^2, y la máxima tasa de crecimiento se obtuvo a los 69,8 DDE. La menor área foliar (3575,3 cm^2) correspondió al tratamiento con 30 kg·ha^{-1} de K y obtuvo su máxima tasa de crecimiento a los 68,8 DDE (Tabla 3.4)

Tabla 3.4 Intervalos de confianza de los parámetros α, κ, γ en el ajuste aplicado para el modelo logístico aplicado en la masa seca total y Gaussiano en la masa seca foliar y el área foliar para la variedad DELTA-OPAL sometida a cinco dosis de potasio

Tratamiento (kg·ha^{-1} de K)	Límite inferior	α	Límite superior	Error estándar	Límite inferior	*K*	Límite superior	Error estándar	Límite inferior	γ	Límite superior	Error estándar
Masa seca total												
30	60,7983	69,337	77,877	3,9527	0,0568	0,1257	0,1946	0,0319	56,844	61,168	65,4918	2,0013
60	68,8692	75,274	81,6805	2,9651	0,085	0,1386	0,1921	0,0248	56,909	59,513	62,1174	1,2054
90	55,4819	70,351	85,2219	6,8831	0,0106	0,1232	0,2357	0,0521	53,586	61,044	68,5029	3,4523
120	68,2118	75,443	82,6749	3,3474	0,0908	0,1584	0,226	0,0313	55,504	58,098	60,6919	1,2006
150	84,808	103,400	122,100	8,6276	-0,00051	0,1415	0,2836	0,0657	55,898	62,567	69,2356	3,0867
Masa seca foliar												
30	12,7881	17,421	23,1457	2,3972	1,27E-03	0,00234	0,0034	4,93E-04	67,834	70,547	73,2591	1,2554
60	18,0647	20,306	22,5484	1,0377	0,00213	0,00255	0,00298	1,96E-04	68,553	69,670	70,7872	0,5169
90	14,6192	17,966	20,2244	1,2973	1,62E-03	0,0022	0,00279	2,69E-04	69,692	71,147	72,6021	0,6735
120	16,7247	23,903	31,0824	3,3230	1,57E-03	0,00277	0,00396	5,53E-04	67,944	70,467	72,99	1,1677
150	17,7879	25,761	33,7341	3,6906	1,30E-03	0,00248	0,00367	5,50E-04	70,540	72,525	74,511	0,9189
Área foliar												
30	2913,3	3575,3	5165,1	521,2	1,48E-03	0,00256	0,00364	5,00E-03	65,605	68,798	71,9917	1,478
60	3280,2	3594,4	3908,7	145,5	0,00183	0,00214	0,00245	1,44E-04	67,607	68,707	69,8078	0,5093
90	3021,5	4039,2	4129,0	256,3	0,00167	0,00223	0,00279	2,59E-04	67,844	69,563	71,2823	0,7956
120	3795,2	5096,9	6398,9	602,5	1,70E-03	0,00271	0,00372	4,67E-04	67,441	69,856	72,2702	1,1175
150	3569,1	4417,9	5266,7	392,9	1,50E-03	0,00219	0,00288	3,20E-04	69,103	70,910	72,7174	0,8363

α = máxima magnitud de la variable, κ = constante que determina la pendiente de la curva; y = momento de mayor tasa de crecimiento (DDE).

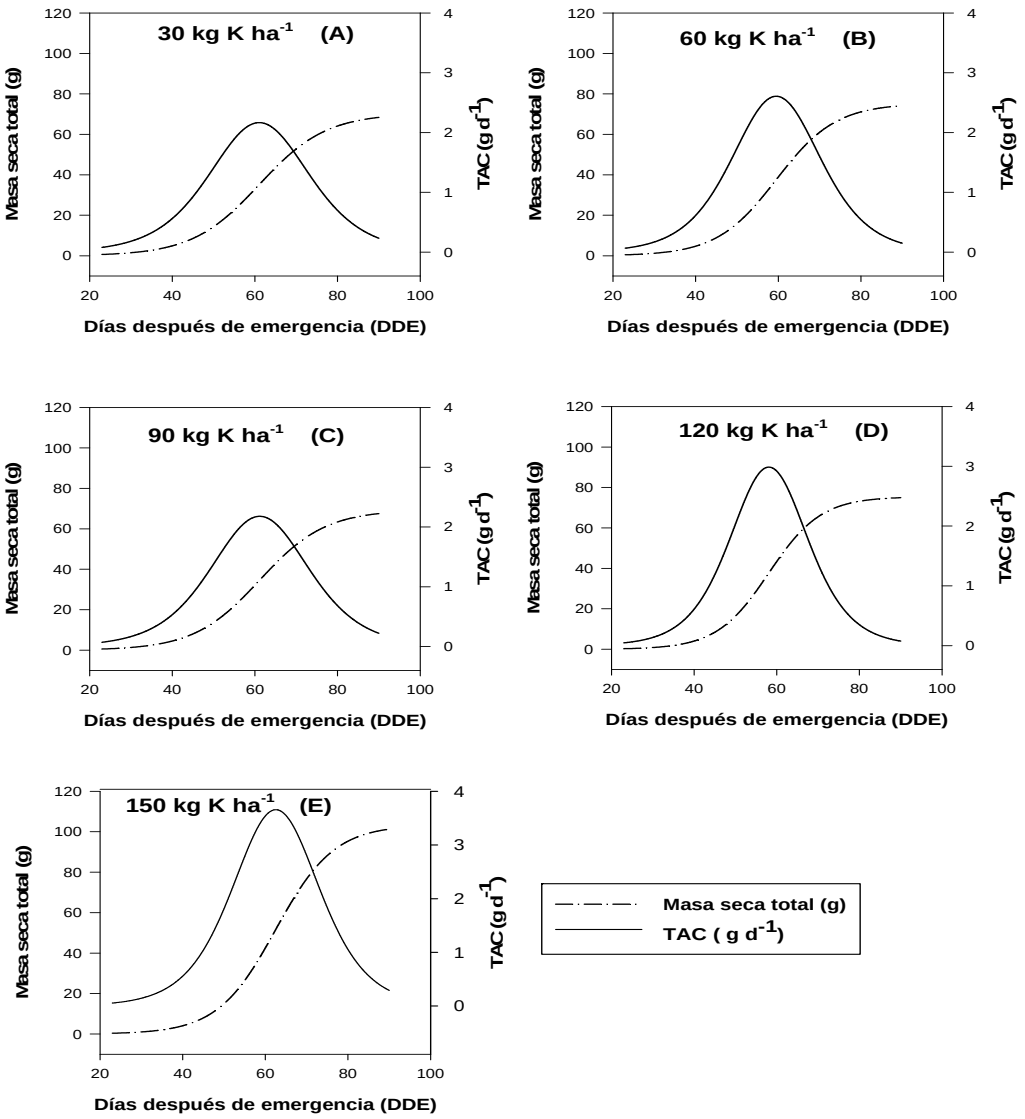


Figura 3.7 Comportamiento de la variable masa seca total y su respectiva tasa absoluta de crecimiento (TAC) para la variedad DELTA-OPAL bajo cinco dosis de potasio

3.4.7. Índice de área foliar (IAF)

En la figura 3.8 se observa el comportamiento del IAF para las variedades CORPOICA-M-123 y DELTA-OPAL, por efecto de cinco dosis de potasio. Para CORPOICA-M-123 el valor del IAF observado varió entre 0,1 y 6,6; el IAF máximo se presentó a los 71 DDE

para el tratamiento 120 kg·ha^{-1} de K (6,6) y el menor valor se obtuvo para el tratamiento de 150 kg·ha^{-1} de K a los 69 DDE, con un valor máximo de 5,1 (Figura 3.8A).

De forma similar, el comportamiento del IAF para DELTA-OPAL observado varió entre 0,1 y 6,3. El máximo valor de IAF de 6,3 se alcanzó con el tratamiento de 120 kg·ha^{-1} de K a los 69 DDE y el menor valor máximo (4,4) se obtuvo con el tratamiento 30 kg·ha^{-1} de K a los mismos 69 DDE. Los valores máximos de IAF en las dos variedades expresaron similar comportamiento del simulado en el modelo de distribución y además, se encontró similar resultado al reportado por Baker y Meyer 1966) quienes indican que dependiendo de las condiciones ambientales, se puede alcanzar valores mayores a 5,0 (Ashley *et al.,* 1965; Beltraõ *et al*., 1990).

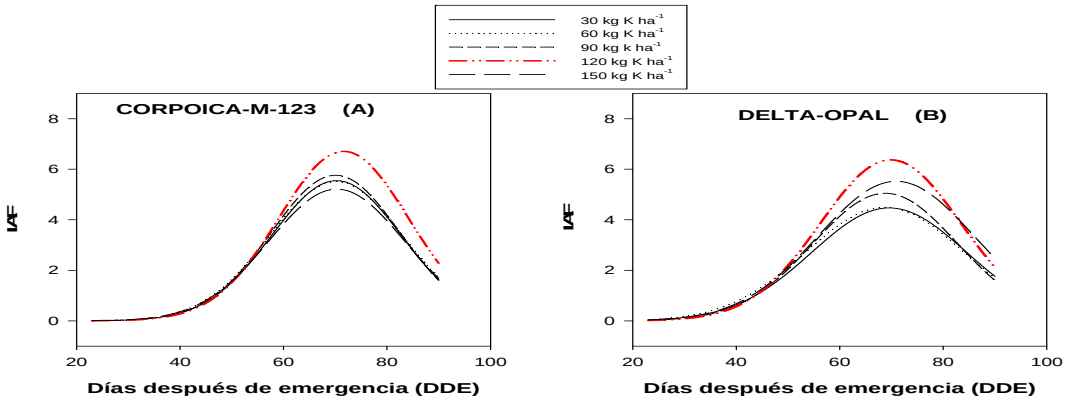


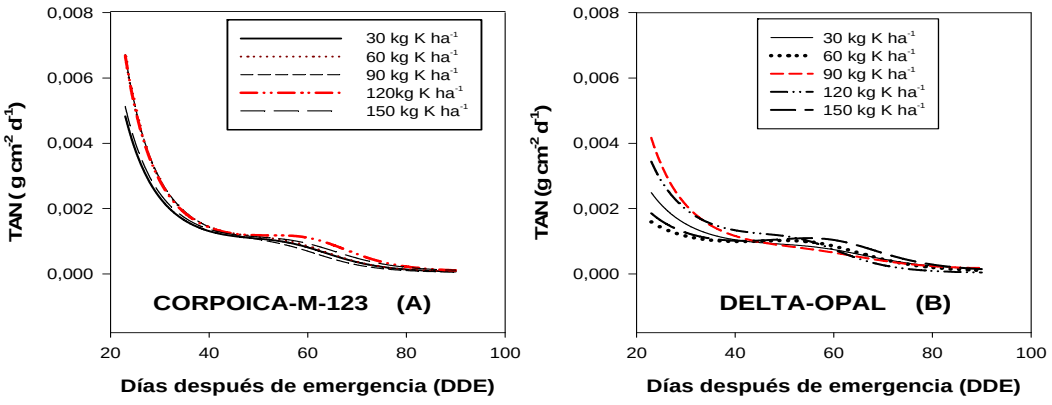
Figura 3.8 Comportamiento del Índice de área foliar (IAF) en las variedades CORPOICA-M-123 y DELTA-OPAL por efecto de cinco dosis de potasio

3.4.8. Tasa de asimilación neta (TAN)

El comportamiento de la TAN para las dos variedades se observa en la figura 3.9. CORPOICA-M-123, presenta los mayores valores para todos los tratamientos entre los 23 y 30 DDE. El tratamiento con mayor TAN fue el de 120 kg·ha^{-1} de K con 0.0068 g cm^{-2} d^{-1} a los 23 DDE, a partir de esta época la planta presentó menores valores, logrando aumentar nuevamente su comportamiento entre los 50 y 61 DDE. El tratamiento con menor valor de TAN fue el de 30 kg·ha^{-1} de K con valor máximo (0.0048 g cm^{-2} d^{-1}) a los 23 DDE. La mayor eficiencia de CORPOICA-M-123 en la producción de fotoasimilados durante el ciclo de cultivo se obtuvo con el tratamiento de 120 kg·ha^{-1} de K (Figura 3.9A).

Para DELTA-OPAL, también los máximos valores de TAN, en todos los tratamientos se observó entre los 23 y 30 DDE e igualmente a partir de este tiempo empezó a tener tasas de acumulación decreciente. El tratamiento con mayor TAN fue el de 90 kg·ha^{-1} de K con 0.0041 g cm^{-2} d^{-1} a los 23 DDE. El tratamiento con menor valor de TAN fue el de 60 kg·ha^{-1} de K con valor máximo (0.0015 g cm^{-2} d^{-1}) a los 23 DDE. La tendencia de la TAN en DELTA-OPAL para los cinco tratamientos a excepción de 150 kg·ha^{-1} de K presentó pocas variaciones después de los 40 DDE (Figura 3.9B).

Para las dos variedades, según las cinco dosis de potasio que se evaluaron, a partir de los 40 DDE de emergencia la TAN disminuye, debido al redireccionamiento de fotoasimilados hacia las cápsulas. Esta respuesta coincide con lo reportado por Gardner *et al*. (2003) quienes reportan que la disminución progresiva de la TAN es resultado del aumento de la edad de la planta y del sombreamiento por el aumento del IAF que excedió el incremento de masa seca o viceversa. Leopold y Kriedermann (1978), citado por Medina *et al.* 1995, reportan que la TAN declina con el avance en el ciclo del cultivo en todas las especies vegetales a pesar de los incrementos en el área foliar, dado que sus contribuciones con nuevos fotosintetizados son anuladas por la decadencia general en el vigor de la planta.



3 Comportamiento de la tasa de asimilación neta (TAN) para CORPOICA-M-123 y DELTA-OPAL por efecto de cinco de dosis de potasio

3.4.9. Tasa de crecimiento del cultivo (TCC)

En la figura 3.10 se observa el comportamiento de la TCC para CORPOICA-M-123 y DELTA-OPAL por efecto de cinco dosis de potasio. Para CORPOICA-M-123 la TCC

varió durante el ciclo del cultivo entre 1,0 y 52,8 g m^{-2} d^{-1} y con una máxima TCC observada para el tratamiento de 120 kg·ha^{-1} de K de 52,8 g m^{-2} d^{-1} a los 64 DDE; y el menor valor máximo observado correspondió al tratamiento de 30 kg·ha^{-1} de K con 27,8 g m^{-2} d^{-1} a los 60 DDE (Figura 3.10A).

Similarmente, para la variedad DELTA-OPAL la variación de la TCC durante el ciclo del cultivo se observó entre 1,0 y 45,7 g m^{-2} d^{-1}. El valor máximo de la TCC observada (45,7 g m^{-2} d^{-1}) correspondió al tratamiento de 150 kg·ha^{-1} de K y fue alcanzado a los 63 DDE; el menor valor máximo observado igualmente que para CORPOICA-M-123 fue para el tratamiento de 30 kg·ha^{-1} de K, con 23,8 g m^{-2} d^{-1} a los 63 DDE (Figura 3.10B).

El valor máximo de la TCC (52,8 g m^{-2} d^{-1}) obtenido por CORPOICA-M-123 con el tratamiento de 120 kg·ha^{-1} de K se encontró entre el máximo reportado por Loomis y Williams, (1963) de 77 g m^{-2} d^{-1} y el máximo obtenido por Baker y Hesketh (1969) de 42 g·m^{-2} d^{-1}, sin embargo, para DELTA-OPAL su valor máximo alcanzado (45,7 g m^{-2} d^{-1}) fue similar al de Backer y Hesketh (1969). Es de resaltar el efecto de las dosis de potasio para CORPOICA-M-123, en donde el tratamiento de 120 kg·ha^{-1} de K fue superior a los demás tratamientos, en mínimo 16 g·m^{-2} d^{-1}, mostrando la respuesta diferencial de los tratamientos. Para DELTA-OPAL y con el máximo tratamiento de potasio (150 kg·ha^{-1} de K) logró superar en menor cantidad (6 g·m^{-2} d^{-1}) a los demás tratamiento, mostrando la diferencia en efecto del potasio. La menor TCC para las dos variedades correspondió a la menor dosis de potasio evaluada (30 kg·ha^{-1} de K).

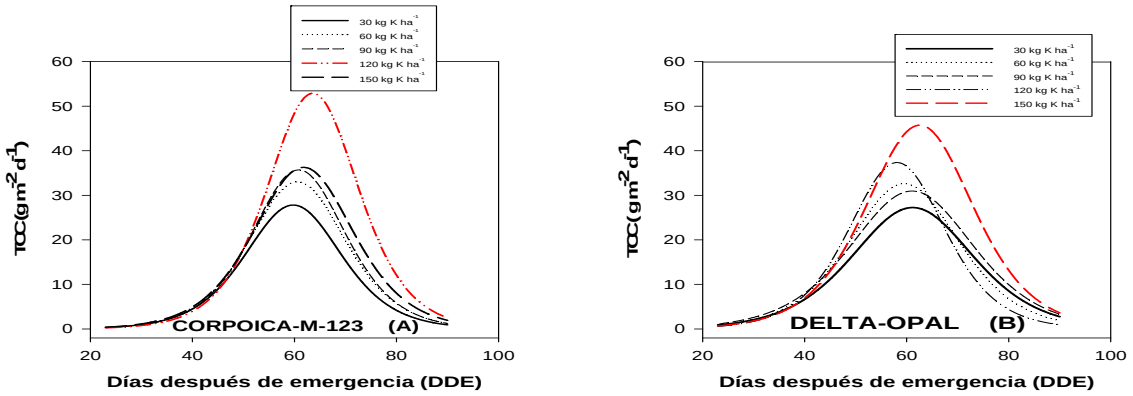


Figura 3.9 Comportamiento de la tasa de crecimiento del cultivo (TCC) para las variedades CORPOICA-M-123 y DELTA-OPAL por efecto de cinco dosis de potasio

3.4.10. Tasa relativa de crecimiento (TRC)

En la figura 3.11 se observa el comportamiento de la TRC para CORPOICA-M-123 y DELTA-OPAL sometidas a cinco dosis de potasio. Para CORPOICA-M-123, según los valores observados en la figura 3.11A, la máxima TRC se obtuvo con el tratamiento de 120 $kg{\cdot}ha^{-1}$ de K (0,17 $g{\cdot}g^{-1}$ d^{-1}) y su mayor valor se mantuvo durante todo el ciclo del cultivo; el menor valor de TRC (0,15 $g{\cdot}g^{-1}$ d^{-1}) correspondió al tratamiento de 150 $kg{\cdot}ha^{-1}$ de K hasta los 50 DDE y a partir de esta época hasta el final del ciclo del cultivo la menor TRC correspondió al tratamiento de 30 $kg{\cdot}ha^{-1}$ de K (Figura 3.11A).

Similarmente, para DELTA-OPAL de acuerdo a los valores observados en la figura 3.11B, la máxima TRC se alcanzó con el tratamiento 120 $kg{\cdot}ha^{-1}$ de K (0,16 $g{\cdot}g^{-1}$ d^{-1}) y su valor máximo sólo se mantuvo hasta los 51 DDE y a partir de esta época hasta el final del ciclo del cultivo el máximo valor lo alcanzó el tratamiento 150 $kg{\cdot}ha^{-1}$ de K; el menor valor de TRC (0,12 $g{\cdot}g^{-1}$ d^{-1}) se obtuvo con el tratamiento de 30 $kg{\cdot}ha^{-1}$ de K y se mantuvo hasta los 61 DDE, sin embargo, a partir de esta época el menor valor correspondió a 120 $kg{\cdot}ha^{-1}$ de K (Figura 3.11B).

En general, para las dos variedades evaluadas con las cinco dosis de potasio, se observó una mayor eficiencia del proceso asimilatorio para el tratamiento de 120 $kg{\cdot}ha^{-1}$ de K. Sin embargo, la menor eficiencia asimilatoria después de los 51 DDE hasta el final del ciclo es explicada por la demanda de fotoasimilados hacia las estructuras económicamente productivas (botones florales y cápsulas).

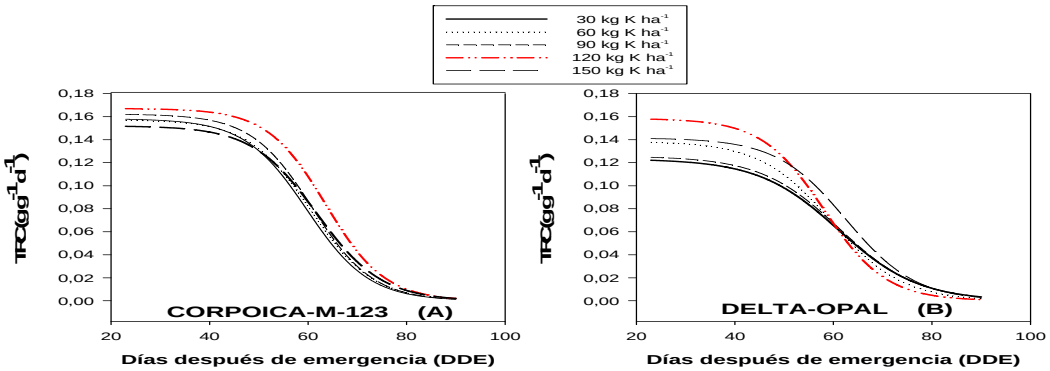


Figura 3.10 Comportamiento de la tasa relativa de crecimiento (TRC) para CORPOICA-M-123 y DELTA-OPAL por efecto de cinco de dosis de potasio

3.4.11. Rendimiento de algodón-semilla y fibra

Para el rendimiento de algodón-semilla y fibra no hubo diferencia significativa a nivel de las variedades; sin embargo como se muestra en la tabla 3.5, las dosis de potasio para el rendimiento de algodón-semilla y fibra mostraron diferencia significativa y con tendencia positiva, a mayor dosis de potasio mayor rendimiento; la diferencia entre la máxima aplicación (150 kg·ha^{-1} de K) y la mínima o control comercial (30 kg·ha^{-1} de K) fue de 1577 kilogramos para algodón-semilla y de 829 para algodón fibra. Para la producción de algodón semilla, el mejor tratamiento fue 150 kg·ha^{-1} de K con 4563 kg·ha^{-1}, el cual superó al control en 53%, resultado superior a lo reportado por Gormus y Kanat, (1998) quienes con 160 kg·ha^{-1} de K superó en 24,3% al testigo (0 kg·ha^{-1} de K) y por Chaina, Soils and Fertilizers Working Station (1987) con 16,5%. Para la producción de algodón-fibra el mejor tratamiento fue 150 kg·ha^{-1} de K con 195 kg ha^{-1} que superó al control en 73%, valor superior a los resultados de Gormus y Yucel (2002) que con igual cantidad de potasio la ganancia relativa con el testigo fue del 11,2% y para Pettigrew *et al*. (1996) evaluando varios genotipos la ganancia relativa fue del 9%. Los valores superiores encontrados, en las condiciones experimentales, entre el mejor tratamiento y el control muestran la diferencia de respuesta del algodón a las dosis de potasio utilizadas.

Tabla 3.5 Rendimiento de algodón semilla y fibra (kg·ha^{-1}) según dosis de potasio*

Tratamiento (kg·ha^{-1} de K)	Algodón-semilla		Algodón-fibra	
	Rendimiento	% ganancia[b]	Rendimiento	% ganancia[b]
30	2986 c	0	1127 c	0
60	3735 b	25	1494 b	32
90	4216 b	41	1792 b	59
120	4549 a	52	1950 a	73
150	4563 a	53	1956 a	73

*Columnas con letra diferente presentan diferencia significativa al 0.05%, según prueba de Tukey.
[b]Control comercial.

En la figura 3.12, se muestra la interacción entre las variedades y las dosis de potasio para el rendimiento de algodón-semilla y fibra, las cuales mostraron diferencia significativa.

Para las dos variedades y los dos rendimientos la tendencia de la curva fue polinomial de tercer grado con R^2 mayor de 98%.

Para la interacción variedad*dosis de potasio en el rendimiento de algodón semilla, CORPOICA-M-123, con la ecuación $y = 2092{,}8 + 35{,}96x - 0{,}148x^2 + 0{,}00007x^3$ (R^2 = 0,99), alcanzó máximo rendimiento de 4483 kg ha^{-1} con 139 kg·ha^{-1} de K; y con la ecuación $y = 2062{,}2 + 30{,}51x - 0{,}33x^2 - 0{,}0004x^3$ (R^2 = 0,99) la variedad DELTA-OPAL alcanzó su máximo rendimiento de 4583 kg·ha^{-1} con 134 kg·ha^{-1} de K (Figura 3.12A).

Para la interacción variedad*dosis de potasio en el rendimiento de algodón fibra, CORPOICA-M-123, con la ecuación $y = 766{,}8 + 13{,}44x - 0{,}0052x^2 + 0{,}0002x^3$ (R^2 = 0,99) y DELTA-OPAL con la ecuación $y = 695{,}8 + 12{,}66x - 0{,}031x^2 - 0{,}0004x^3$ (R^2 = 1,00) alcanzaron con 139 kg·ha^{-1} de K y 134 kg·ha^{-1} de K, el máximo rendimiento de fibra 1998 kg·ha^{-1} (Figura 3.12B).

La variedad DELTA-OPAL fue más eficiente que CORPOICA-M-123 al alcanzar el máximo rendimiento de fibra con 5 kg·ha^{-1} de K menos

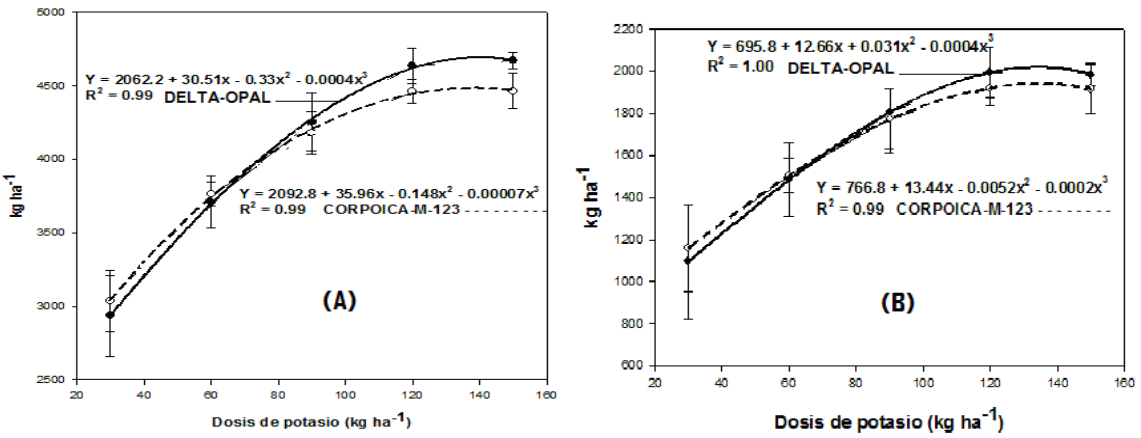


Figura 3.11 Rendimiento de algodón-semilla (A) y de algodón-fibra (B) para CORPOICA-M-123 y DELTA-OPAL

Para el porcentaje de fibra, no se encontró diferencia significativa entre las variedades, ni entre las dosis de potasio. Sin embargo, a nivel de la interacción variedades*dosis de potasio se presentó diferencia significativa (Tabla 3.6, Figura 3.13). El porcentaje de fibra muestra tendencia positiva por efecto de las dosis de potasio (Tabla 3.6) y con los resultados se deduce que a menor dosis de potasio (30 kg·ha^{-1} de K) menor porcentaje de

fibra y a mayores dosis mayor porcentaje. CORPOICA-M-123 y DELTA-OPAL con 120 kg·ha^{-1} de K alcanzaron el máximo porcentaje de fibra (43%) y superaron al testigo comercial (30 kg·ha^{-1} de K) en 4,8 y 5,7%, respectivamente. Los porcentajes (4,8 y 5,7%) de aumento de fibra encontrados superan a lo reportado por Pettigrew *et al.* (1996) el cual fue del 1% y por lo reportado por Chaina, Soils and Fertilizers Working Station (1987) que osciló entre 0,1 a 0,3%. Como resultado, los valores superiores encontrados entre el mejor tratamiento y el control en porcentaje de fibra, pueden ser explicados por la diferencia de respuesta entre variedades y dosis de potasio.

Tabla 3.6 Porcentaje (%) de fibra para CORPOICA-M-123 y DELTA-OPAL*

Tratamiento (kg·ha^{-1} de K)	CORPOICA-M-123		DELTA-OPAL	
	% de fibra	Ganancia[b]	% de fibra	Ganancia[b]
30	38,2 a	0	37,3 a	0
60	40,0 b	1,8	40,0 b	2,7
90	42,5 c	4,3	42,5 c	5,2
120	43,0 c	4,8	43,0 c	5,7
150	43,0 c	4,8	42,5 c	5,2

*Columnas con letra diferente presentan diferencia significativa al 0.05%, según Tukey. [b]Control comercial.

Para la interacción variedad*dosis de potasio en el porcentaje de fibra, CORPOICA-M-123, con la ecuación $y = 36,44 + 0,043x - 0,0006x^2 + 0,0000037x^3$ ($R^2 = 0,98$) y DELTA-OPAL con la ecuación $y = 33,96 + 0,112x + 5,6E\text{-}016x^2 - 2,469E\text{-}06x^3$ ($R^2 = 0,99$) alcanzaron el máximo porcentaje de fibra 44 y 43%, con 135 y 126 kg·ha^{-1} de K, respectivamente (Figura 3.13).

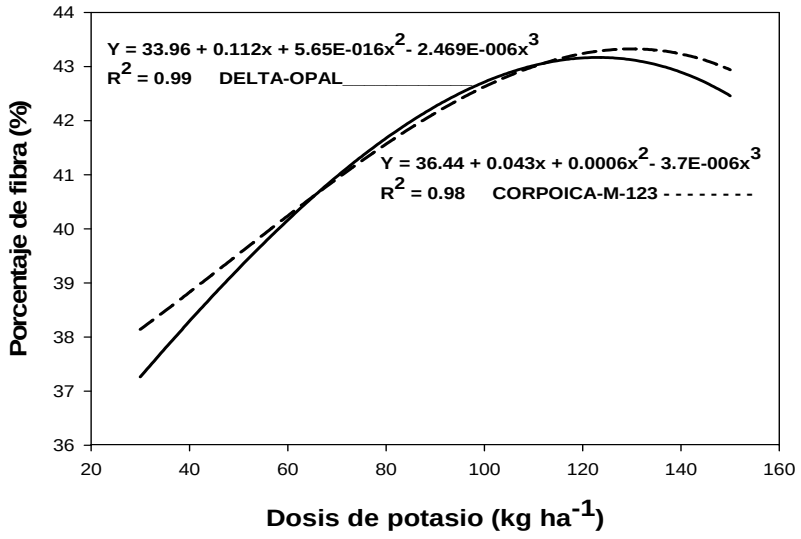


Figura 3.12 Porcentaje (%) de fibra para CORPOICA-M-123 y DELTA-OPAL según dosis de potasio

3.4.12. Calidad de la fibra de algodón

Para las variedades, la propiedad de calidad que expresó diferencia significativa fue la elongación, propiedad que valora la distancia que estira la fibra antes de romperse. Los resultados obtenidos fueron 5,412% para CORPOICA-M-123 que superó estadísticamente a DELTA-OPAL (5,157%). Según los patrones HVI (Diagonal, 2006) los valores varietales encontrados la clasificaron como fibra débil, por estar en el rango de 5,0 – 5,8, y por lo tanto su comportamiento en la producción del hilo generaría mayores revientes que una regular (5,9 – 6,7). La diferencia entre genotipos en este trabajo fue del 0,3% menor a lo encontrado por Pettigrew *et al*. (1996) que fue del 3%.

Los parámetros de calidad que a nivel de las dosis de potasio mostraron diferencia significativa fueron la longitud y el índice de uniformidad (Tabla 3.7). Para la longitud de la fibra la dosis de 120 kg·ha^{-1} de K alcanzó el máximo valor (30,73 mm) y superó al testigo comercial en 1,01 mm. Estos resultados difieren de las observaciones del Chaina, Soils and Fertilizers Working Station, 1987, quienes encontraron que el incremento en la longitud de la fibra fue de 2,12 mm. con respecto al testigo. Para los patrones HVI (Diagonal, 2006) el tratamiento de 120 kg·ha^{-1} de K se clasificó como fibra larga (30,5 – 34,5 mm.), mientras que con los demás tratamientos se clasificaron como fibra media, valor

normal en las dos variedades. En cuanto a la uniformidad de la longitud (Diagonal, 2006), los porcentajes de los tratamientos de 30 a 90 kg·ha^{-1} de K, son considerados promedio, mientras que 120 y 150 kg·ha^{-1} de K por expresar valor mayor a 85% son considerados altos (Tabla 3.7). Como se deduce, las dosis de potasio influyeron sobre la longitud de la fibra y uniformidad.

Tabla 3.7 Efecto de las dosis de potasio sobre la longitud e índice de uniformidad de la fibra

Tratamiento (kg·ha^{-1} de K)	Longitud (mm.)	Uniformidad (%)
30	29,72 b	84,6 b
60	30,23 ab	84,9 ab
90	30,48 ab	85,0 ab
120	30,73 a	85,1 ab
150	30,48 ab	85,3 a

*Columnas con letras diferentes presentan diferencia significativa al 0.05%, según Tukey

En la tabla 3.8 se muestra el comportamiento de la interacción variedad*dosis de potasio para las propiedades de calidad de la fibra, mostrando diferencia significativa en el micronaire, la madurez y la uniformidad. El comportamiento del micronaire en CORPOICA-M-123 no reportó una tendencia estable, dado que el mayor valor correspondió a 120 kg·ha^{-1} de K (4,07 µg pulg^{-1}) y el menor para 150 kg·ha^{-1} de K (3,84 µg pulg^{-1}); sin embargo, por clasificación HVI (Diagonal, 2006) todos clasificaron como micronaire promedio (3,7 – 4,7 µg pulg^{-1}). Para DELTA-OPAL el mayor valor se alcanzó con el tratamiento control comercial (30 kg·ha^{-1} de K) y el menor con 60 kg·ha^{-1} de K, resultados que difieren con lo reportado por Usherwood, (1985), Meredith, (1994) y Pettigrew *et al*. (1996), quienes afirman que a mayor dosis de K mayor finura. Según Meredith (1986, 1994), el micronaire es influenciado por el ambiente y el manejo agronómico del cultivo, tal como lo muestran los resultados con las dosis de potasio (Tabla 3.8).

La madurez presentó comportamiento diferencial estadísticamente entre dosis*variedad; sin embargo, no se mostró una tendencia frente a las dosis crecientes de K. El análisis por clasificación HVI (Diagonal, 2006), ubica a todos los tratamientos como maduros por estar en el intervalo de 86 – 95%. Los valores resultantes no concuerdan con los de Pettigrew *et al*. (1996) en donde el testigo redujo la madurez de la fibra en 5%.

La tabla 3.8, muestra que para la uniformidad las dos variedades presentan tendencia positiva en sus resultados, porque a mayor dosis de K mayor uniformidad. Por análisis HVI (Diagonal, 2006), los tratamientos 120 y 150 kg·ha^{-1} de K se clasifican como de uniformidad alta, por estar mayor a 85%, mientras que los demás como promedio (81 – 84%).

La variable resistencia de la fibra (g tex^{-1}) no mostró significancia en ninguno de los factores de evaluación (variedad, dosis de potasio y la interacción), aunque los valores resultantes se clasificaron entre resistentes y muy resistentes.

Tabla 3.8 Comportamiento de la calidad de la fibra por la interacción variedad*dosis de potasio en algodón

Tratamiento (kg·ha^{-1} de K)	Micronaire (µg pulg^{-1})		Madurez (%)		Uniformidad (%)	
	CORPOICA-M-123	DELTA-OPAL	CORPOICA-M-123	DELTA-OPAL	CORPOICA-M-123	DELTA-OPAL
30	3,99 ab	4,17 a	86,7 ab	87,7 a	84,8 b	84,4 b
60	4,03 ab	3,85 c	87,3 a	86,1 c	84,7 b	85,6 a
90	3,92 ab	3,98 ab	86,5 ab	86,5 ab	84,9 ab	84,9 ab
120	4,07 a	4,01 ab	87,0 ab	87,0 bc	85,0 ab	85,1 ab
150	3,84 c	4,07 b	86,1 b	87,0 bc	85,4 a	85,1 ab

*Columnas con letras diferentes presentan diferencia significativa al 0.05%, según Tukey

3.4.13. Fluorescencia de la clorofila (eficiencia fotosintética del PS II (F_v/F_m)) en algodón

En la tabla 3.9 se observa el comportamiento de las variedades de algodón respecto a la eficiencia fotosintética (F_v/F_m), durante dos lecturas realizadas a los 88 y 95 DDE. Para los 88 DDE las variedades no presentaron diferencia significativa; sin embargo, en forma general los valores de F_v/F_m para las dos variedades estuvieron por debajo de 0,832 lo cual indica que probablemente existe un cierto grado de daño sobre el PS II. Para la segunda lectura (95 DDE), las variedades CORPOICA-M-123 y DELTA-OPAL expresaron diferencia significativa para F_m y F_v/F_m. La disminución de F_v/F_m puede ser atribuido a la disminución de la máxima fluorescencia (F_m) que a la fluorescencia inicial (F_0) como lo

muestra la tabla 3.9. A los 95 DDE, CORPOICA-M-123 probablementte presenta mayor daño en PS II que DELTA-OPAL, como respuesta de tipo varietal.

Tabla 3.9 Fluorescencia inicial (F_0), fluorescencia máxima (F_m) y eficiencia fotosintética del PS-II (F_v/F_m) para CORPOICA-M-123 y DELTA-OPAL a los 88 y 95 DDE*

Variedades	F_0	F_m	F_v/F_m
88 DDE			
CORPOICA-M-123	526,63±36,1b	2524,8±469,5a	0,778±0,010a
DELTA-OPAL	557,18±47,6a	2599,8±482,8a	0,783±0,007a
95 DDE			
CORPOICA-M-123	133,53±17,15 a	492,42±67,29 b	0,718±0,02 b
DELTA-OPAL	140,68±21,69 a	550,74±107,80 a	0,732±0,03 a

*Columnas con letras diferentes presentan diferencia significativa al 0.05%, según Tukey. Los valores representan la media de cuatro repeticiones (± Desviación estándar).

En la tabla 3.10 se observa el comportamiento de las dosis de potasio por hectárea respecto a F_v/F_m, durante dos lecturas realizadas a los 88 y 95 DDE. Para las dos lecturas se presentó diferencia significativa; sin embargo, los valores de F_v/F_m para las dos variedades estuvieron por debajo de 0,832 lo cual indica que probablemente existe un cierto grado de estrés en las plantas y de daño sobre el PS II. Los resultados muestran que para las dos lecturas fue consistente que el tratamiento de 120 $kg \cdot ha^{-1}$ de K expresara los mayores valores de F_v/F_m, con 0,7960 y 0,7345 respectivamente; también se observa que para las dos lecturas el tratamiento que presenta menor eficiencia en el PS-II fue 30 $kg \cdot ha^{-1}$ de K o control comercial; con estos resultados se puede deducir que la dosis de 30 $kg \cdot ha^{-1}$ de K probablemente afecta la eficiencia del PS II que 120 $kg \cdot ha^{-1}$ de K, como respuesta a las dosis de K.

Tabla 3.10 Fluorescencia inicial (F_0), fluorescencia máxima (F_m) y eficiencia fotosintética del PS-II para las dosis de potasio por hectárea*

Dosis (kg·ha^{-1} de K)	F_0	F_m	F_v/F_m
88 DDE			
30	523,04±41,54 a	2402,08±525,39 c	0,7822±0.0080 c
60	545,08±39.80 a	2588,25±478,38 b	0,7894±0,0075 b
90	541,33±66,96 a	2502,61±463,42 b	0,7836±0.0078 c
120	559,83±35,87 a	2745,37±436,02 a	0,7960±0,0008 a
150	540,25±34,11 a	2572,87±506,88 b	0,7900±0,0111 b
95 DDE			
30	135,27±19,47a	509,10±78,98 c	0,7175±0,026 c
60	140,32±20,33 a	514,55±83,04 b	0,7207±0,013 b
90	135,82±23,66 a	522,07±110,37 b	0,7289±0,027 b
120	139,67±21,02 a	552,90±122,19 a	0,7345±0,033 a
150	134,42±17,92 a	509,27±83,19 c	0,7240±0,023 b

*Columnas con letras diferentes presentan diferencia significativa al 0.05%, según Tukey. Los valores representan la media de cuatro repeticiones (± Desviación estándar).

Maxwell y Johnson (2000) reportan que el valor óptimo promedio de F_v/F_m, en diferentes especies de plantas, está cercano a 0,832 (Björkman y Demmig, 1987; Reigosa y Pedrol, 2004), valores menores a éste sugieren que las plantas se encuentran en condiciones de estrés e indican de forma particular el fenómeno de fotoinhibición, en el cual el transporte de electrones a nivel del sitio de oxidación del agua en el PSII es bloqueado por algún factor de "estrés" y por tanto los valores de fluorescencia disminuyen (Gemel *et al*., 1997). Disminución en la F_v/F_m es un buen indicador de daño fotoinhibitorio cuando las plantas son sometidas a un amplio rango de estreses ambientales (Araus y Hogan, 1994; Angelopoulos *et al*., 1996; Yang *et al*., 1996) los cuales pueden estar asociados con alta irradianza. Esta reducción de F_v/F_m puede ser por un incremento en la pérdida de energía no radiactiva (baja regulación fotoprotectiva reversible) y/o por daño en los centros de reacción de PS II (inactivación irreversible del PSII) (Araus y Hogan, 1994; Baker y Bowyer, 1994; Long *et al*., 1994), el primer proceso reduce tanto F_0 como F_m (Butler, 1978; Demmig-Adams *et al*., 1989), mientras que el segundo puede causar un marcado decrecimiento sólo en F_m (Powles y Björkman, 1978; Demmig *et al*., 1987),

correspondiendo este último proceso al comportamiento de las variedades y las dosis de potasio del estudio.

3.4.14. Actividad de la sacarosa sintetasa en algodón

En general, en la figura 3.14 se observa que la menor actividad específica de SS correspondió al pecíolo, intermedia para las estructuras componentes de la cápsula como son las brácteas y carpelos, y la mayor para la hoja. Este comportamiento puede ser explicado por lo encontrado por Fauconnier (1973), quien reporta que un cultivo del algodón que produce 560 kg ha^{-1} de fibra absorbe un total de 105 kg N, 42 kg P_2O_5 y 80 kg K_2O ha^{-1}, donde los 80 kg de K_2O se distribuyeron en la planta, así: 5,96 en raíces, 17,31 tallo, 19,33 hojas, 20,06 cápsulas, 14,29 semillas y 2,58 fibra; mostrando que los mayores valores de absorción de K corresponden en su orden a las cápsulas y hojas como lo evidencian los resultados del presente estudio. Sin embargo, Halevy y Bazelet, (1992) reportan que mediante análisis de absorción por estructura de la planta de algodón, los carpelos fueron el mayor depósito de K con un contenido hasta 4% de K, que representa el 60% del total de K acumulado por la planta, ésta estructura por su alto contenido de potasio se asume debió ser la de mayor actividad de SS. Esta respuesta diferencial de la SS en cada uno de los órganos tanto a nivel de variedad como de dosis de potasio está expresada probablemente por la respuesta de las variedades al ambiente del experimento.

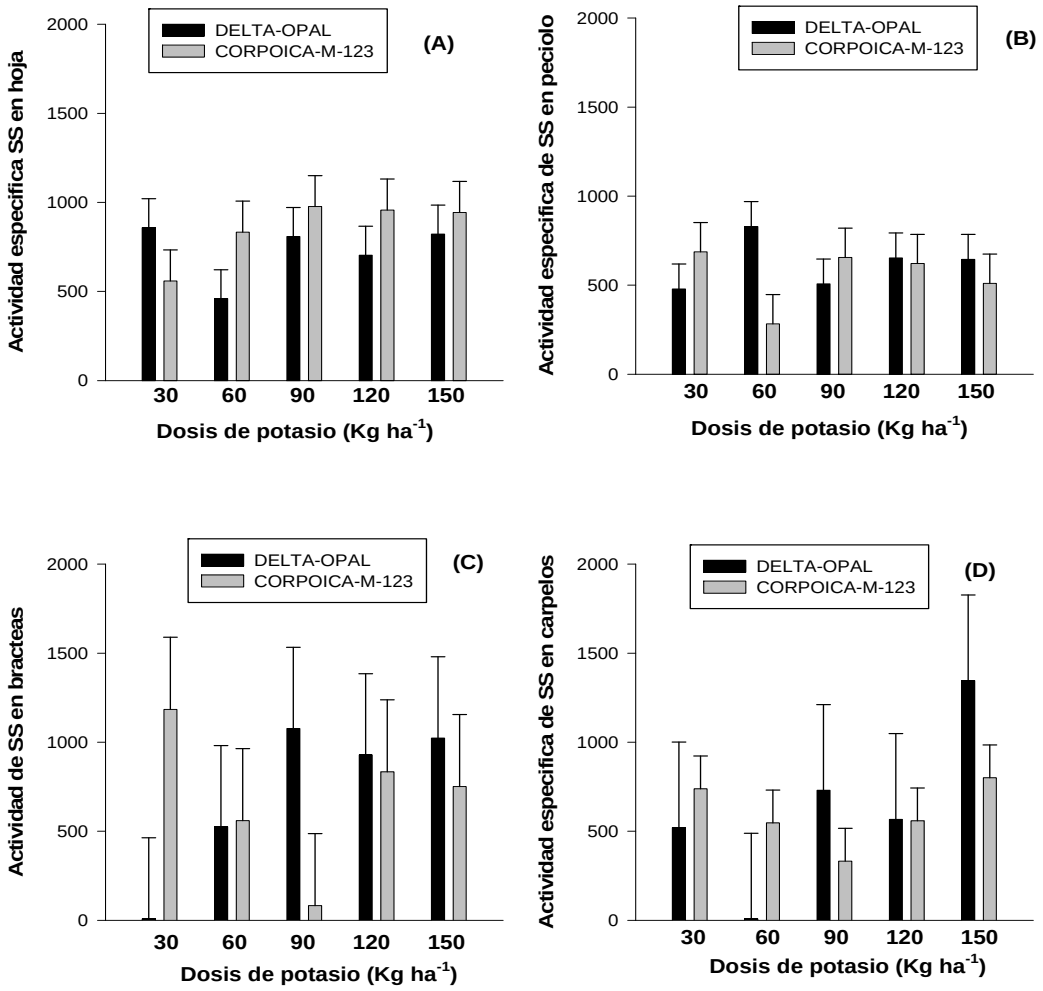


Figura 3.13 Actividad específica de la sacarosa sintetasa en hoja, pecíolo, brácteas y carpelos de algodón a los 88 DDE. Cada punto representa la media en triplicado.

La figura 3.15 muestra el comportamiento de la actividad específica de SS en la fibra a los 88 DDE, época que coincide con la etapa de engrosamiento de la muestra de fibra evaluada. Como resultado todos los tratamientos presentaron actividad de la SS. La mayor actividad correspondió para la variedad CORPOICA-M-123 con las dosis de 90 y 120 kg·ha^{-1} de K posiblemente debido a una mayor disponibilidad de sacarosa para la formación de la fibra, en dicha variedad. Para DELTA-OPAL la respuesta de la SS fue muy baja, mostrando su mayor actividad con la dosis de 120 kg·ha^{-1} de K. La menor actividad por variedad*dosis de potasio fue muy inconsistente, dado que para CORPOICA-M-123 fue 150 kg·ha^{-1} de K y para DELTA-OPAL fue 90 kg·ha^{-1} de K, respuesta que puede ser explicada por el manejo diferencial del potasio por cada variedad.

Pettigrew (2001), encontró que en la fibra las concentraciones de glucosa y fructosa se incrementan durante las etapas tempranas de desarrollo y llegan a su máximo durante la formación de la pared secundaria de la fibra, que fue la época del muestreo realizado en el presente trabajo, evidenciando el efecto del potasio en la actividad de SS con el tratamiento de 120 kg·ha^{-1} de K para las dos variedades. Pettigrew, (2001) y Basra *et al.* (1990) reportan que dentro de la fibra la sacarosa es degradada por la invertasa y la SS, en glucosa y fructosa, que luego por su metabolismo propio son utilizadas para la formación de la celulosa, por lo tanto la menor actividad específica de SS para CORPOICA-M-123 con el tratamiento de 150 kg·ha^{-1} de K puede ser explicado por la menor deposición de celulosa, que produjo menor micronaire y madurez, resultado que difiere con lo reportado por Pettigrew y Meredith (1992), quienes trabajando con plantas deficientes en potasio encontraron menor deposición de celulosa en la pared secundaria de la fibra, disminución del micronaire y de la madurez.

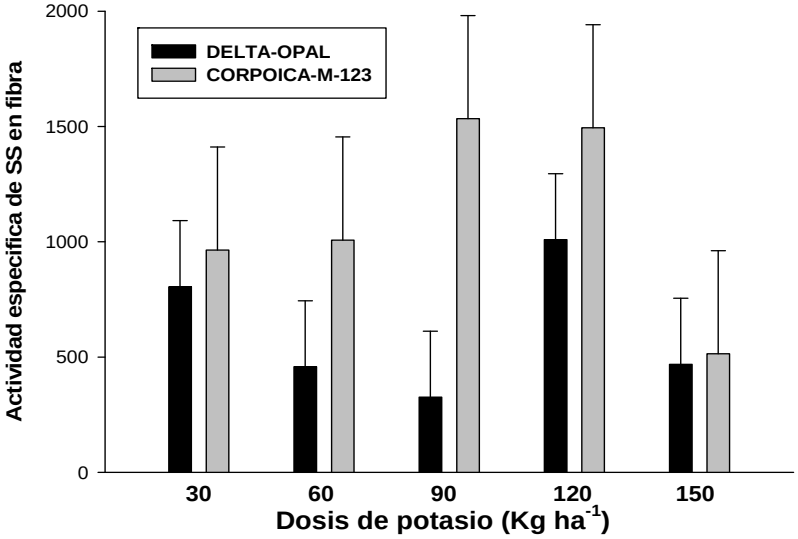


Figura 3.14 Actividad específica de la sacarosa sintetasa en fibra de algodón.

Cada punto representa la media en triplicado

3.5. CONCLUSIONES

Para CORPOICA-M123 y DELTA-OPAL, durante el cambio de fase vegetativa-juvenil a reproductiva, estructuras de demanda como el tallo redistribuyen sus asimilados hacia botones florales y posteriormente a llenado de cápsulas. La redistribución de fotoasimilados del tallo fue similar (12%) para CORPOICA-M123 y DELTA-OPAL; las hojas como fuente redistribuyeron igual porcentaje (45%), para las dos variedades, hacia las estructuras reproductivas, lo cual se vio reflejado en las cápsulas con incremento del 60 y 61% respectivamente. Los resultados evidencian igual comportamiento de las dos variedades en la redistribución de fotoasimilados.

Las plantas sometidas al tratamiento de 120 $kg \cdot ha^{-1}$ de K para CORPOICA-M-123, presentaron los mayores valores de IAF, TCC, TAN y TRC, debido a que acumularon mayor masa seca total y foliar, para DELTA-OPAL, los máximos valores para los índices de crecimiento no fueron consistentes. El tratamiento con 30 $kg \cdot ha^{-1}$ de K presentó las menores tasas de crecimiento del cultivo e índice de área foliar. Los resultados muestran respuesta diferencial entre las variedades y los niveles de potasio aplicados.

El aumento del IAF por encima de 5,0, incrementó el autosombreamiento del dosel en los diferentes tratamientos, y la tasa de asimilación neta comenzó a decrecer, por lo tanto, la comunidad de plantas tuvo ganancia de masa seca cada vez menor.

Los modelos generados demuestran buen ajuste tanto para la biomasa total como para las particiones en los diferentes órganos de las dos variedades. El modelo es posible extrapolarlo a otras condiciones similares dentro de la zona plana del valle cálido del alto magdalena.

Las dosis de potasio presentaron influencia sobre el rendimiento de algodón-semilla, fibra y porcentaje de fibra, con incremento de tipo exponencial de tercer grado. El mejor rendimiento de algodón-semilla y algodón-fibra fue en el tratamiento de 150 $kg \cdot ha^{-1}$ de K y, el mejor porcentaje de fibra fue para los tratamientos mayores a 90 $kg \cdot ha^{-1}$ de K.

El máximo rendimiento de algodón-semilla lo alcanzó DELTA-OPAL con 4583 kg ha^{-1} y dosis de 134 kg·ha^{-1} de K, y para CORPOICA-M-123 fue 4483 kg·ha^{-1} con 139 kg·ha^{-1} de K; para el rendimiento de algodón fibra el valor máximo fue igual para las dos variedades.

Para las variedades, la propiedad de calidad que expresó diferencia significativa fue la elongación, y para la interacción variedad*dosis de potasio las propiedades con diferencia significativa fueron micronaire, madurez y uniformidad.

La eficiencia fotosintética (F_v/F_m) presentó disminución en el intervalo de 120 kg·ha^{-1} de K a 30 kg·ha^{-1} de K, indicando probablemente estrés en la planta.

La actividad de SS presentó diferencial de mayor a menor actividad entre hojas, carpelo, brácteas y pecíolo por variedad y dosis de potasio. La actividad de SS en la fibra se relacionó con micronaire, madurez y uniformidad para CORPOICA-M-123.

3.6. LITERATURA CITADA

ALBRECHT G, MUSTROPH A. (2003). Localization of sucrose synthase in wheat roots: increased in situ activity of sucrose synthase correlates with cell wall thickening by cellulose deposition under hypoxia. Planta 217:252-260.

AKMAL, A. Y M.J.J. JANSSENS. (2004). Productivity and light use efficiency of perennial ryegrass with contrasting water and nitrogen supplies. Field Crops Res. 88: 143-155.

AMOR Y, HAIGLER CH, JOHNSON S, WAINSCOTT M, DELMER DP. (1995). A membrane-associated form of sucrose synthase and its potential role in synthesis of cellulose and callose in plants. Proc Nat Acad Sci USA 92: 9353-9357.

ANGELOPOULOS, K., DICHIO, B., XILOYANNIS, C. (1996). Inhibition of photosynthesis in olive trees (Olea europaea L.) during water stress and rewatering. J. Exp. Botany 47 (301): 1093-1100.

ANGSTROM, A. (1924). Solar and terrestrial radiation. Quart. J. Royal Meteorol. Soc. 50: 121-125.

ARAUS, J.L., HOGAN, K.P. (1994). Comparative leaf structure and patterns of photoinhibition of the neotropical palms Scheelea zonensis and Socratea durissima growing in clearings and forest understory during the dry season in Panama. Am. J. Botany 81 (6): 726-738.

ASANO T, KUNIEDA N, OMURA Y, IBE H, KAWASAKI T, TAKANO M, SATO M, FURUHASHI H, MUJIN T, TAKAIWA F. (2002). Rice SPK, a calmodulin-like domain protein kinase, is required for storage product accumulation during seed development: phosphorylation of sucrose synthase is a possible factor. **Plant Cell**. 14: 619-628.

ASHLEY, D. A.; DOSS, B. D.; BENNETT, O. L. (1965). Relation of cotton leaf area index to plant growth and fruiting. **Agron. J**. 57: 61-64.

AZCON-BIETO, J AND TALON, M. (2000). Fundamentos de fisiología vegetal. McGraw-Hill/Iberoamericana de España. Madrid. 522 pp.

BAKER, D. N.; MEYER, R. E. (1966). Influence of stand geometry on light interception and net photosynthesis in cotton. **Crop Science**. 6: 15–19.

BAKER, D. N.; HESKETH, J. D. (1969). Respiration and carbon balance in cotton (Gossypium hirsutum L). In: BELWIDE COTTON PRODUCTION RESEARCH CONFERENCES. Proceedings. Memphis, National cotton Council. 60–64.

BAKER, N.R., BOWYER, J.R. (Eds.). (1994). Photoinhibition of Photosynthesis from molecular mechanisms to the field, gios Scientific Publishers, Oxford.

BAKER, D.N., J.R. LAMBERT &J.M. MACKINION. (1983). GOSSYM: a Simulator of Cotton Crop Growth and Yield. Technical Bulletin No ro89, South Carolina Agricultural Experiment Station. Clemson University, Clemson, South Carolina, 134 pp.

BAKER, N.R., ROSENQVIST, E. (2004). Applications of chlorophyll fluorescence can improve crop production strategies: an examination of future possibilities. **J. Exp. Bot.** 55: 1607–1621.

BANGE, M.P., MILROY, S.P. (2000). Timing of crop maturity in cotton: impact of dry matter production and partitioning. **Field Crops Res**. 68: 143–155.

BANGE, M. P., MILROY, S. P. (2004). Growth and dry matter partitioning of diverse cotton genotypes. **Field Crops Res**. 87: 73–87.

BARRAGÁN, E., DIAZ, A., NORATO., CAICEDO, A., MONTENEGRO, O., MENDOZA, L. A. (2005). El algodonero: manejo integrado del cultivo en el Valle Calido del alto Magdalena. Modulo 2 del tutorial: El algodonero manejo integrado del cultivo en Colombia. 143p.

BASRA **A,** MALIK C.P. (1984). Development of the cotton fiber**. Int. Rev. Cytol**. 89: 65-113

BASRA, A. S.; SARLACH, R. S.; NAYYAR, H.; MALIK, C. P. (1990). Sucrose hydrolysis in relation to development of cotton (Gossypium spp) fibres. Indian J. Exp. Bot. 34: 985–988.

BASSET, D. M., ANDERSON, W. D. AND WERKHOVEN, C. H. E. (1970). Dry matter production and nutrient uptake in irrigated cotton. **Agron, J**. 62: 299-303.

BAUER, P.J., FREDERICK, J.R., BRADOW, J.M., SADLER, E.J., EVANS, D.E. (2000). Canopy photosynthesis and fiber properties of normal- and late-planted cotton. **Agron. J**. 92: 518–523.

BEDNARZ, C.W., OOSTERHUIS, D.M., EVANS, R.D. (1998). Leaf photosynthesis and carbon isotope discrimination of cotton in response to potassium deficiency. **Environ. Exp. Bot.** 39: 131–139.

BELTRÃO, N.E. de M.; NÓBREGA, L.B. da; VIEIRA, D.J.; AZEVEDO, D.M.P. de; SOUSA, R.P. (1990). Remoção da gema apical e de botões florais em algodoeiro herbáceo de curto período de floração. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**. 25 (7): 1047-1054.

BERINGER, H., NOTHDURFT, F. (1985). Effects of potassium on plant and cellular structures. In: MUNSON, R.D. (Ed.). Potassium in Agriculture: American Society of Agronomy, Inc.; Crop Science Society of America, Inc.; Soil Science Society of America, Inc. Madison, 14: 35-67.

BETTER CROPS. (1990). Foliar-Feeding of Multi-K in cotton increase yield and improve fiber quality. Boral E. Agronomic and marketing information center. Bol N. 5.

BJÖRKMAN, O., DEMMIG, B. (1987). **Plant**a. 170: 489-504.

BOOTE, K. J., JONES. J. W. PICKERING. N. B. (1996). Potential uses and limitations of crop models. Agron. J. 88: 704–716.

BOONE, M. Y., PORTER, D. O., MACKINION, J. M. (1993). Calibration of GOSSYM: Theory and practice. **Comput. Electron**. **Agric**. 9: 193–203.

BOURLAND, F. M.; WATSON Jr. , Y. E. (1990). Cottmap. A technique for evaluating structure and yield of cotton plants. **Crop Science**. 30: 224–226.

BRADFORD, M. A. (1976). A rapid and sensitive method for the quantitation of microgram quantities of protein-dye binding. **Anal. Biochem**. 72: 248–254.

BROUDER, S. M.; CASSMAN, K. G. (1990). Root development of two cotton cultivars in relation to potassium uptake and plant growth in vermilitic soil. **Field crops Research**. 23: 187–203.

BROWN, R. H. (1984). Growth the green plant. In. Physiological basis of crop growth and development. **American Society of Agronomy**, 677: 153-174.

BUTLER, W. L. (1978) Energy distribution in the photosynthetical apparatus of photosynthesis. **Annual Review of Plant Physiology** 29: 345-378.

CARLSON SJ, CHOUREY P. S. (1996). Evidence of plasma membrane associated forms of sucrose synthase in maize. **Mo1. Gen. Genet**. 252: 303-310.

CARRANZA, C., LANCHERO, O., MIRANDA, D., SALAZAR, R., CHAVES, B. (2008). Modelo simple de simulación de distribución de masa seca en brócoli (Brassica

sp) variedad Coronado y repollo (*Brassica oleracea*) hibrido Delus cultivados en la Sabana de Bogota. **Agronomía Colombiana** 26(1), 23–31.

CASSMAN, K. G., KERBY, T. A. ROBERTS, B. A. BRYANT, D. C.; AND HIGASHI, S. C. (1990). Potassium nutrition effects on lint yield and fiber quality of Acala cotton. **Crop Sci**. 30 (3): 672–677.

CHAINA, SOILS AND FERTILIZERS WORKING, STATION, HUBEI PROVINCE. (1987). Potassium deficiency and effect of K application in cotton growing areas in the Jiangham Plain. **China Cottons** 4: 31–32.

CHEN, J.; GABELMAN, W. H. (2000). Morphological and physiological characteristics of tomato roots associated with potassium acquisition efficiency. **Scientia Horticulture**, 83: 213–225.

CHOUREY P. S, NELSON O. (1979) Interallelic complementation at the sh locus in maize at the enzyme level. **Genetics** 91: 317-325.

CHOUREY PS, CHEN YC, MILLER M.E. (1991) Early cell degeneration in developing endosperm is unique to the Shrunken mutation in maize. **Maydica**. 36: 141-146.

CHOUREY PS, MILLER M.E. (1995) On the role of sucrose synthase in cellulose and callose biosynthesis in plants. In HG Pontis, GL Salerno, EJ Echeverria, eds, Sucrose Metabolism, Biochemistry, Physiology and Molecular Biology. American Society of Plant Physiologists, Rockville, MD. 80-87

CONSTABLE, G. A.; RAWSON, H. M. (1980). Effect of leaf position, expansion and age on photosynthesis, transpiration and water use efficiency of cotton. **Australian Journal Plant Physiol**. 7: 89–100.

COPE Jr., J.T. (1981). Effect of 50 years of fertilization with phosphorous and potassium on soil test levels and yields at six locations. **Soil Sci. Soc. Am. J**. 45: 342–347.

CURT, M.D., J. FERNANDEZ Y M. MARTINEZ. (1998). Productivity and radiation use efficiency of sweet sorghum (Sorghum bicolor L. Moench cv. Keller) in central Spain. **Biomass Bioenergy**. 14: 169-178.

DAIE, J. (1985). Carbohydrate partitioning and metabolism in crops. **Horticultural Review**. Vol. 7: 69 – 108.

DAVIDONIS, G. H., JOHNSON, A.S., LANDIVAR, J.A., FERNANDEZ, C.J. (2004). Cotton fiber quality is related to boll location and planting date. **Crop Sci**. 96: 42–47.

DeLANGHE, E.A.L. (1986). Lint development. In: Mauney, J.R., Stewart, J.McD. (Eds.), Cotton Physiology. The Cotton Foundation, Memphis, TN, pp. 325–350.

DELMER, D.P., AMOR, Y. (1995). Cellulose biosynthesis. **Plant Cell** 7: 987–1000.

DEMMIG, B., WINTER, K., KRUGER, A. AND CZYGAN, F. C. (1987) Photoinhibition and zeaxanthin formation in intact leaves. A possible role of the xanthophyll cycle in the dissipation of excess light energy. **Plant Physiol.** 84: 218-224.

DEMMIG-ADAMS, B., ADAMS III, W. W., WINTER, K., MEYER, A., SCHREIBER, U., PEREIRA, J. S., KRUGER, A., CZYGAN, F. C. AND LANGE, O. L. (1989) Photochemical efficiency of photosystem II, photon yield of CO2 evolution, photosynthetic capacity, and carotenoid composition during the midday depression of net CO2 uptake in Arbutus unedo growing in Portugal. **Planta** 177: 377-387

DEWAR, R.C., B.E. MEDLYN Y R.E. MCMURTRIE. (1998). A mechanistic analysis of light and carbon use efficiencies. **Plant Cell Environ**. 21: 573-588.

DEWAR, R.C. (1996). The correlation between plant growth and intercepted radiation: an Interpretation in terms of optimal nitrogen content. **Ann. Bot**. 78: 125-136.

De WIT, C.T. (1965). Photosynthesis of Leaf Canopies. PUDOC, Wageningen.

DHINDSA, R. S., BEASLEY, C. A. AND TING I. P. 1975. Osmoregulation in cotton fibre. Accumulation of potassium and malate during growth, **Plan Physiol.** 56: 394–398.

DIAGONAL. (2006). Extraído el 10 junio 2007 desde http://www.diagonal-colombia.com/ClasificacionHVI.asp

DOSTERHUIS, D. M.; WULLSEHLEGER, S. D. ; MAPLES, R.L. AND MILEY, W. N. (1990). Foliar, Feeding of potassium nitrate in cotton. Potash and Phosphate Institute. Atlanta, Georgia.

DUNCAN, W.G. (1972). SIMCOT: a simulator of cotton growth and yield. In: C.M. Murphy (Ed.), Proceedings of a Workshop for Modeling Tree Growth. Duke University, Durham, North Carolina, pp. II5-II8.

FAUCONNIER, D. (1973). Fertilizing for high yields: Cotton. I.P.I. Bull. No. 2, Bern. 40 pp.

FISCHER, J., HODGES, T. K. (1969). Monovalent ion stimulated adenosine triphosphatase from oat roots. **Plant Physiol**. 44: 385-395.

FLORÉZ, V., FERNÁNDEZ, A., MIRANDA, D., CHAVES B., GUZMÁN, J. (2006). Avances sobre fertirriego en la floricultura Colombiana. 1ª edición. Unibiblos. Bogotá, Colombia. PP 43-52.

FRANCE, J., THORNLEY, J. H. M. (1984). Mathematical models in agriculture. A quantitative approach to problems in agriculture and related sciences. Butterworths, London 335.

FRYE, A. (1986). Fertilizantes. Bases técnicas para el cultivo del algodón en Colombia. 3ª. Ed. Federación de Algodóns, Bogota, D. E. 81–154 pp.

FYE, R.E., REDDY, V.R., BAKER, D.N. (1984). The validation of GOSSYM: Part 1—Arizona conditions. **Agr. Syst**. 14: 85–105.

GALINDO, J.R. (2006). Desarrollo de un modelo explicativo de la productividad potencial del cultivo de arveja (*Pisum sativum* L.) var. Santa Isabel bajo condiciones de la sabana de Bogotá. Tesis de doctorado. Facultad de Agronomía. Universidad Nacional de Colombia. Bogotá.

GALLAGHER, J.N. Y P.V. BISCOE. (1978). Radiation absorption, growth and yield of cereals. J. **Agric. Sci**. 91: 47-60.

GARBEYA, C., GARBEY, M. & MULLERA, S. (2006). Using modelling to improve models ecological modelling 197: 303-319.

GARCÍA, R., E.T. KANEMASU, B.L. BLAD, A. BAUER, J.L. HATFIELD, D.J. MAJOR, R.J. REGINATO Y K.G. HUBBARD. (1988). Interception and use efficiency of light in winter wheat under different nitrogen regimes. Agric. For. Meteorol. 44: 175-186.

GEIGENBERGER, P., STITT, M. (1991). A "futile" cycle of sucrose synthesis and degradation is involved in regulating partitioning between sucrose, starch and respiration in cotyledons of germinating Ricinus communis L seedlings when phloem transport is inhibited. Planta 185: 81–90.

GEIGENBERGER P, STITT M. (1993). Sucrose synthase catalyses a readily reversible reaction *in vivo* in developing potato tubers and other plant tissues. **Planta** 189: 329-393.

GARDNER, P., PEARCE, R.B., MITCHELL, R.L. (2003). Physiology of crop plants. Blackwell publishing company. Iowa, 326 p.

GEMEL, J., B. WATERS-EARHART, M. R. ELLERSIECK, A. ASFAW, G. F. KRAUSE, V. PURI & W. R. LOWER**. (**1997). Photosynthetic electron transport as a bioassay. Págs 209-224 en: Wang, W., J. W. Gorsuch & J. S. Hughes. Plants for Environmental Studies. CRC Press LLC. New York.

GENTY, B., BRIANTAIS, J. M. AND VIERA DA SILVA, J. B. (1987) Effects of drought on primary photosynthetic processes of cotton leaves. **Plant Physiol.** 83: 360-364.

GERIK, T.T., OOSTERHUIS, D.M., TOLBERT, H.A. (1998). Managing cotton nitrogen supply. Adv. Agron. 64: 115–147.

GIFFORD, R.M. (1995). Whole plant respiration and photosynthesis of wheat under increased CO2 concentration and temperature: long-term vs. short-term distinctions for modelling. **Glob. Change Biol**. 1: 385–396.

GORMUS, O. AND KANAT, A. D. (1998). Yield and quality properties of cotton as affected by potassium fertilization. In: Proc. World Cotton Research Conference-2 "New Frontiers in Cotton Research". Athens, Greece. 1: 441–444.

GORMUS, O.; YUCEL, C. (2002). Different planting date and potassium fertility effects on cotton yield and fiber properties in the Çukurova region, Turkey. Field Crops Research. 78 (2-3): 141-149.

GOSSE, G., C. VARLET-GRANCHER, R. BONHOMME, M. CHARTIER, J. ALLIRAND Y G. LEMAIRE. (1986). Production maximale de matiere seche et rayonnement solaire intercepte par un couvert vegetal. Agronomie 6: 47–56.

GOUDRIAAN, J.Y., H.H. VAN LAAR. (1995). Modeling Potential Growth Processes. Textbook with exercises. Kluwer Academic Publishers. The Netherlands. 238 p

GRAF, B., O. RAKOTOBE, P. ZAHNER, V. DELUCCHI Y A.P. GUTIERREZ. (1990). A simulation model for the dynamics of rice growth and development: Part I - The carbon balance. Agric. Syst. 32: 341-365.

HALEVY, J. (1976). Growth rate and nutrient uptake of two cotton cultivars grown under irrigation. Agron. J. 68: 701–705.

HALEVY J. (1977). Estimation of avaible K for cotton by soil analysis. Plant and soil. 47: 363-373.

HALEVY, J AND MARKOVITZ. T. (1988). Foliar NPKS application to cotton from full flowering to boll filling. **Fertilizer Research**. 15: 247–252.

HALEVY, J AND BAZELET M. (1992). Fertilización del algodón para rendimientos altos. INPOFOS. Boletín 2. 64 p.

HAMMER, G.L. Y G.C. WRIGHT. (1994). A theoretical analysis of nitrogen and radiation effects on radiation use efficiency in peanut. **Aust. J. Agric. Sci**. 45: 575-589.

HAXELTINE, A. E I.C. PRENTICE. (1996). A general model for the light-use efficiency of primary production. **Funct. Ecol**. 10: 551-561.

HANAN, J.S. &A.B. HEARN. (2003). Linking physiological and architectural models of cotton. **Agricultural systems** 75: 47-77·

HEARN, A. B. 1976. Crop physiology. In: Arnold, M. H. (ed) Agricultural research for development; The namulonge contribution. London, England: Cambridge University Press, 76-122 pp.

HEARN, A. B.; CONSTABLE, G. A. (1984). Cotton. In: Goldsworthy, P. R.; Fischer, N. M. (eds). The physiology of tropical field crops. New York: John Wiley. 495–527.

HEARN, A.B. (1994). OZCOT: a simulation model for cotton crop management. **Agricultural Systems** 44: 257-299.

HEINLEIN M, STARLINGER P. (1989). Tissue- and cell-specific expression of two sucrose synthase isozymes in developing maize kernels. **Mo1 Gen Genet** 215: 441-446.

HEITHOLT, J.J., PETTIGREW, W.T., MEREDITH, W.R. (1992). Light interception and lint yield of narrow row-cotton. **Crop Sci**. 32: 728–733.

HEITHOLT, J. J. (1994). Canopy characteristic associated with deficient and excessive cotton plant densities. **Crop. Scie**. 34: 1291-1297.

HENDRIX D. L. (1990). Carbohydrate and carbohydrate enzymes in developing cotton ovules. **Physiol Plantarum** 78: 85-92.

HENDRIX, D. L., GRANGE, R. I. (1991). Carbon partitioning and export from mature cotton leaves. **Plant Physiol**. 95(1): 228-233.

HUBER, S. C. (1983). Role of sucrose phosphate synthase in partitioning of carbon in leaves. **Plant Physiol.** 71: 818-821.

HUNT, R. (1982). Plant growth curves. The functional approach to plant growth analysis. Edward Arnold publishers. London, pp 248.

HUNT, R. (1990). Basic growth analysis. Unwin Hyman. London, pp 112.

ICA. (2006). Subgerencia de protección y regulación Agrícola. resultados de los ensayos semicomerciales sobre la evaluación de la tecnología conjunta bollgard® + roundup ready (mon-531 x mon-1445) en el cultivo del algodonero en las subregiones naturales Valle del alto Magdalena y Valle del Cauca. 18p.

IMAI, K., K. SHIMABE, K. TANAKA Y T. KAWANA. (1994). Studies on matter production of edible canna (Canna edulis Ker.). Jpn**. J. Crop Sci**. 63: 345-51.

JACKSON, B.S., ARKIN, G.F., HEARN, A.B. (Eds.). (1988). The cotton simulation model ‘‘COTTAM’’: fruiting model calibration and testing. Trans. ASAE. 31: 846–854.

JALLAS, E., P. MARTIN, R. SEQUEIRA, S. TURNER, M. CRETENET & E. GERARDEAUX. (2000). Virtual COTONS, the firstborn of the next generation of simulation models. Virtual Worlds. 1834: 235-244.

JONES, J.W., L.G. BROWN & J. HESKETH. (1980). COTCROP: a computer model for cotton growth and yield. In: J.D. Hesketh &J.W. Jones (Eds), Predicting Photosynthesis for Ecosystem Models. CRC Press, Boca Raton, Florida, pp. 209-241.

JONES C.A. Y KINIRY J.R. (eds.). (1986). CERES-Maize, a simulation model of maize growth and development. Texas A&M University Press. College Station. 194 p.

JONES, J.W. Y RITCHIE. J. T. (1990). Crop growth models. pp 63-69. En: Hofman, G.J., T.A. Howell y K.H. Solomon (eds.). Management of farm irrigation systems. ASAE, St. Joseph.

KAFKAFI, U. (1990). The functions of plant K in overcoming environmental stress situations. In: Proc. 22nd colloquium of IPI, pp. 81-93, held in Soligorsk, USSR, IPI, Bern.

KAFKAFI, U. (1997). Impact of potassium in relieving plants from climatic and soil-induced stresses. In: Food security in the WANA region, the essential need for balanced fertilization, A.E. Johnston (ed.), pp. 313-327, IPI, Bern.

KAGE, H., C. ALT Y H. STUTZEL. (2001a). Predicting dry matter production of cauliflower (Brassica oleracea L. botrytis) under unstressed conditions. I. Photosynthetic parameters of cauliflower leaves and their implications for calculations of dry matter production. **Scientia Hort**. 87: 155-170.

KAGE, H., H. STUTZEL Y C. ALT. (2001b). Predicting dry matter production of cauliflower (Brassica oleracea L. botrytis) under unstressed conditions Part II. Comparison of light use efficiency and photosynthesis-respiration based modules. **Scientia Hort**. 87: 171-190.

KOOMAN, P. L. (1995). Yielding ability of potato crops as influenced by temperature and daylength. PhD. Thesis. Landbouw Universiteit Wageningen.

KRAUSE, G. H. AND WEIS, E. (1991) Chlorophyll fluorescence and photosynthesis: the basics. **Annuall Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology**. 42: 313-349.

KUBOTA, F., Y. MATSUDA, W. AGATA Y K. NADA. (1994). The relationship between canopy structure and high productivity in napier grass, Pennisetum purpureum Schumach. **Field Crops Res**. 38: 105-10.

LARSON, J.A., MAPP, H.P., VERHALEN, L.M., BANKS, J.C. (1996). Adapting a cotton model for decision analyses: a yield response evaluation. **Agric. Syst**. 50: 145–167.

LEIGH, R. A. Y WYN JONES, R. G. (1984). Hypothesis relating critical potassium concentrations for growth to the distribution and functions of this ion in the plant cell. **New Phytol**. 97: 1–13.

LI, W., ZHOU, Z., MENG, Y., XU, N., FOK., M. (2009). Modeling boll maturation period, seed growth, protein, and oil content of cotton (Gossypium hirsutum L.) in China. **Field Crops Research**. 112: 131–140.

LOOMIS, R. S.; WILLIAMS, W. A. (1963). Maximun crop productivity: An estimate. **Crop Science**. 3: 67–72.

LONG, S.P., HUMPHRIES, S., FALKOWSKI, P.G. (1994). Photoinhibition of photosynthesis in nature. **Annu. Rev. Plant Physiol. Plant Mol. Biol**. 45: 633-662.

LU C, ZHANG J. (1998). Effects of water stress on photosynthesis, chlorophyll fluorescence and photoinhibition in wheat plants. Australia Journal of Plant Physiology. 25: 883-892.

McKINION, J.M., D. BAKER, J. HESKETH &J.W. JONES. (1975). SIMCOT II - a Simulation of Cotton Growth and Yield. USDA-ARS S-52. USDA, Agricultural Research Service, Washington, D.e., pp. 27-82.

MALAVOLTA, E. (1980). Elementos da Nutrição Mineral de Plantas. São Paulo: Agronômica Ceres. 251p.

MALAVOLTA, E., CROCOMO, O. J. (1982). Funções do potássio na planta. In: YAMADA, T.; IGUE, K.; MALAVOLTA, E., VITTI, G. C., OLIVEIRA, S.A. (1997). Avaliação do Estado Nutricional das plantas: princípios e aplicações. 2. ed. Piracicaba: Associação Brasileira para a Pesquisa da Potassa e do Fosfato. 319p.

MALIK, M. N. A. (1998). Fertilizer role in sustainable cotton production. In: Proc. World Cotton Research Conference-2 "New Frintiers in Cotton Research". Athens, Greece. 1: 20– 9.

MARCELIS, L.F.M. (1996). Sink strength as a determinant of dry matter partitioning in the whole plant. **J. Exp. Bot**. 47: 1281–1291.

MARCELIS, L.F.M. (1994). A simulation model for dry matter partitioning in cucumber. **Ann. Bot.** 74: 43-52.

MARCELIS, L.F.M., HEUVELINK, E., GOUDRIAAN, J. (1998). Modeling biomass production and yield of horticultural crops: a review**. Scientia Horticulturae**. 74: 83-111.

MARSCHNER, H. (2002). Mineral Nutrition of Higher Plants. San Diego: Academic Press. 888p.

MASSACCI, A, NABIEV, S M, PIETROSANTI, L, NEMATOV, S. K., CHERNIKOVA, T. N., THOR, K., LEIPNER, J. (2008). Response of the photosynthetic apparatus of cotton (Gossypium hirsutum) to the onset of drought stress under field conditions studied by gas-exchange analysis and chlorophyll fluorescence imaging. **Plant Physiology and Biochemistry** 46: 189-195.

MAUNEY, J. R. (1986). Vegetative growth and development of fruiting structures. In: Cotton Physiology. The Cotton Foundation, Memphis, TN, pp. 11–28.

MAXWELL, K., JOHNSON. G. N. (2000). Chlorophyll fluorescence—a practical guide. **Journal of Experimental Botany** 51: 659–668.

MEDINA, G. A., BOLIVAR, J. L., OROZCO DE AMEZQUITA, M., RAMIREZ, P. J. (1995). "Contribución al conocimiento del cultivo de *Gypsophila paniculada* L. cv. Perfecta 1, bajo condiciones de invernadero en la Sabana de Bogotá: Análisis de crecimiento". **Revista Comalfi**, 21(1): 21–31.

MEDLYN, B.E. (1998). Physiological basis of the light use efficiency model. **Tree Physiol**. 18, 167-176.

MENDOZA, A., JARMA, A., CASTRO, L., BORNACELLI, C. (2001). CORPOICA-M-123 Variedad mejorada de algodón de fibra media. Plegable divulgativo No. 4. Codazzi, Cesar. 6 p.

MENGEL, K.; KIRBY. E. A. (1979). Principles of plant nutrition. Bern. Switzerland: International Potash Institute. 593 p.

MEREDITH, W. R. Jr. (1986). Fiber quality variation among USA cotton growing. In J Brown. Ed. Proc. Beltwide Cotton Conf. Natl. Cotton Council Memphis. T. N. pp. 105 - 106.

MEREDITH, W. R. Jr. (1994). Where does fiber quality come from. Reprinted from proceeding of the Beltwide cotton conference National C. Council. Memphis. 155–157 p.

MINISTERIO DE AGRICULTURA Y DESARROLLO RURAL. (2005). La cadena de algodón en Colombia una mirada global de su estructura y dinámica, 1991-2005. Documento de trabajo Nro. 53. 46p.

MOHAMMED, G.D., BINDER, W.D., GILLIES, L. (1995). Chlorophyll fluorescence: a review of its practical forestry applications and instrumentation. **Scand. J. For. Res**. 10: 383–410.

MONTEITH, J.L. (1969). Light interception and radiation exchange in crop stands. En: Easten, J.D. (ed.). Physiological aspect of crop yield. ASA, Madison, WI, pp. 89-111.

MONTEITH, J.L. (1977). Climate and the efficiency of crop production in Britain. **Philos. Trans. R. Soc.** London Ser. B: 281: 277-294.

MONTEITH, J.L. (1996). The quest for balance in crop modeling. **Agron. J**. 88: 695-697.

MUCHOW, R.C. Y R. DAVIES. (1988). Effect of nitrogen supply on the comparative productivity of maize and sorghum in a semi-arid tropical environment. Radiation interception and biomass accumulation. **Field Crops Res**. 18: 17-30.

MUTSAERS, H.J .W. (1984). KUTUN: a morphogenetic model for cotton (Gossypium hirsutum L.). **Agricultural Systems** 14: 229-257.

MURAMOTO, H.; HESKETH, J.; ELMORE, C. D. (1967). Leaf growth, leaf aging, and leaf photosynthetic rates of cotton, plants. In: BELWIDE COTTON PRODUCTION RESEARCH CONFERENCES, 1967. Dallas, Texas. Proceedings. Memphis: National Cotton Council. pp. 161–16.

OLESEN, J. E., GREVSEN. Y K (1997). Effects of temperature and irradiance on vegetative growth of cauliflower (Brassica oleracea L. botrytis) and broccoli (Brassica oleracea L. italica). **J. Exp. Bot**. 48: 1591-1598.

OOSTERHUIS, D. M. (1990). Growth and development of a cotton plant. In: Nitrogen nutrition of Cotton: Practical Issues. American Society of Agronomy, Madison, WI, p 1–24.

OOSTERHUIS, D.M. (1994). Potassium nutrition of cotton in the USA with particular reference to foliar fertilization. In: Constable, G. A., Forrester, N.W. (Eds.), Proceeding of the World Cotton Research Conference 1. CSISO, Canberra. 133–146.

PAN, X., X. HAN &Z. DONG. (1997). A cotton growth and development simulation model COTGROW: I. Photosynthesis and dry matter partitioning. Cotton Science 9: 132-141. (in Chinese with English abstract).

PAPAGEORGIOU, G. (1975). in: Govindjee (Ed.), Bioenergetics of Photosynthesis, Academic Press, New York . 319-366.

PENNING DE VRIES, F.W.T., D.M. JANSEN, H.F.M. BERGER Y A. BAKEMA. (1989). Simulation of ecophysiological processes of growth in several annual crops. Pudoc. Wageningen. 271 p.

PERCHERON, F. (1962). Colorimetric determination of sucrose and fructofuranosidase by the tiobarbituric acid reaction. C. R. Hebb. Seances Acad. Scie., Paris, v. 255, p 2521–2522.

PETTIGREW, W. T., MEREDITH JR. W. R. (1992). Potassium fertilization influences cotton dry matter and yield. Better Crops with Plant Food, Norcross, v. 76, p. 22-23, winter 1992.

PETTIGREW, W.T., HEITHOLT, J.J., MEREDITH, W.R. (1996). Genotypic interactions with potassium and nitrogen in cotton of varied maturity. Agron. J. 88: 89–93.

PETTIGREW, W. T. (2001). Environmental effects on cotton fiber carbohydrate concentration and quality. **Crop. Sci**. 41: 1108–1113.

PETTIGREW, W. T. (2003). Relationships between insufficient potassium and crop maturity in cotton. **Agron. J.** 95: 1323–1329.

PETTIGREW WT (2004) Physiological consequences of moisture deficit stress in cotton. **Crop Sci.** 44: 1265–1272.

PLANT, R. E., KERBY, T. A., ZELINSKI L. J., MUNK, D. S. (1998). A qualitative simulation model for cotton growth and development. **Computer and Electronics in Agriculture.** 20: 165–183.

POORTER, H. (1989). Plant growth analysis: towards a synthesis of the classical and the functional approach. **Physiologia Plantarum** 75: 237-244.

POWLES, S. B.; BJÖRKMAN, O. (1978). Photoinhibition of photosynthesis: effect on chlorophyll fluorescence at 77 K in intact leaves and in chloroplast membranes of Nerium oleander. **Planta** 156: 97-107.

PRETTY, K. M. O. (1982). Potássio na qualidade dos produtos agrícolas. In: YAMADA, T.; IGUE, K.; MUZILLI, O.; USHERWOOD, N.R. (Eds.) Potássio na Agricultura Brasileira. Piracicaba: Instituto da Potassa e Fosfato (EUA). pp. 177-194.

PRUSINKIEWICZ, P. (1998). Modeling of spatial structure and development of plants: a review. **Scientia Horticulturae** 74: 113–149.

QUISENBERRY, J.E., ROARK, B. (1976). Influence of indeterminate growth habit on yield and irrigation water-use efficiency in upland cotton. **Crop Sci**. 16: 762–765.

RADFORD, P.J. (1967). Growth Analysis Formulae – their use and abuse. **Crop Science** 7: 171-175.

RAMEY Jr., H. H. (1986). Stress influences on fiber development. In: Mauney,J. R., Stewart, J.McD. (Eds.), Cotton Physiology. The Cotton Foundation, Ramey Jr., H.H., 1986. Stress influences on fiber development. In: Mauney, J.R., Stewart, J.McD. (Eds.), Cotton Physiology. The Cotton Foundation, Memphis, TN, USA, pp. 315–359.

REDDY, V.R., BAKER, D.N. (1990). Application of GOSSYM to analysis of the effects of weather on cotton yields. **Agric. Syst**. 32: 83–95.

REDDY, V.R., BAKER, D.N. (1988). Estimation of parameters for the cotton simulation model GOSSYM: cultivar differences. **Agric. Syst**. 26: 111–122.

REDDY, R, K., ZHAO, D. (2005). Interactive effects of elevated CO2 and potassium deficiency on photosynthesis, growth and biomass partitioning of cotton. **Field Crops Research**. 94. 201-213.

REIGOSA, M., PEDROL, N. (2004). La ecofisiología vegetal, una ciencia de síntesis. Thomson editores. España. 1193 pp.

RIMON, D. (1989). Functions of potassium in improving fibre quality of cotton. In: Methods of K-research in plants. Proceeding of the 21 colloquium. pp. 319–333.

ROSENTHAL, W.D., GERIK, T.J. (1991). Radiation use efficiency among cotton cultivars. **Agron. J.** 83: 655–658.

ROSS, J. (1981). The radiation regime and architecture of plant stands. Dr. Junk Publishers, The Hague. 391 p.

RUAN Y. L, LLEWELLYN D. J, FURBANK R. T. (2003). Suppression of sucrose synthase gene expression represses cotton fiber cell initiation, elongation and seed development. **Plant Cell**. 15: 952-964.

SABINO, N.P., SILVA, N.M., SABINI, J.C., KONDO, I.I. (1984). Effects of splitting the potassic fertilization on the agronomic characteristics and technological properties of cotton fiber [Portuguese]. **Bragantia** 43: 221-228.

SADRAS, V.O. (1996). Cotton responses to simulated insect damage: radiation-use efficiency, canopy architecture and leaf nitrogen content as affected by loss of reproductive organs. **Field Crops Res**. 48: 199–208.

SADRAS, V.O., BANGE, M.P., MILROY, S.P. (1997). Reproductive allocation of cotton in response to plant and environmental factors. **Ann. Bot**. 80, 75–81.

SALAZAR, M. R. (2006). Un modelo simple de la producción potencial de Uchuva (*Physalis peruviana* L.). Tesis de Doctorado. Facultad de Agronomía. Universidad Nacional de Colombia. Bogotá.

SALAZAR, M.R., J.W. JONES, B. CHAVES Y A. COOMAN. (2008). A model for the potential production and dry matter distribution of Cape gooseberry (*Physalis peruviana* L.). **Scientia Hort.** 115: 142-148.

SALNIKOV VV, GRIMSON MJ, SEAGULL RW, HAIGLER CH. (2003). Localization of sucrose synthase and callose in freeze-substituted secondary wall-stage cotton fibers. **Protoplasma.** 221:175-184.

SCHREIBER, U., BILGER, W., NEUBAUER, C. (1994). Chlorophyll fluorescence as a nonintrusive indicator for rapid assessment of in vivo photosynthesis. In: Shulze, E.D., Caldwell, M.M. (Eds.), Ecophysiology of Photosynthesis. Springer, New York, pp. 49–70.

SILBERBUSH, M.; BARBER, S. A. (1983). A sensitivity analysis of parameters used in simulating uptake by maize as affected by soil water content and bulk density. **Agronomy Journal**, Madison. 75: 851–854.

SILVA, L. C.; BELTRÃO, N. E. de M.; AMORIM NETO, M. da S. (2000). Análise do crescimento de comunidades vegetais. Campina Grande: Embrapa Algodão. 46 p. (Embrapa Algodão. Circular Técnica, 34).

SPITTERS, C.J.T., H. VAN KEULEN Y D.W.G. VAN KRAALINGEN. (1989). A simple and universal crop growth simulator: SUCROS87. pp. 107-122. En: Rabbinge, R., S.A. Ward y H.H. van Laar (eds.). Simulation and systems management in crop protection. Pudoc, Wageningen.

SPITTERS, C.J.T., SCHAPENDOCK, A.H.C.M. (1990). Evaluation of breeding strategies for drought tolerance in potato by means of crop growth simulation. **Plant Soil**. 123: 193–203.

STILLER, W.N. (2000). Use of physiological measurements in breeding cotton for improved water use efficiency. Ph.D. Dissertation. The University of Sydney, Sydney, Australia.

STEER, B.T., S.P. MILROY Y R.M. KAMONA. (1993). A model to simulate the development, growth and yield of irrigated sunflower. **Field Crops Res**. 32: 83-99.

SUBBAIAH C,C., SACHS M, M. (2001). Altered patterns of sucrose synthase phosphorylation and localization precede callose induction and root tip death in anoxic maize seedlings. **Plant Physiol**. 125: 585-594.

TAIZ, L., ZEIGER, E. (1991). Plant physiology. California. Benjamin Cummings.USA. 565 p.

TING, I. P. DHINDSA, R. S. AND BEASLEY. C. A. (1976). Some physiological factors associated with cotton fibre extension. Beltwide cotton production research conferences. 38–39.

USHERWOOD, N. R. (1985). The role of potassium in crop quality, Chap. 21. 498 – 499. In: Potassium in Agriculture (edt. Munson, R. D). Amer. Soc. Of Agronomy, Madison, Wisconsin.

WALL, G.W., J.S. AMTHOR & B.A. KIMBALL. (1994). COTC02: a cotton growth simulation model for global change. **Agricultural and Forest Meteorology** 70: 289-342.

WEIR, A.H., P.L. BRAGG, J.R. PORTER Y J.H. RAYNER. (1984). A winter wheat crop simulation model Without water or nutrient limits. **J. Agric. Sci**. 102: 371-382.

WELLS, R., MEREDITH, W.R. (1984). Comparative growth of obsolete and modern cotton cultivars. III. Relationship of yield to observed growth characteristics. **Crop Sci**. 24, 868–872.

WILLIAMS, J.R., C.A. JONES, J.R. KINIRY Y D.A. SPANEL. (1989). The EPIC crop growth model. **Trans. Am. Soc. Agric. Eng**. 32: 497–511.

WHEELER, T.R., P. HADLEY, R.H. ELLIS Y J.I.L. MORISON. (1993). Changes in the growth and radiation use by lettuce crops in relation to temperature and ontogeny. **Agric. Forest Meteorol**. 66: 173-186.

YANG, G.P., RHODES, D., JOLY, R.J. (1996). Effects of high temperature on membrane stability and chlorophyll fluorescence in glycinebetaine-deficient and glycinebetaine-containing maize lines. **Aust. J. Plant Physiol**. 23 (4): 437-443.

YUNUSA, I.A.M., K.H.M. SIDDIQUE, R.K. BELFORD Y M.M. KARIMI. (1993). Effect of canopy structure on efficiency of radiation interception and use in spring wheat cultivars during the preanthesis period in a mediterranean-type environment. **Field Crops Res.** 35: 113-122.

YONG-LING, R., CHOUREY, S. P., DELMER, P. D., PEREZ-GRAU, L. (1997). The differential expression of sucrose synthase in relation to diverse patterns of carbon partitioning in developing cotton seed. 115: 375–385.

ZHAO, D. L., D. M. OOSTERHUIS, AND C. W. BENDARZ. (2001). Influence of potassium deficiency on photosynthesis chlorophyll content, and chloroplast ultrastructure of cotton plants. **Photosynthetica** 39:103–109.

ZOR, T., SELINGER, Z. (1996). Linearization of the Bradford Protein Assay Increases Its Sensitivity: Theoretical and Experimental Studies. **Anal Biochem 236:** 302–308.

CAPÍTULO 4. ZONAS ÓPTIMAS POR APTITUD DE TIERRAS PARA EL CULTIVO DE ALGODÓN, CON ÉNFASIS EN POTASIO. CONSIDERACIONES GENERALES

4.1. RESUMEN

La cobertura, alcance y la precisión de los resultados de este estudio son de carácter regional, y están determinadas por la disponibilidad de información cartográfica, existencia de estudios de suelos a dicha escala, y por el aporte de especialistas, que permitieron establecer una apreciación objetiva de los requerimientos del cultivo de algodón. El tipo de evaluación es netamente biofísico, se plantea que las mejores tierras son aquellas que presentan menores restricciones en suelos con énfasis en potasio (no se incorporaron criterios económicos) y que expresen los mayores rendimientos y calidad de fibra. El objetivo fue evaluar la información edafoclimática de las subregiones productoras de algodón con énfasis en la disponibilidad de potasio, y según los requerimientos del cultivo evaluar por medio de un modelo de decisiones la aptitud de las tierras para la siembra del algodón. La determinación de la aptitud de las tierras se basó en un análisis comparativo entre los requerimientos del cultivo, las características o cualidades de las tierras a evaluar de los cuatro municipios más representativos por producción y vocación algodonera como son: Ambalema, Espinal y Natagaima en el Tolima y Villavieja en el Huila, para tal fin se utilizó un modelo de árbol de decisiones. En los cuatro municipios por la aptitud de las tierras evaluadas para la siembra de algodón, el 0,26% de área total del estudio presentó clase A1 (Apta) y pertenece a Villavieja. Para A2 (Moderadamente apta) fue el 45%, para A3 (Marginalmente apta) el 25,08% y para N (No apta) el 29,55%. El micronaire se expresó dentro el valor normal, y la mayor longitud de la fibra se obtuvo en Villavieja. Para el rendimiento de algodón fibra, en Ambalema la mejor variedad fue DELTA-OPAL, para Espinal y Villavieja NU-OPAL, y para Natagaima DP-90 Nal en el año 2005 y DELTA-OPAL en el año 2006.

El comportamiento de la variabilidad espacial para la definición de tierras por aptitud para la siembra del algodón, utilizando el analisis de componentes principales mostró que un 72,39% de la variabilidad total fue explicada por la textura, disponibilidad de potasio, altitud y micronaire, los cuales se relacionaron con el rendimiento de algodón-fibra y calidad de fibra de algodón en los cuatro municipios evaluados. Con los criterios se definición de aptitud de tierra no se encontraron zonas aptas por potasio, pero si zonas moderadamente aptas para todos municipios y no aptas de las actuales sembradas para Villavieja, recomendadose utilizar estos criterios y para el K, utilizar el análisis de suelo interpretado con la relacion (Ca + Mg)/K.

Palabras clave: Aptitud de tierra, micronaire, variabilidad, clases de tierra.

4.2. INTRODUCCIÓN

La Agricultura es una actividad espacial, aunque tradicionalmente el énfasis ha sido en la variabilidad temporal (Hartkamp *et al.,* 1999). Cassel *et al.* (2000) reportan que en los últimos años ha surgido un gran interés por considerar la variabilidad espacial como parte de la investigación para la toma de decisiones sobre dónde cultivar.

Según Martínez (2003), el clima y sus factores como precipitación, temperatura, altitud y luminosidad varían espacialmente. El clima es uno de los factores más utilizado en la zonificación de áreas para cultivo, principalmente por la temperatura, que determina las condiciones de cada cultivo, y por la precipitación, que junto con el suelo inciden notablemente en la disponibilidad de agua. El suelo, presenta variabilidad espacial para la producción agrícola, dado que sus propiedades físicas, químicas, biológicas y morfológicas no son uniformes. Dicha variabilidad es fundamental dentro de la pedología y es básica para entender los factores causales de la distribución espacial de los suelos (Wilding y Drees, 1985 citado por Martínez, 2003). La variabilidad espacial de tipo de suelo, disponibilidad de nutrientes, el drenaje y pendiente influye en la variabilidad espacial de la calidad y/o cantidad de la producción en un determinado sitio (Stafford y Miller, 1996).

El rendimiento y la calidad de los cultivos varían espacialmente. Existen zonas agroecológicas donde un cultivo determinado produce más que en otras, al igual que dentro

de un mismo lote. Lo anterior ocurre según Cassel *et al*. (2000) porque los factores que influyen en el desarrollo de los cultivos y en la producción también varían espacialmente.

Para la definición de áreas temporo-espaciales en la agricultura, se utiliza la geomática, que se define como "la ciencia que estudia la estructura y las propiedades de la información espacial, los métodos de captura, análisis, clasificación, cualificación, definición espacial, representación, uso, y la infraestructura para lograr una aplicación óptima (Groot, 1989)" o como "el manejo científico de la información espacial (Atlantic Institute cit. por Beek *et al*., 1997)". La geomática tiene aplicaciones importantes que cubren desde la planificación del uso sostenible de la tierra, identificación y monitoreo de cultivos, la estimación de la producción, el mercadeo, la evaluación de tierras, la sanidad vegetal, el modelamiento, la agricultura de precisión, el análisis de impacto ambiental de los usos, entre otros (Beek *et al.*, 1996; FAO, 1995; FAO, 1999; Beek y Bouma, 1994, citados por Martínez, 2003).

En Colombia, los primeros estudios de determinación de zonas óptimas para el cultivo del algodón se iniciaron en el Valle del Sinú, donde se utilizaron como variables de definición: suelos, rendimiento y calidad de fibra. La calidad del algodón se caracterizaba por fibras largas, micronaire promedio y resistencia. Para el comportamiento de las variedades, Delta Opal fue la mejor en las zonas norte, centro y noreste del municipio de Cereté. DP90 en la zona oeste (Lorica, Cotorra, San Pelayo y Montería) y, el este del municipio de Cereté, y DP5415 en los municipios Chima, Cotorra, San Pelayo, Lorica, y en el noreste de Cereté la mejor variedad fue DP5415 (Cuellar, 2003).

El clima y las condiciones edáficas son factores importantes que influyen sobre el crecimiento de las plantas, determinando el área de distribución de las especies al fijar los límites para su supervivencia (Larcher, 1995). Novel (1991) propuso asociar la productividad de las plantas con los factores que regulan un uso eficiente del CO_2 tales como radiación, agua y temperatura a través de la formulación de índices. La fotosíntesis neta depende de una eficiente conversión de la energía radiante absorbida, que a su vez, depende del estado del agua en la planta y de la temperatura en el ambiente. La respuesta que presentan los diferentes genotipos mejorados a las condiciones ambientales de las zonas de cultivo se expresan en los rendimientos finales. Cuando las condiciones son adversas para algodón, por ejemplo, el proceso de abscisión se hace mayor, principalmente

de botones florales y cápsulas pequeñas; muchos son los factores internos, externos y su interacción que lo afectan (Guinn, 1982).

Kalogirou (2002), trabajó con un modelo base FAO para clasificación de tierras y cultivos, basado en dos componentes: uno económico y otro físico (técnico). Las variables físicas fueron 17, manejadas con valores boléanos, logrando definir zonas para los cultivos de trigo, algodón, maíz, cebada y remolacha azucarera. En la zona de Macedonia y Grecia, trabajaron con seis factores determinantes: erosión, profundidad radical y condiciones mecánicas del suelo, exceso de sales, nivel de agua-drenaje y encharcamiento-, con base en estas, se definieron cinco clases de tierra (altamente, moderadamente y marginalmente sostenible; corriente y permanentemente no sostenible).

Con base en el modelo de clasificación de tierras (FAO), Mandal *et al*. (2005) encontraron que para el valle central de la india los suelos vertisoles y con buena lluvia son los mejores para la producción del algodón.

Para Beltrao (1997) el suelo para el algodonero debe contener oxígeno con valor superior al 15% de la composición de los gases de la atmósfera edáfica, humedad próxima a capacidad de campo en varias de las etapas de crecimiento y desarrollo, y densidad aparente baja (menos de 1,3 g cm^{-3}, siendo ideal de 0,9 a 1,2 g cm^{-3} (Primavesi, 1980, citado por Beltrao, 1997),

Sin embargo, Frye (2000) recomienda que para un diagnóstico confiable del análisis de K disponible en los suelos, es necesario tener en cuenta tanto el contenido absoluto de K o intercambiable, como su relación con Ca y Mg [(Ca + Mg) / K]. Al considerar la anterior relación, se debe tener en cuenta que entre el valor de ésta y la disponibilidad de K hay una relación inversa, así, dependiendo del valor de la relación se obtiene valores de disponibilidad de K muy bajo, bajo, medio o alto.

Silva (1999) reporta que la relación de bases del suelo (Ca^{2+}+Mg^{2+}/K^{+}) es más eficiente en la definición de las necesidades del algodón que el sólo contenido de potasio en el suelo, indicando que la mayor disminución en la producción de algodón sucede cuando los valores de la relación (Ca^{2+}+Mg^{2+}/K^{+}) son mayores a 20.

El algodonero es un cultivo de alto retorno de nutrientes al suelo debido a que solamente la fibra y la semilla, que contienen relativamente pequeñas cantidades de nutrientes minerales se remueven, mientras que el resto de la planta (raíces, hojas, ramas y tallo) se quedan en el campo. Sin embargo, en siembras contínuas e intensivas, cultivos de alta producción necesitan una reserva abundante de nutrientes que debe estar disponible en períodos relativamente cortos (Halevy y Bazelet, 1992).

Fauconnier (1973) encontró que un cultivo del algodonero que produce 560 $kg \cdot ha^{-1}$ de fibra absorbe un total de 105 kg. N, 42 kg. P_2O_5 y 80 $kg \cdot ha^{-1}$ de K_2O, mientras que remueve 40 kg. N, 16 kg. P_2O_5 y 17 $kg \cdot ha^{-1}$ de K_2O.

El suministro contínuo y adecuado de K es necesario durante todo el ciclo de crecimiento y desarrollo del algodón. El crecimiento vegetativo se aumenta con cada incremento del fertilizante potásico aun hasta cantidades altas como de 420 y 560 $kg \cdot ha^{-1}$. Sin embargo, este aumento en crecimiento no resulta en un incremento en la producción de semilla y fibra. También, Kerby y Adams (1985) encontraron que el efecto inmediato de suministrar fertilizante potásico en suelos que tienen deficiencia de K es el incremento en la cantidad de fibra y de semilla producida.

Los rayos solares son vitales y áreas con mas del 50% de nubosidad no son adecuadas para cultivar el algodonero, sin importar su temperatura ni su humedad (Waddle, 1984). Algunos investigadores reportan que la máxima fotosíntesis se alcanza cuando la intensidad de la luz es 79% de la máxima intensidad al medio día. Otros reportan que ocurre a la máxima intensidad de luz al medio día, aproximadamente a 10000 fc (Rimon, 1984).

El cultivo del algodón es típico de las zonas cálidas y la temperatura para la germinación de la semilla se produce cuando está no es inferior a los 14ºC, siendo el óptimo para la germinación 20ºC. La temperatura media del aire tiene el más grande efecto sobre el período de primer botón floral visible con brácteas; una disminución en la temperatura de 27 a 21°C incrementa la longitud del período de primer botón de 15 a 35 días (Wanjura *et al.*, 1979). Para la floración se necesita una temperatura media de 20 a 30ºC y para la maduración de la cápsula entre 27 y 30ºC.

Doorembos y Kassam (1986) reportan que dependiendo del clima y del ciclo total del cultivo, el algodón necesita entre 700 a 1300 mm como requerimientos hídricos totales. En la etapa vegetativa el requerimiento es bajo, es decir tan solo el 10% del total, el mayor consumo es en el período de floración con una equivalencia del 50 al 60% del requerimiento total. Caicedo y Barragán (2001), trabajando con las variedades CORPOICA-M-123 y Gaitana-M-109, encontraron que los requerimientos hídricos para las dos variedades oscilaron entre 496 y 500 mm independiente del tipo de labranza utilizada (reducida y convencional). También reportaron que para la eficiencia en el uso del agua (EUA) con la relación de reducción del rendimiento (RRR) el menor valor lo presentó la variedad Gaitana-M-109, lo cual indica que es una variedad más eficiente en el uso del agua que la variedad CORPOICA-M-123. Igualmente, se determinó la eficiencia del uso de agua de riego (EUAR), encontrando que la variedad Gaitana-M-109 presentó el mayor valor de algodón adicional por milímetro de riego suplementario, de 9,46 kg comparado con 7,06 kg de CORPOICA-M-123.

Heitholt (1994) evaluó el efecto del estrés de nutrientes sobre el porcentaje de retención de cápsulas y propiedades de la fibra de algodón. Johnson *et al*. (2002) encontraron que el rendimiento y calidad de fibra del algodón están espacialmente correlacionados; sin embargo, Bradow *et al*. (1999), citados por Bradow y Davidonis (2000), no encontraron correlación significativa entre resistencia de la fibra y la variación espacial en los niveles de potasio y porcentaje de materia orgánica en el suelo.

Las zonas algodoneras en Colombia se caracterizan por presentar una gran diversidad de ambientes, que conllevan a que una misma variedad presente comportamientos diferentes, cuando se le siembra en diversas áreas productoras. Esta variación es ocasionada por la interacción del genotipo con el ambiente. Con la dependencia de unas pocas variedades de algodón en una determinada zona, se incurre en el riesgo de que estos genotipos no se adapten a tales ambientes lo que ocasionaría pérdidas irremediables al agricultor. Para el caso del algodón son frecuentes las quejas de la industria textil con respecto a la calidad de fibra de determinadas zonas y variedades que no satisfacen sus requerimientos industriales. De igual forma, son frecuentes los fracasos económicos de productores que se involucran en la producción de algodón en zonas que no son aptas para el cultivo.

La producción del algodón en el Valle Cálido del Alto Magdalena está distribuída geográficamente en tres grandes zonas demarcadas por el río Magdalena, las cuales son: Norte del Tolima, Centro del Tolima y Sur del Tolima-Norte del Huila. Sin embargo, los estudios que actualmente se encuentran disponibles para el Valle Cálido del Alto Magdalena, han sido enfocados solamente a la evaluación de pruebas de eficiencia agronómica, o pruebas regionales, donde únicamente se mide el comportamiento del material genético.

Por ello el objetivo de este trabajo fue evaluar la información edafoclimática de las subregiones productoras de algodón, con énfasis en la disponibilidad de potasio, y según los requerimientos del cultivo evaluar por medio de un modelo de decisiones la aptitud de las tierras para la siembra del algodón, con el fin de ofrecer a los productores una herramienta que permita incrementar los rendimientos y la calidad de la fibra.

4.3. MATERIALES Y MÉTODOS

4.3.1. Fase del diseño conceptual del modelo de evaluación georreferenciado

Con el fin de evaluar la capacidad productiva de las unidades de tierra en el área de estudio, se diseñó el modelo conceptual de evaluación georreferenciado, haciendo los ajustes del caso y siguiendo las indicaciones dadas en la "Directiva: Evaluación de tierras para la agricultura de secano" de la FAO. Considerando el término "tierra", como un área específica de la superficie terrestre, que además de las propiedades superficiales e internas del suelo, incluye el clima y la cobertura actual.

El modelo lógico se fundamenta en las relaciones dadas entre los requerimientos del cultivo de algodón y la oferta ambiental de cada una de las unidades de tierra del territorio a evaluar (Figura 4.1). El análisis georreferenciado de la información cartográfica se realizó con el software ArcGis 9 y ArcReader (Módulo Spatial Analysis).

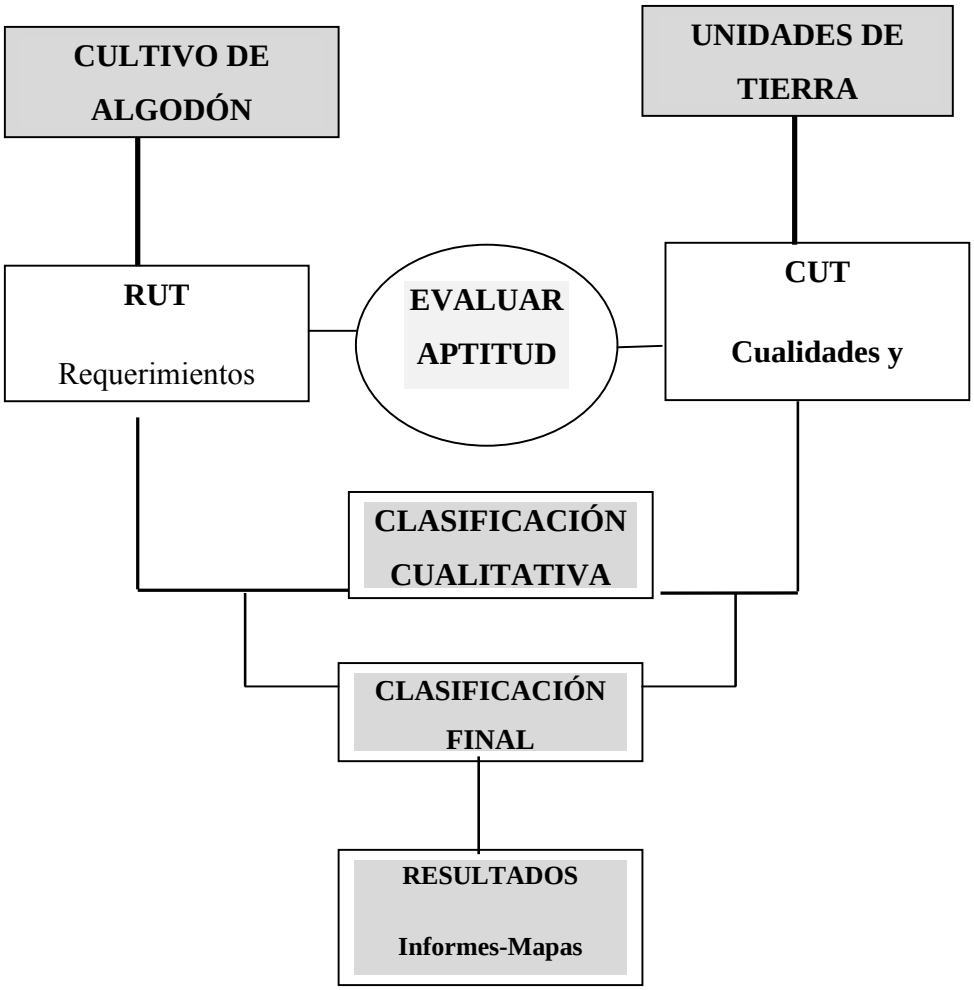


Figura 4.1 Modelo Conceptual de la Metodología de Evaluación de Tierras. FAO

4.3.2. Fase de análisis de información disponible

De acuerdo con la información de las bases de datos del programa de Agroecosistemas de CORPOICA, se delimitó la zona de estudio para los municipios más representativos como productores de algodón: Espinal, Ambalema y Natagaima. Se utilizó la unidad cartográfica, según definición del IGAC, a escala de 1:100000 para todos los municipios del área de estudio.

Estas relaciones se clasifican en dos categorías, clase y subclase, las cuales reflejan los grados de "adaptabilidad" de las tierras al cultivo. La clase indica el nivel de restricción y la

subclase el factor o factores que determina la restricción. Se utilizaron cuatro niveles de clasificación de las clases, por la escala de análisis.

A1 (Apta): Unidades de tierra cuyos suelos reúnen todos los requisitos exigidos por el cultivo o presentan muy ligeras restricciones, que no afectan el rendimiento de manera importante. Suelos profundos (>100 cm), bien drenados, buena disponibilidad de materia orgánica y de potasio principalmente. Ambientalmente se caracterizan por tener temperaturas promedio anual entre 25 y 28°C y precipitación anual entre 1000 y 1500 mm que garantiza la satisfacción de las necesidades hídricas del cultivo.

A2 (Moderadamente apta): Unidades de tierra que presentan al menos una cualidad de bajas restricción, situación que podría afectar ligeramente el normal desarrollo fisiológico del cultivo o que requeriría de especial atención en las prácticas de manejo agronómico.

A3 (Marginalmente apta): Tierras que presentan graves e importantes limitantes para el uso sostenible y económico del algodón, que reducen de manera importante la producción o que pueden requerir de insumos o prácticas de manejo adicionales, implicando la no retribución económica del esfuerzo hecho, para elevar los niveles de productividad.

N (No apta): Unidades de tierra que presentan altas limitantes, las cuales afectan en alto grado el cultivo. Siendo no recomendadas sin previo análisis económico de manejo según los requerimientos del algodón.

4.3.3 Identificación de los principales requerimientos ecofisiológicos y de manejo para el cultivo de algodón

La zonificación de tierras con potencial para la producción del cultivo de algodón implica el análisis de dos componentes: el cultivo mismo con sus requerimientos fisiológicos y de manejo, y de otro lado el componente tierra, donde se incluye además del suelo y sus características propias, el entorno ambiental (clima). Para identificar y cualificar los principales requerimientos del cultivo se siguieron los siguientes pasos.

Identificación de los principales requerimientos del cultivo de algodón con base en: revisión bibliográfica sobre la fisiología básica del algodón y talleres de consenso con expertos del cultivo.

Valoración de los requerimientos con base en el comportamiento del rendimiento del cultivo y/o la necesidad de tecnología adicional.

Armonización de la interpretación de las características de las unidades de tierra y los requerimientos del cultivo por medio de las cualidades de la tierra.

Construcción de las cualidades de tierra para la evaluación.

Calificación de las unidades de tierra (unidades cartográficas de suelos).

Los diversos talleres realizados en Tolima y Huila, así como la consulta a expertos de la cadena de algodón, arrojaron como importantes los siguientes requerimientos: Disponibilidad de oxígeno con base en el drenaje, profundidad efectiva del suelo para raíces, clase textural, materia orgánica, disponibilidad de potasio, temperatura promedio mensual, precipitación anual, características químicas del suelo (Materia orgánica, pH y potasio).

Los requisitos planteados en estos talleres fueron calificados de acuerdo a un "factor de diagnóstico", que en muchos casos, son características de una unidad de tierra (profundidad efectiva, niveles de nitrógeno o potasio, principalmente). No se debe confundir esta tabla de calificación, como los criterios finales de aptitud de las unidades de tierra, este es el criterio para calificar los requerimientos del cultivo y su posterior expresión en términos de cualidad de la tierra, para a su vez zonificar las unidades cartográficas en grados de restricción.

4.3.4 Identificación de los principales requerimientos ecofisiológicos y de manejo para el cultivo de algodón

De acuerdo al esquema propuesto se adecuaron los anteriores requerimientos del cultivo de algodón, en términos de cualidades de la tierra (Tabla 4.1). Estas cualidades se obtienen de las características o atributos de las unidades de tierra (base de datos de estudios de suelos)

y de las bases de datos climáticas. De acuerdo a la disponibilidad de información se consideraron las siguientes cualidades:

4.3.5 Biofísicas

Altitud (al) y pendiente (pe): Se calcularon a partir de modelo digital de elevación (DEM) SRTM de 90 metros de resolución, disponible en la página: www.ciat.org.

Oxígeno disponible en la rizosfera (do): La principal característica utilizada fue la condición de drenaje natural. Esta se obtuvo de la base de datos de suelos y se calificó cada unidad cartográfica de acuerdo a la clase de drenaje interno (1 Excesivo, 2 bueno, 3 imperfecto y 4 pobre).

Tabla 4.1 Requerimientos ecofisiológicos para el cultivo de algodón

CUALIDAD DE LA TIERRA		FACTOR DE DIAGNÓSTICO	UNIDAD	CLASIFICACIÓN POR FACTORES			
				APTA	MODERADAMENTE APTA	MARGINALMENTE APTA	NO APTA
				1	2	3	4
1	Altitud			6	4	2	1
		asnm	m	0 - 500	501-900	901-1200	> 1200
2	Oxígeno disponible en la rizosfera			8	6	4	1
		Oxigeno	Clase	2	1	3	4
3	Pendiente			6	6	1	1
				0-3%	3-12%	12-25%	>25
4	Condición de enraizamiento			10	8	5	1
		Profundidad efectiva	cm.	> 100	51-100	25-50	< 25
5	Clase textural			12	10	6	1
		Textura	Clase	Franco arenosa	Franco arcillo-Arenosa	Franco arcillosa	Arcilloso o Arenoso
6	Nutrientes disponibles						
				6	4	2	1
		Materia orgánica	%	> 4,0	3,1-4,0	1,5-3,0	< 1,5
				10	1		
		Acidez	pH	5,2 - 7,0	< 5,2 ò > 7,0		
				14	11	6	1
		K (Ca+Mg)/K menor de 40	meq 100 g^{-1}	0,21 a 0,50	0,11 a 0,20	0,05 a 0,10	<0,05
				10	8	5	1
		K (Ca+Mg)/K entre 40 - 60	meq 100 g^{-1}	0,31 a 0,70	0,16 a 0,30	0,10 a 0,15	< 0,10
				6	4	2	1
		K (Ca+Mg)/K mayor de 60	meq 100 g^{-1}	0,41 a 0,90	0,21 a 0,40	0,15 a 0,20	< 0,15
	Clasificación			57 - 76	38 - 56	28 - 37	< 28
7	Rendimiento y calidad						
	Rendimiento	Algodón-fibra	$kg \cdot ha^{-1}$	> 1500	1000-1500	750-990	< 750
	Calidad	Longitud-fibra	mm.	>29,2	25,3-29,2	22,2-25,2	< 22,2
		Micronaire-fibra	µg $pulg^{-1}$.	3,7-4,2	4,21-4,90	> 5,0 y < 3,7	

Condición de enraizamiento (ce): La principal característica utilizada fue la profundidad efectiva, adaptado de IGAC (IGAC, 2000), asociada a presencia de limitantes físicas o

químicas para la penetrabilidad de las raíces. El valor crítico para calificar el valor mínimo aceptable de profundidad efectiva es de 90 cm, éste valor no fue posible expresarlo en la base de datos de suelos. El rango dado como moderado (50-100 cm) permite una asignación subjetiva por encima o por de bajo del valor crítico. Se debe recurrir al conocimiento y experiencia de campo para su correcta interpretación.

Clase textural (ct): Se utilizaron las siguientes clases: franco arenosa, franco arcillo-arenosa, franco arcillosa y Arcillosa o arenosa (IGAC, 2000).

Materia orgánica (mo): Esta se obtuvo de la base de datos de suelos y se calificó como muy alta mayor a 4,0; alta 3,1 a 4,0; media 1,0 a 3,0; y baja menor a 1,5.

Clase por rango de pH (pH): Valores del rango según revisión de literatura.

Potasio (K): Este se obtuvo de la base de datos de suelos y de 41 fincas pilotos, y se calificó con base en la disponibilidad de K (Frye, 2000):

$$\text{Disponibilidad de K} = (Ca^{+2} + Mg^{+2}) / K^{+} \qquad (1)$$

Según el valor de la disponibilidad de K, estos se clasificaron en tres grupos: menor de 40, entre 40 y 60 y mayor de 60. A cada grupo le correspondió la calificación por equivalencia de disponibilidad de K, en meq K 100 g de suelo.

4.3.6 Rendimiento y calidad de la fibra

Las variables de rendimiento de algodón-fibra y de calidad fueron tomados durante los años 2005 y 2006.

Rendimiento de algodón en fibra (rf): Con base en el consenso de productores y asistentes técnicos, se clasificó como rendimiento apto mayor a 1500 $kg \cdot ha^{-1}$, moderadamente apto entre 1000 y 1500 $kg \cdot ha^{-1}$, marginalmente apto entre 750 y 999, y no apto, menor de 750 $kg \cdot ha^{-1}$ de algodón fibra.

Calidad de la fibra: Se tomaron dos parámetros de calidad: longitud y micronaire de la fibra, según clasificación internacional USDA (Barragán y Cadena, 2001):

Longitud de la fibra (lf): fibra mayor a 29,2 mm fibra larga o excelente, entre 25,3 y 29,2 fibra media, entre 22,2 y 25,2 fibra corta y, menor de 22,2 fibra muy corta.

Grosor de la fibra o micronaire (mc): fibra entre 3,7 y 4,2 µg $pulg^{-1}$ fina, entre 4,21 y 4,9 buena, mayor de 5,0 y menor de 3,7 inmadura.

4.3.7 Datos georreferenciados

Las fincas fueron georreferenciadas con coordenadas planas (X y Y), nombre del productor, nombre del predio, vereda, altura sobre el nivel del mar en metros, rendimiento de algodón-fibra ($kg \cdot ha^{-1}$) y propiedades de calidad como el micronaire y la longitud. Los puntos georreferenciados se obtuvieron mediante geoposición con GPS de 10 canales, durante los semestres algodoneros de los años 2005 y 2006.

Se desarrolló un modelo espacial basado en un árbol de decisión con base en los datos del mapa base y de los requerimientos ecofisiológicos del cultivo. Con el rendimiento y calidad de fibra se realizó un análisis de correspondencia con las clases de aptitud.

Para poder explicar las clases de tierra definidas por aptitud se tomaron 45 fincas con los respectivos análisis de suelo, identificándose del 1–10 las de Ambalema, del 11-20 Espinal, 21–30 Natagaima, 31–40 Villavieja y del 41–45 C.I. Nataima con los cinco tratamientos (150, 120, 90, 60 y 30 $kg \cdot ha^{-1}$ de K), y con base en esta información se utilizó el método de regresión lineal múltiple por pasos con el programa Statistix9 para determinar el efecto sobre el rendimiento de algodón-fibra, micronaire y longitud; también se utilizo el análisis de componentes principales, con el programa estadístico SPSS 16.0; para determinar cuáles y cuántos factores explicaban la variabilidad en el comportamiento de la clases por aptitud de tierra según énfasis en potasio. Los resultados obtenidos fueron comparados de manera integral con los encontrados bajo condiciones semi-controladas de invernadero (capitulo 2) donde se evaluó cinco dosis de potasio (0, 30, 60, 120 y 240 mg kg^{-1}) y con los del C.I. Nataima (Capitulo 3).

4.4 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Caracterización biofísica de la zona estudiada

A partir de la información obtenida de las bases de datos generadas en el estudio, se describió la zona estudiada para cada cualidad de la tierra evaluada individualmente, y de acuerdo a un interés en particular (suelos superficiales o profundos, disponibilidad de potasio, entre otras). El área de estudio cubrió 182.164 ha, localizada en los departamentos del Tolima y Huila 3° - 5° N, 75,30W y 3° - 5° N, 74,30W e involucro las tres zonas algodoneras del Valle Cálido del Alto Magdalena (Figura 4.2).

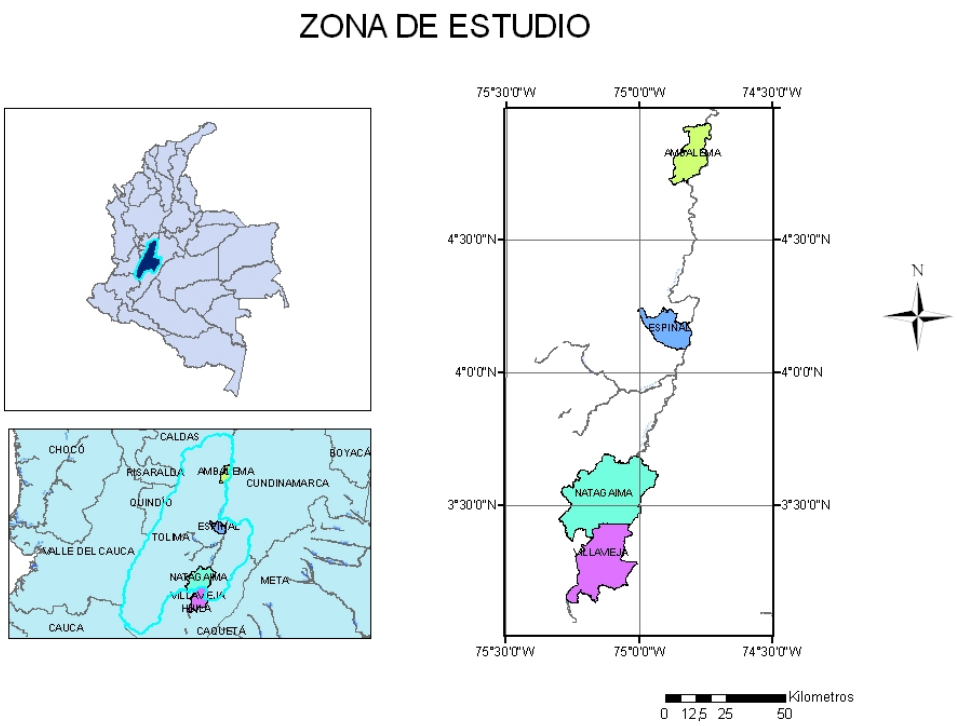


Figura 4.2 Área de influencia del estudio de aptitud de tierras para el algodón

Evaluación de aptitud de las tierras a nivel municipal

La evaluación de la aptitud de las tierras para el cultivo del algodón, en el Valle Cálido del alto Magdalena se realizó en los municipios de Ambalema, Espinal y Natagaima (Tolima),

y de Villavieja (Huila). Los resultados finales se presentan en términos cartográficos con información a escala 1:100000 para los municipios del estudio, detallando por clase de aptitud. A continuación se describen las unidades de tierra resultantes a nivel de clase que permiten interpretar cada uno de los mapas.

Ambalema

En la figura 4.3 se muestra la distribución de la disponibilidad de K, según el grado de presencia que presenta este factor de diagnóstico. El 36,27% del área (8.227 ha) tiene baja disponibilidad, por lo tanto es considerada tierra no apta; el 12,36% presenta grado de limitación medio; y el 51,37%, que equivale a 11.650 ha no presenta limitante por disponibilidad de potasio y es considerada tierra apta por este factor. También, se observa que por este factor, para el año 2005, el 26% de las fincas se encontraron en tierras consideradas no aptas; para el 2006 ninguna de las fincas se sembraron en estas tierras con este limitante.

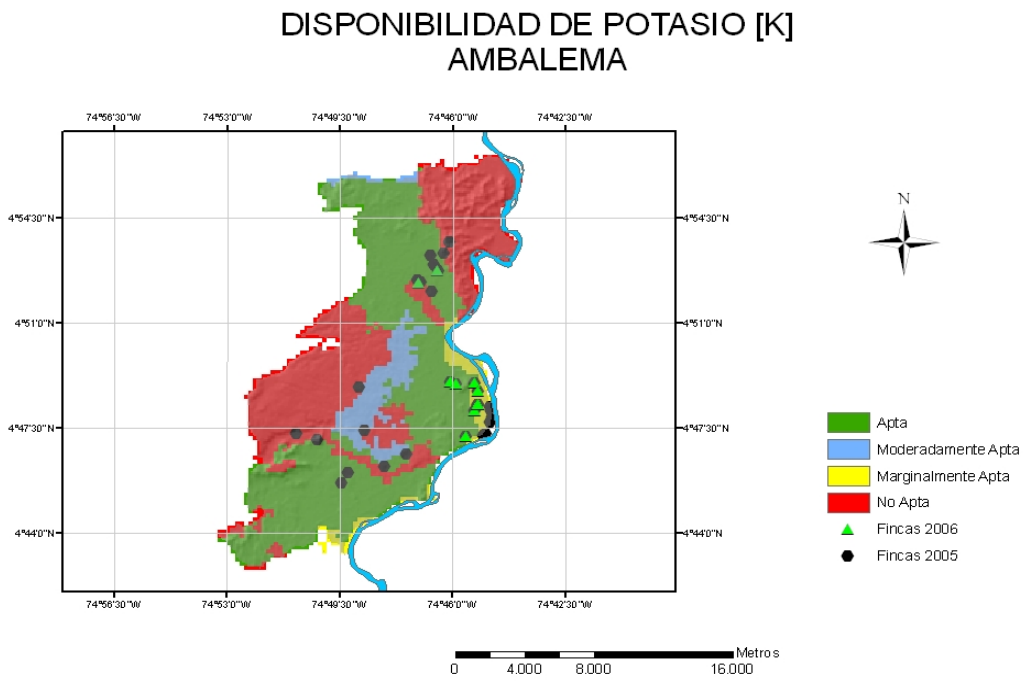


Figura 4.3 Grado de limitación de las tierras de Ambalema por disponibilidad de potasio

En la figura 4.4 se representa las 22.681 ha de la evaluación de aptitud de las tierras del área de Ambalema y muestra el área ocupada por cada clase. La clase apta (A1), que reúne todos los requisitos exigidos por el cultivo no está representada. La clase A2 está representada por 18.708 ha que equivalen al 82,48% del total evaluado. La clase A3 está representada por 3.059 ha que equivalen al 13,49% del total del municipio y las ha restantes que presentan altas limitantes son consideradas no aptas(N) y sólo representan 813 ha (4,03%).

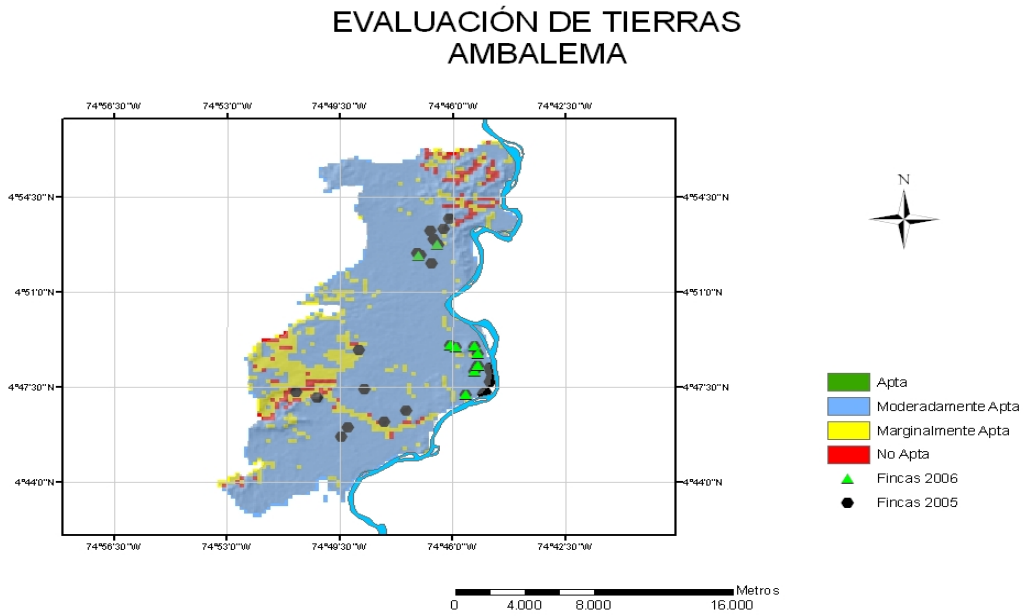


Figura 4.4 Correspondencia entre el modelo de evaluación de aptitud de tierras y la ubicación de fincas productoras, en el municipio de Ambalema

La tabla 4.2 muestra para el año 2005 que la variedad DELTA-OPAL alcanzó el mayor rendimiento, longitud de fibra y micronaire en la clase A3, comparado con la misma variedad y DP-90 Nal., en la clase A2. La explicación para estos valores de ser mayor en A3 que A2 es que las fincas que se ubicaron por la aptitud biofísica presentan un manejo agronómico especial con base en tecnologías modernas como el monitoreo fisiológico y siembra en caballones, esta actividad la realiza la finca pajonales ubicada en esta clase.

También, la tabla 4.2 muestra para el año 2006 que las dos variedades sembradas se ubicaron en A2 por aptitud biofísica; sin embargo, por rendimiento DELTA-OPAL alcanzó el mayor rendimiento, longitud de fibra y micronaire, comparado con Nu-Opal. Con los

valores de DELTA-OPAL durante los dos años algodoneros muestran su buen comportamiento para las condiciones de Ambalema.

Tabla 4.2 Clasificación por clase para variedad, rendimiento y calidad de fibra. Ambalema, 2005-2006

Variedad	Variables	CLASE POR APTITUD		
		Moderadamente apta (A2). Año 2005	**Marginalmente apta (A3). Año 2005**	**Moderadamente apta (A2). Año 2006**
DELTA-OPAL	Rendimiento ($kg \cdot ha^{-1}$)	976	1063,25	980
	Longitud (mm)	29	29,02	30,1
	Micronaire ($\mu g\ pulg^{-1}$)	4	4,05	4,5
DP-90 Nal	Rendimiento ($kg \cdot ha^{-1}$)	847		
	Longitud (mm)	28		
	Micronaire ($\mu g\ pulg^{-1}$)	4		
DP-90 Nal	Rendimiento ($kg \cdot ha^{-1}$)	847		861
	Longitud (mm)	28		29
	Micronaire ($\mu g\ pulg^{-1}$)	4		4

Espinal

En la figura 4.5 se muestra la distribución de la disponibilidad de K, según el grado de presencia que presenta este factor de diagnóstico. El 1,26% del área (268 ha) tiene baja disponibilidad de K, por lo tanto es considerada tierra no apta, el 13,81% presenta clase A3 con 2.938 ha y el 84,93%, que equivale a 18.070 ha que presentan poco limitante por disponibilidad de potasio y es considerada tierra moderadamente apta por este factor. Espinal presentó bajos contenidos de potasio, razón por la cual por aptitud de tierra no presento área apta (A1).

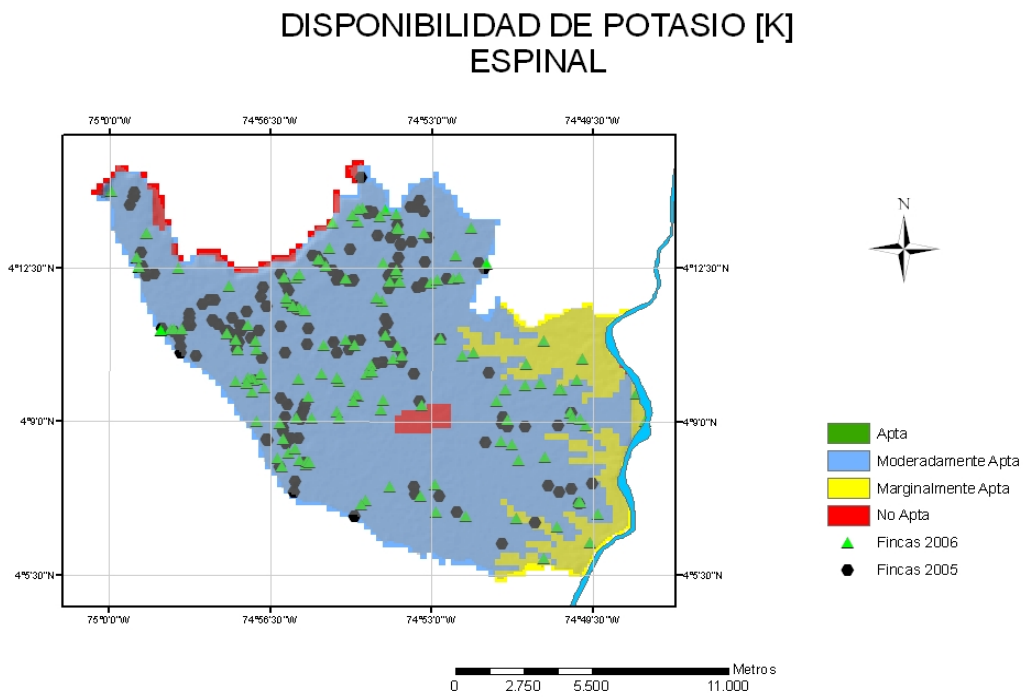


Figura 4.5 Grado de limitación de las tierras de Espinal por disponibilidad de potasio

En la figura 4.6 se representa las 21.276 ha de la evaluación de aptitud de las tierras del área de estudio y muestra el área ocupada por cada clase. La clase A1, que reúne todos los requisitos exigidos por el cultivo no está representada. La clase A2 está representada por 20.944 ha que equivalen al 98,44% del total evaluado. La clase A3 está representada con 102 ha que equivalen al 0,48% del total del municipio y las ha restantes son las no aptas(N) que representan 230 ha (1,08%).

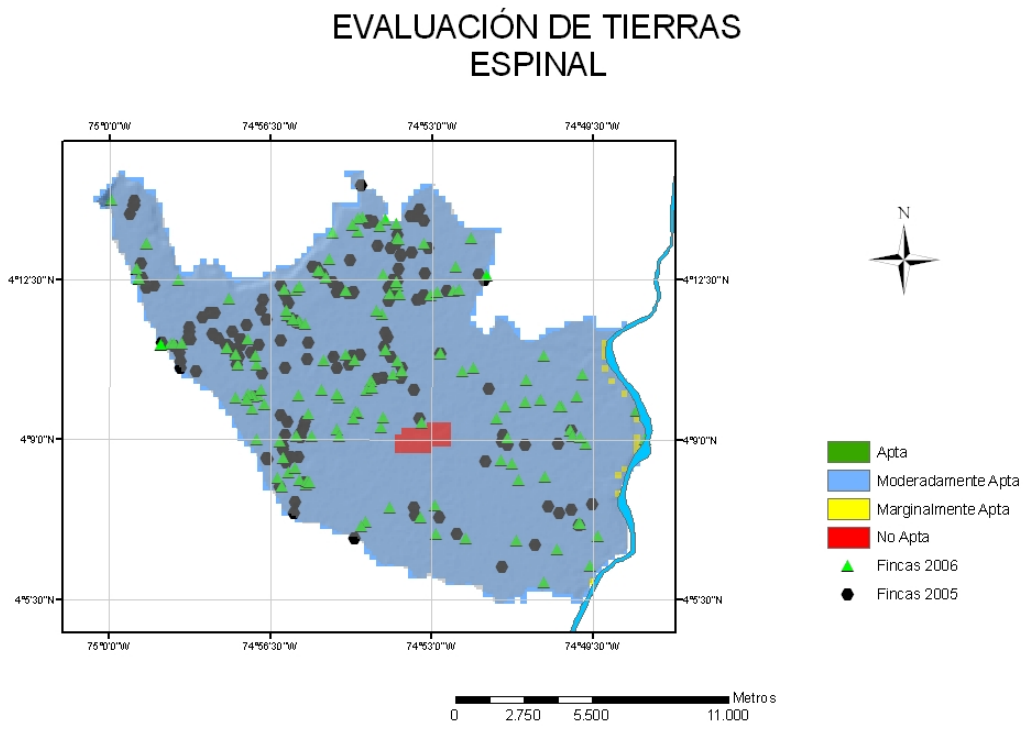


Figura 4.6 Correspondencia entre el modelo de evaluación de aptitud de tierras y la ubicación de fincas productoras, en el municipio de Espinal

La tabla 4.3 muestra que para el año 2005 todas las fincas se ubicaron en la clase A2 y para estas condiciones la variedad NU-OPAL alcanzó el mayor rendimiento y su valor es consistente con los requerimientos fisiológicos. Igualmente se muestra que para el año 2006, todas las variedades sembradas se ubicaron en A2 por aptitud biofísica; igualmente que en el año 2005 el mayor rendimiento fue para NU-OPAL.

Tabla 4.3 Clasificación por clase para variedad, rendimiento y calidad de fibra. Espinal, 2005-2006

Variedad	Variables	CLASE POR APTITUD	
		Moderadamente apta (A2) 2005	Moderadamente apta (A2) 2006
OPAL	Rendimiento (kg·ha^{-1})	500	
	Longitud (mm)	29	
	Micronaire (µg pulg^{-1})	4	
NU-OPAL	Rendimiento (kg·ha^{-1})	1.116	1.117
	Longitud (mm)	28	28
	Micronaire (µg pulg^{-1})	4	4
DP-90 NAL	Rendimiento (kg·ha^{-1})	920	1020
	Longitud (mm)	29	29
	Micronaire (µg pulg^{-1})	5	5
DELTA-OPAL	Rendimiento (kg·ha^{-1})	674	751
	Longitud (mm)	28	28
	Micronaire (µg pulg^{-1})	4	4

Natagaima

En la figura 4.7 se muestra la distribución de la disponibilidad de K, según el grado de presencia que presenta este factor de diagnóstico. El 73,07% del área (84.759 ha) tiene baja disponibilidad, por lo tanto es considerada tierra no apta, el 4,97% presenta clase A3 con 4.209 ha, el 21,70% presenta clase A2 con 18.395 ha y el 0,26%, que equivale a 224 ha para tierras A1 por disponibilidad de K. Las tierras no aptas están ubicadas en su gran mayoría en la zona montañosa del municipio donde por la pendiente es imposible sembrar algodón.

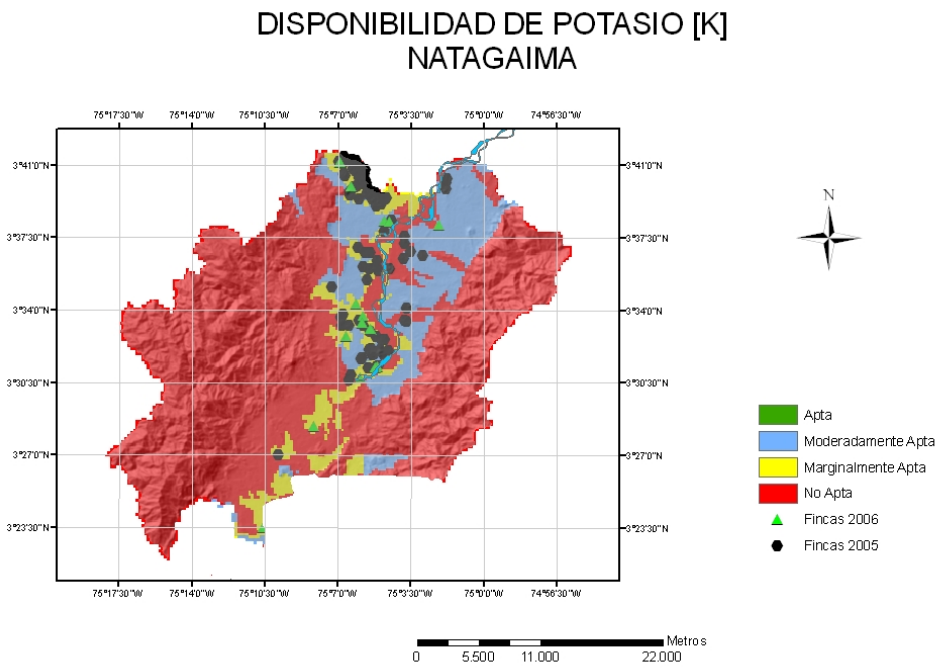


Figura 4.7 Grado de limitación de las tierras de Natagaima por disponibilidad de potasio

En la figura 4.8 se representa las 84.759 ha de la evaluación de aptitud de las tierras del área de estudio y muestra el área ocupada por cada clase. La clase A1, que reúne todos los requisitos exigidos por el cultivo no está representada. La clase A2 está representada por 23.198 ha que equivalen al 27,37% del total evaluado. La clase A3 está representada con 34.472 ha que equivalen al 40,67% del total del municipio y las ha restantes que presentan altas limitantes son consideradas no aptas(N), representan 27.088 ha (31,96%).

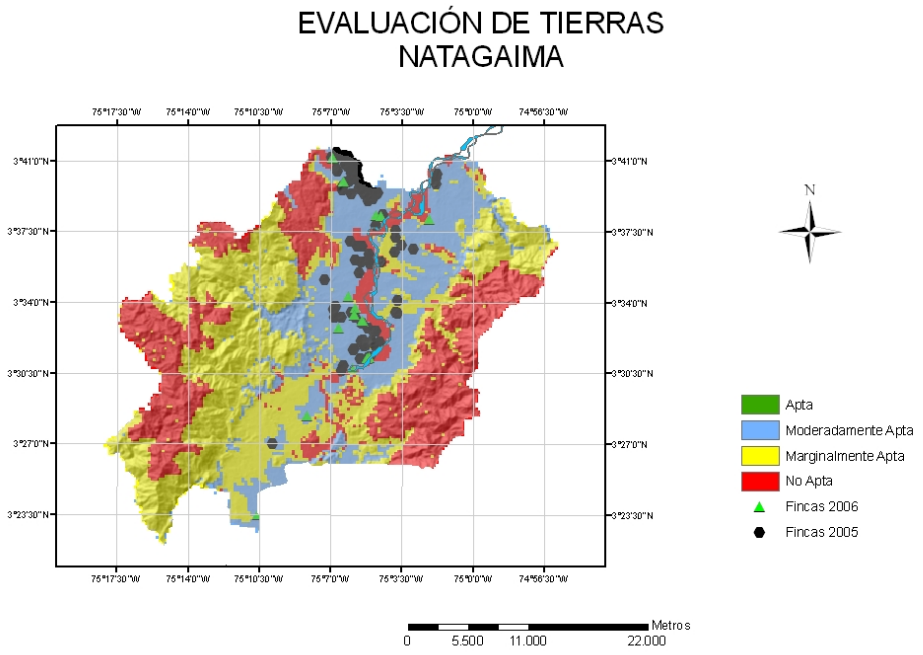


Figura 4.8 Correspondencia entre el modelo de evaluación de aptitud de tierras y la ubicación de fincas productoras, en el municipio de Natagaima

La tabla 4.4 muestra que para el año 2005 las fincas se ubicaron en la clase A2 y A3. Para éstas condiciones la variedad DP-90 Nal., alcanzó el mayor rendimiento y todas las variedades presentaron una muy buena longitud de fibra considerada dentro de los requerimientos fisiológicos como A1.

Tabla 4.4 Clasificación por clase para variedad, rendimiento y calidad de fibra. Natagaima, 2005

Variedad	Variables	CLASES POR APTITUD	
		Moderadamente apta (A2)	Marginalmente apta (A3)
DELTA-OPAL	Rendimiento (kg·ha^{-1})	746	780
	Longitud (mm)	29	29,18
	Micronaire (µg pulg^{-1})	4	4,05
DP-90 Nal.	Rendimiento (kg·ha^{-1})	832	
	Longitud (mm)	29	
	Micronaire (µg pulg^{-1})	4	

La tabla 4.5 muestra que para el año 2006, todas las variedades sembradas se ubicaron en A2 por aptitud biofísica y por rendimiento, el mayor valor correspondió para DELTA-OPAL. Para la longitud de fibra NU-OPAL y DP-90 alcanzaron los mayores valores; el micronaire no presentó variación entre las variedades.

Tabla 4.5 Clasificación por clase para variedad, rendimiento y calidad de fibra. Natagaima, 2006

Variedad	Variables	CLASE POR APTITUD Moderadamente apta (A2)
DELTA-OPAL	Rendimiento ($kg \cdot ha^{-1}$)	870
	Longitud (mm)	27,8
	Micronaire ($\mu g\ pulg^{-1}$)	3,5
NU-OPAL	Rendimiento ($kg \cdot ha^{-1}$)	512
	Longitud (mm)	29
	Micronaire ($\mu g\ pulg^{-1}$)	4
DP-90 Nal.	Rendimiento ($kg \cdot ha^{-1}$)	538
	Longitud (mm)	29
	Micronaire ($\mu g\ pulg^{-1}$)	4

Villavieja

En la figura 4.9 se muestra la distribución de la disponibilidad de K, según el grado de presencia que presenta este factor. El 62,07% del área (33.175 ha) tiene baja disponibilidad, por lo tanto es considerada tierra no apta; el 18,57% presenta clase A3 con 9.926 ha, el 18,87% presenta clase de limitación moderadamente apta con 10.085 ha y el 0,49% restante, que equivale a 262 ha no presenta limitante por disponibilidad de potasio y es considerada tierra apta por este factor de diagnóstico.

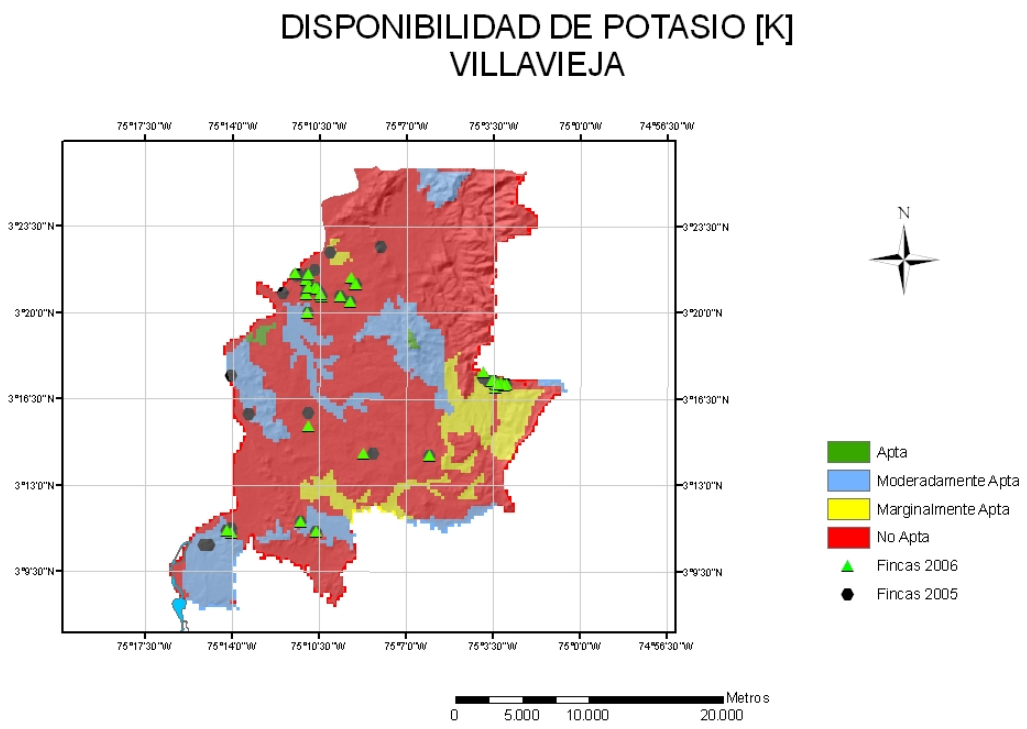


Figura 4.9 Grado de limitación de las tierras de Villavieja por disponibilidad de potasio

En la figura 4.10 se representa las 53.448 ha de la evaluación de aptitud de las tierras del área de estudio y muestra el área ocupada por cada clase. La clase A1, que reúne todos los requisitos exigidos por el cultivo son 547 ha que equivalen al 1%. La clase A2 está representada por 19.245 ha que equivalen al 36,01% del total evaluado. La clase marginalmente apta (A3) está representada con 8.061 ha que equivalen al 15,08% del total del municipio, y las ha restantes presentan altas limitantes, razón por la cual son consideradas no aptas(N) y lo representan 25.606 ha (47,91%).

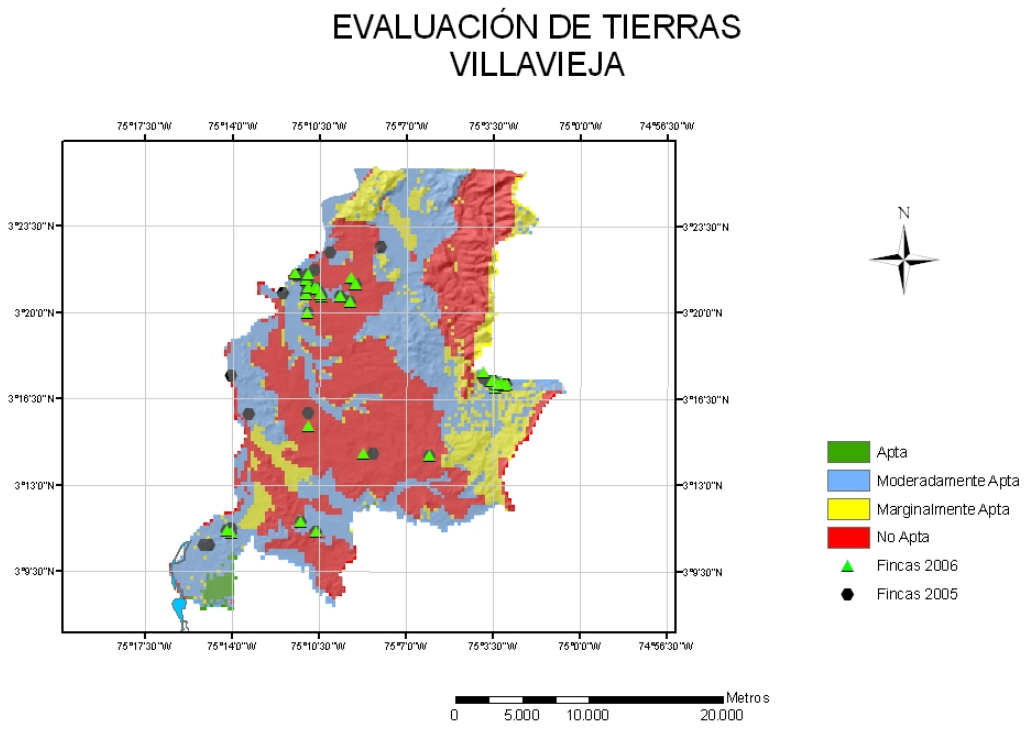


Figura 4.10 Correspondencia entre el modelo de evaluación de aptitud de tierras y la ubicación de fincas productoras, en el municipio de Villavieja

La tabla 4.6 muestra que para el año 2005 las fincas se ubicaron en las clases A2, A3 y N. Para estas condiciones (Clase A2) la variedad NU-OPAL alcanzó el mayor rendimiento y la mayor longitud de fibra.

Tabla 4.6 Clasificación por clase para variedad, rendimiento y calidad de fibra. Villavieja, 2005

Variedad	Variables	CLASES POR APTITUD		
		Moderadamente apta (A2)	Marginalmente apta (A3)	No apta (N)
NU-OPAL	Rendimiento (kg·ha^{-1})	829		
	Longitud (mm)	30		
	Micronaire (µg pulg^{-1})	4		
MAKINA	Rendimiento (kg·ha^{-1})	779	685	764
	Longitud (mm)	28	28	27,72
	Micronaire (µg pulg^{-1})	4	4	4,15
DP-90 Nal.	Rendimiento (kg·ha^{-1})		740	
	Longitud (mm)		26	
	Micronaire (µg pulg^{-1})		4	
DELTA OPAL	Rendimiento (kg·ha^{-1})	782		807,4
	Longitud (mm)	29		29,08
	Micronaire (µg pulg^{-1})	4		4,12

La tabla 4.7 muestra que para el año 2006, las variedades sembradas se ubicaron en A2 y N. Por rendimiento, el mayor valor correspondió para NU-OPAL. Para la longitud de fibra NU-OPAL en condiciones no aptas obtuvo la menor longitud de fibra, que se ubica dentro de los requerimientos del cultivo como fibra corta.

Tabla 4.7 Clasificación por clase para variedad, rendimiento y calidad de fibra. Villavieja, 2006

Variedad	Variables	Moderadamente apta (A2)	No apta (N)
NU-OPAL	Rendimiento (kg·ha^{-1})	1.071	1005,5
	Longitud (mm)	28	21,02
	Micronaire (µg pulg^{-1})	4	4,22
MAKINA	Rendimiento (kg·ha^{-1})	864	
	Longitud (mm)	27	
	Micronaire (µg pulg^{-1})	4	
DP-90 NAL	Rendimiento (kg·ha^{-1})		828,25
	Longitud (mm)		28,9
	Micronaire (µg pulg^{-1})		4
DELTA OPAL	Rendimiento (kg·ha^{-1})	913	
	Longitud (mm)	29	
	Micronaire (µg pulg^{-1})	4	

Los valores encontrados en el estudio expresan similar comportamiento por lo encontrado por Cuellar (2003) en el Valle del Sinú, donde sin tener restricción por un nutriente, la evaluación mostró el buen comportamiento en rendimiento de la variedad DELTA-OPAL para diferentes ambientes.

Cuando se relacionó el rendimiento con todos los parámetros abióticos (altitud, disponibilidad de O_2 y K, profundidad, pendiente, materia orgánica, pH), mediante regresíon lineal múltiple por pasos, el potasio mostró alta significancia (b = 47,79; p = 0,001) con el rendimiento de algodón-fibra; este comportamiento espacial puede ser explicado, para las siembras comerciales en los cuatro municipios, con base en los resultados obtenidos bajo condiciones semi-controladas (Capítulo 2 del documento de tesis) que reporta que la deficiencia de potasio redujo el crecimiento foliar, fotosíntesis, producción de materia seca y distribución de materia seca respecto a los tratamientos con suministro de potasio. También, bajo condiciones controladas de campo en el C.I.Nataima (Cap 3 del documento de tesis), con disponibilidad de potasio de 0,13 meq por kg de suelo y con los tratamientos de potasio evaluadas se encontró, que dosis superiores a 90 $kg{\cdot}ha^{-1}$ de K (0,15 y 0,19 meq K kg de suelo para 120 y 150 $kg{\cdot}ha^{-1}$ de K) presentaron influencia sobre el rendimiento de fibra y porcentaje de fibra, con incremento de tipo exponencial de tercer grado. La tendencia del incremento del rendimiento de algodón-fibra comercial para la aptitud de tierras por potasio presentó tendencia lineal difiriendo de lo encontrado bajo condiciones de manejo controlado en el C. I. Nataima. El mejor rendimiento de algodón-semilla y algodón-fibra se encontró con el tratamiento de 150 $kg{\cdot}ha^{-1}$ de K y el mejor porcentaje de fibra fue para los tratamientos mayores a 90 $kg{\cdot}ha^{-1}$ de K. Dentro del análisis realizado en el C.I. Nataima (Capítulo 3 de este documento) una de las variedades evaluadas fue DELTA-OPAL, variedad que durante los dos años de evaluación (2005-2006) se sembró en todas las localidades, razón por la cual se compara y analiza, encontrándose que el máximo rendimiento de algodón-fibra lo alcanzó DELTA-OPAL con la dosis de 134 $kg{\cdot}ha^{-1}$ de K con 1998 $kg{\cdot}ha^{-1}$ valor igual para CORPOICA-M-123 con 139 $kg{\cdot}ha^{-1}$ de K. Con este valor alcanzado en rendimiento de algodón-fibra, producido por el manejo del potasio, la localidad del C.I. Nataima se clasificaria en la clase A1 (Apta) por estar su resultado dentro del intervalo mayor de 1500 kg de algodón-fibra por hectárea (Figura 3.12B). Con base en los resultados de campo y de lo encontrado en el análisis

espacial, la recomendación de manejo de potasio en tierras clase A2 para que se aproximen a ser A1, sería aplicar como mínimo 65 $kg \cdot ha^{-1}$ de K, en banda sobre los surcos, asumiendo la variabilidad espacial por potasio que se encontró a través del Valle Cálido del Alto Magdalena (Figuras 4.3, 4.5, 4.7 y 4.9).

Para la calidad de la fibra, con el análisis de regresión por pasos no se encontró correlación con longitud y micronaire. Con este análisis el comportamiento de la calidad difiere con lo reportado por Bolonhezi *et al*. (1999) quienes afirman que la calidad de la fibra en algodón es sensiblemente influenciada por las condiciones climáticas, siendo las épocas de siembra y el manejo del potasio las que más interfieren en las características de las fibras y de los hilos.

Sin embargo, mediante el análisis de componentes principales se encontró que cuatro factores: textura del suelo, disponibilidad de K, altitud y micronaire, explican el 72,4% de la variabilidad total (Tabla 4.8 y Tabla 4.9). La textura del suelo con el mayor porcentaje de varianza (22,81%) es considerada como el primer factor que explica la respuesta a la variabilidad espacial y según la tabla 4.8 presenta correlación positiva con profundidad efectiva, disponibilidad de O_2 y rendimiento de algodón-fibra; y contraria con materia orgánica, micronaire y pH. El algodón por ser una planta muy sensible a la anoxia edáfica, por tener poca capacidad de penetración de raíces y por su bajo potencial radical, las propiedades físicas el suelo no debe presentar ningún tipo de restricciones como enconstramientos dado que bajo condiciones de humedad favorable las raíces crecen de 1,0 a 2,0 cm d^{-1} y penetran usualmente hasta los 2 m de profundidad (Bielorai, 1973). Los suelos algodoneros deben contener oxígeno por encima del 15% de la composición de gases de la atmósfera edáfica y humedad próxima a capacidad de campo en varias etapas del desarrollo (Beltrao, 1997). Los resultados muestran que para las condiciones de los municipios del Espinal y Villavieja los suelos se caracterizaron en su mayoría por ser suelos de textura franco arenosa y pocos profundos; sin embargo, para Ambalema y Natagaima las texturas presentes son las arcillosas y arenosas que limitan el desarrollo radical, pero por el manejo de la práctica agronómica de siembra con caballones o alomado los productores de la región han logrado mejorar la profundidad efectiva o área de raíces

para el establecimiento del cultivo del algodón, especialmente en los municipios de Ambalema y Espinal (Tabla 4.8).

Tabla 4.8 Vectores característicos asociados a la matriz de correlación de la aptitud de las tierras para algodón

Característica	COMPONENTES			
	Vector 1	Vector 2	Vector 3	Vector 4
Altitud	,212	-,213	**,840**	-,096
Profundidad efectiva	,642	-,605	,007	,332
Disponibilidad de O_2	,640	-,125	-,178	-,450
Textura	**,821**	-,172	,320	,314
Materia orgánica	-,672	-,168	,519	-,184
pH	-,228	,505	,250	,383
Pendiente	,235	,073	-,473	,031
Potasio	,239	**,789**	-,443	-,069
Algodón-fibra	,501	,666	,294	,039
Longitud	,107	,611	,514	,182
Micronaire	-,302	-,174	-,296	**,755**

El segundo factor (Tabla 4.9) que explica el 20,12% de la variabilidad total fue la disponibilidad de K, factor consistente en su expresión independiente del análisis estadístico utilizado. En la tabla 4.8 se observa que la disponibilidad de K tiene la mayor correlación positiva con rendimiento de algodón-fibra, longitud y pH, y contraria con profundidad efectiva y altitud. Los resultados muestran en la figura 4.5 que el Espinal presentó el menor porcentaje de área no apta por K (1,26%), mientras que Ambalema (Figura 4.3) presentó valor intermedio con 36,27% y los municipios de Natagaima y Villavieja (Figuras 4.7, y 4.9) presentaron los mayores porcentajes de áreas no aptas por potasio, con 62,07% y 73,07%, respectivamente. Este comportamiento es similar a lo reportado Staut y Kurihara, (2001) quienes reportan que la relación $(Ca^{+2}+Mg^{+2})/K^{+}$ deseada debe estar entre 17 y 35, valores por debajo de 17 se presentaría probablemente deficiencia de calcio y magnesio, y si estuviese por encima de 35, habría respuesta a la fertilización potásica sin tener contenidos adecuados de los otros nutrientes, y es mostrado en la figura 4.7 donde el 83% del área de Natagaima es considerada como A3 (No apta).

El tercer componente que interpreta el 18,45% de la variabilidad total es la altitud (Tabla 4.9). En la tabla 4.8 se observa que la altitud presenta alta correlación positiva con materia orgánica y longitud de la fibra. En el caso de algodón, los procesos que desencadenan la floración y fructificación son termo-dependientes, es decir que la temperatura es el factor principal que regula el progreso normal del cultivo y determina su rendimiento (Constable y Shaw, 1988). La temperatura media del aire tiene el más grande efecto sobre el período de primer botón floral visible con brácteas; una disminución en la temperatura desde 27 a 21 °C incrementa la longitud del período de primer boton floral de 15 a 35 días (Wanjura *et al*., 1979). Los municipios de Natagaima y Villavieja presentaron las mayores altitudes por presentar área montañosa en sus límites municipales, por lo tanto está asociada a pendientes mayores del 25% y áreas con más del 50% de nubosidad que no son adecuadas para cultivar el algodonero, sin importar su temperatura ni su humedad (Waddle, 1984).

El cuarto componente que interpreta el 11,02% de la variabilidad total es la propiedad de calidad micronaire (Tabla 4.9). Observamos, también en la tabla 4.8, que el micronaire presenta alta correlación positiva con pH y textura, y contraria con la disponibilidad de K. Para las condiciones semi-controladas de invernadero se encontró efecto directo sobre el micronaire para los tratamientos 0 y 30 mg kg^{-1} de K con valores menores de 3,5 µg $pulg^{-1}$, indicando que poseen una pared celular delgada con poca celulosa en sus fibras y clasificada como inmadura, este valor fue encontrado para las condiciones de Natagaima. Similares resultados también se reportan bajo las condiciones del C.I. Nataima, donde se encontró diferencia significativa para la interacción variedad*dosis de potasio para las propiedades de calidad micronaire, madurez y uniformidad. Este resultado también es similar a lo reportado para las condiciones comerciales de manejo del cultivo en los cuatro municipios. Estos resultados no difieren con lo encontrado por Chiavegato *et al.* (1999), quienes reportaron que entre las características de la fibra, el índice micronaire y la madurez fueron las de mayor variación debida a la influencia del ambiente; similar resultado también lo reportó Meredith (1986, 1994) quien encontró que el micronaire es influenciado por el ambiente y el manejo agronómico del cultivo, tal como lo muestran los resultados con dosis de potasio en el C.I. Nataima (Espinal) y Botucatu, Brasil. Estos resultados son igualmente explicados por Silva *et al.* (1994), quienes consideran que el

potasio por participar en el mantenimiento del follaje y regular el ciclo del algodón, promueve un aumento de los procesos metabólicos relacionados con el engrosamiento de la pared secundaria de la fibra (Cassman *et al.*, 1990), mejorando el índice micronaire (finura más madurez).

Tabla 4.9 Raíces características mayores a 1 extraídas de la variabilidad total de la matriz de correlación, para la evaluación por aptitud de tierras en el Valle Cálido del Alto Magdalena

Característica	Raíz característica	% de Varianza	% de varianza acumulada
Textura del suelo	2,51	22,81	22,81
Disponibilidad de K	2,13	20,12	42,93
Altitud	2,03	18,45	61,37
Micronaire	1,21	11,02	72,39

En la figura 4.11 se observan las figuras para dos componentes principales (Figura 4.11A) y tres componentes principales (Figura 4.11B). En la figura 411A, se observa gran dispersión en los dos componentes y por la proximidad entre individuos se conformaron cinco grupos o sub-poblaciones por sus valores próximos en los dos componentes. Un primer grupo (I) conformado por las fincas del Municipio de Villavieja que están en los valores negativos para los dos componentes, este grupo es clasificado como de tierras no aptas (N). Un segundo grupo (II) que se ubica en los valores centrales de disponibilidad de K y negativo para textura, fue conformado por las fincas del Municipio de Natagaima, y por esta ubicación se clasifican como clase Marginalmente Apta (A3). El tercer grupo (III) corresponde a las fincas ubicadas en los valores positivos de disponibilidad de potasio y negativamente para textura, son del municipio de Ambalema e igualmente son de clase Marginalmente apta. Un cuarto grupo (IV) ubicado en los valores centrales y positivos para texura y negativos para disponibilidad de potasio, corresponde en su mayoría a las fincas de Espinal y como clase moderadamente Apta. El quinto grupo (V) ubicado en los valores positivos para los dos componentes corresponde al C.I. Nataima con las dosis de potasio. La diferencia entre el grupo quinto (V) y los demás, además de la disponibilidad de potasio, está en el manejo agronómico del mismo, que la ubican en tierra Apta. Del

consenso a los asistentes técnicos, la dosis estandarizada para la zona es de 40 kg·ha^{-1} de K, recomendación muy baja respecto a la disponibilidad de K en la región.

Para el análisis con los tres componentes principales textura, disponibilidad de potasio y altitud los cinco grupos mantienen su similitud (Figura 4.11B)

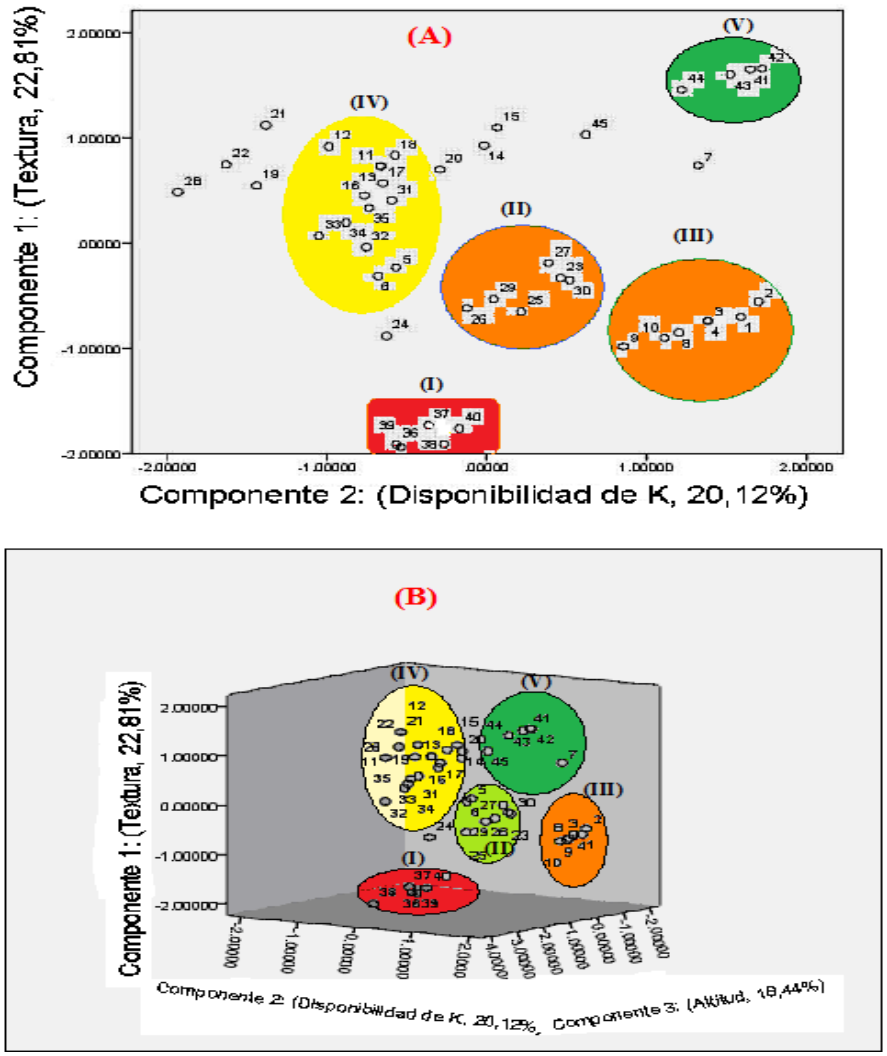


Figura 4.11 Clasificación de fincas por aptitud de tierras mediante los dos principales componentes (A) y los tres componentes (B) en algodón

Para el análisis con los tres componentes principales textura, disponibilidad de potasio y micronaire (Figura 4.12), los cinco grupos se mantienen pero con una conformación

diferente a la de los grupos anteriores. Esto es explicado porque respecto al micronaire su participación es inferior (11,02%) por ser el cuarto componente principal. Cuatro grupos se ubican en los valores negativos y sólo el quinto (V) que es el C.I. Nataima se ubica en el positivo para los tres componentes principales graficados (textura, disponibilidad de K y micronaire).

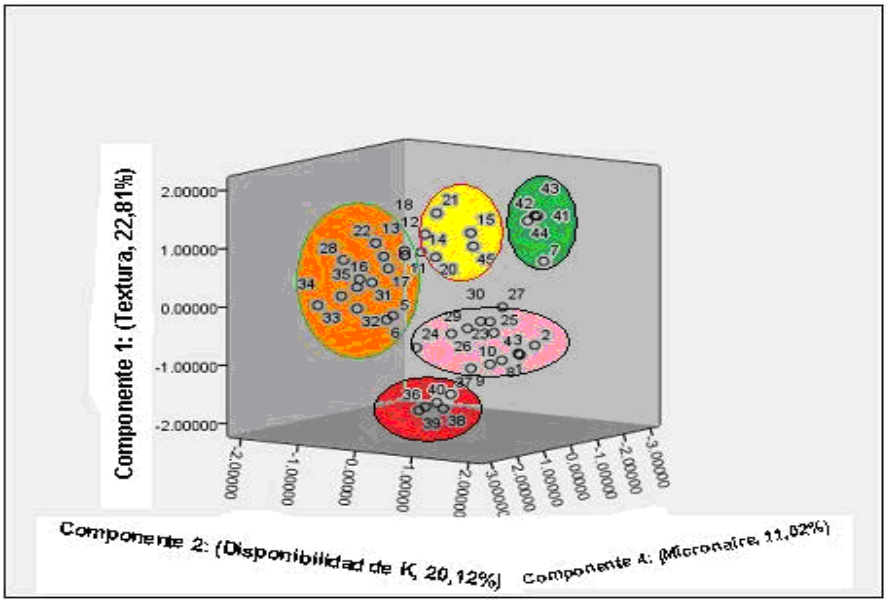


Figura 4.12 Clasificación de fincas por aptitud de tierras mediante el primero, segundo y cuarto componente principal en algodón

Los resultados indican que el rendimiento y la calidad de los cultivos varían espacialmente, y como resultante existen zonas agroecológicas donde un cultivo determinado produce más que en otras, al igual que dentro de un mismo lote. Lo anterior sucedió entre municipios y dentro de municipios por fincas y es explicado por Cassel *et al*. (2000) quienes reportan que los factores que influyen en el desarrollo de los cultivos y en la producción también varían espacialmente.

4.5 CONCLUSIONES

En los cuatro municipios, por la aptitud de las tierras evaluadas, el 0,26% de área total del estudio presentó clase A1, el 45%, A2, el 25,08%, A3 y el 25,08, N; correpondiendo a

Espinal la mejor oferta ambiental con el 98,4% como moderadamente apta para el cultivo de algodón.

EL micronaire como parámetro de la calidad de la fibra, para los dos años y todas las variedades sembradas, se ubicó en la clase A1 (3,7-4,2 µg $pulg^{-1}$.); sin embargo, por biofísicas se ubicó en A2. Por municipios la mayor longitud de la fibra se obtuvo en Villavieja.

Por rendimiento de algodón fibra: en Ambalema la mejor variedad fue DELTA-OPAL, para Espinal y Villavieja NU-OPAL. En Natagaima fue DP-90 Nal para el año 2005 y DELTA-OPAL para el 2006.

Se presentó similar respuesta en el rendimiento de algodón-fibra y micronaire por efecto del potasio, como lo encontrado bajo condiciones del C.I. Nataima en los cuatro municipios algodoneros evaluados, y con respuesta similar para la variedad DELTA-OPAL.

El comportamiento de la variabilidad espacial para la definición de tierras por aptitud para la siembra del algodón fue explicada con un 72,39% por la textura, disponibilidad de potasio, altitud y micronaire, correspondiendo a estos componentes su influencia en la producción y calidad de fibra de algodón en los cuatro municipios evaluados. Con los criterios de definición de aptitud de tierra no se encontraron zonas aptas por potasio, pero sí zonas moderadamente y marginalmente aptas para todos municipios y no aptas de las actuales sembradas para Villavieja. Por consiguiente, la disponibilidad de potasio como criterio principal de evaluación, es un factor que permite clasificar por aptitud las tierras en algodón.

El enfoque de la investigación basada en la integración entre la información basica y aplicada es apropiada para la comprensión de relaciones causa-efecto en los cultivos, con el propósito de realizar manejos especificos que consideren la variabilidad espacial y busquen mayor eficiencia en el uso de recursos para una agricultura sostenible.

4.6 LITERATURA CITADA

BARRAGÁN, E. y CADENA, T. J. (2001). El proceso de desarrollo de la fibra de algodón y factores que afectan la calidad. Memorias III Encuentro de la Cadena Algodón-Textil-Confecciones. C.I. Nataima. Corpoica.

BELTRAO, N. E. DE M. (1997). Caracterização de sistemas e tecnologías de cultivo para a cotonicultura herbacea com enfase para o Norte Minas Gerais. EMBRAPA Algodao. (Campina Grande, PB). 56 p.

BEEK, J. K. DE BIE K AND DRIESSEN, P. (1997). Land evaluation for sustainable land management. Proceedings conference on Geo-information for sustainable land management. Enschede, The Netherlands.

BIELORAI, H. (1973). The irrigation of cotton. In: Yaron, B, et al. (Ed). Arid Zone Irrigation. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York. 373-377.

BOLONHEZI, D., ATHAYDE, M. L. F., SABINO, N. P.; KONDO, J. I. FUZATTO, M. G., BOLONHEZI, A. C., BORTOLETTO, N., CASTRO, J. L. (1999). Efeito da época de semeadura sobre as características tecnológicas das fibras de três variedades de algodoeiro. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ALGODÃO, 2, 1999, Ribeirão Preto. **Anais.** Campina Grande: Embrapa-CNPA, p. 709-712.

BRADOW, J. M., DAVIDONIS, G. H. (2000). Quantitation of fiber quality and the cotton production-processing interface: a physiologist´s perspective. **Journal of Cotton Science**. 4: 34-64.

CAICEDO, A. M. y BARRAGÁN, E. (2001). Requerimientos hídricos y manejo del agua en las nuevas variedades de Corpoica. Memorias III Encuentro de la Cadena Algodón-Textil-Confecciones. C.I. Nataima. Corpoica

CASSEL, D. K., WENDROTH, O. AND NIELSEN R. D. (2000). Assessing spatial variability in an agricultural experiment station field: Opportunities arising from spatial dependence, **Agron. J.** 92: 706-714.

CASSMAN, K. G., KERBY, T. A., ROBERTS, B. A., BRYANT, D. C., HIGASHI, S. L. (1990). Potassium nutrition effects on lint yield and fiber quality of Acala cotton. **Crop Science.** 30: 672-677.

CONSTABLE, G.A. Y SHAW A. J. (1988). Temperature Requirements for Cotton. Agfacts P5.3.5. pp.1-4

CUELLAR, A. (2003). Análisis espacial de algunas variables de calidad y rendimiento del algodón en el valle del Sinu usando métodos geoestadisticos. Tesis. Estadística. Universidad Nacional de Colombia. 75 p.

CHIAVEGATO, E. J., FUZATTO, M. G., ABRAHÃO, J. T. M., KONDO, J. I. (1999). Efeito do ambiente e de cultivares em componentes da produção e características tecnológicas da fibra e do fio de algodão. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE

ALGODÃO, 2, 1999, Ribeirão Preto. Anais. Campina Grande: Embrapa-CNPA, pp. 578-581.

DOOREMBOS, J; KASSAM A. H. (1986). Yield response to water. FAO irrigation and drainage. Paper 23: 87-92.

FAUCONNIER, D. (1973). Fertilizing for high yields: Cotton. I.P.I. Bull. No. 2, Bern. 40 p.

FRYE, A. (2000). Diagnostico químico de los suelos del Valle Cálido del Alto Magdalena en relación con su fertilidad. En: Fertilidad de los suelos del Valle Cálido del Alto Magdalena. SCCS. Capitulo Tolima, pp. 100 -117.

FAO. (1995). Planning for sustainable use of land resources: Towards a new approach. FAO land and water bulletin, Rome. 60 p.

FAO. (1997). Land quality indicators and their use in sustainable agriculture and rural development. FAO, Rome.

GROOT*, R. (*1989**).** Meeting educational requirements in *Geomatics*. ITC-Journal. 1:1-4

GUINN G. (1982). Causes of square and boll shedding in cotton. U.S. Department of Agriculture. (Technical Bulletin, 1672).

HALEVY, J.; BAZELET M. (1992). Fertilización del algodón para rendimientos altos. Instituto Internacional de la Potasa, Instituto de la Potasa y el Fósforo. Boletín No. 2. 64 p.

HARTKAMP, A. D., WHITE, J.W. AND HOOGENBOOM. G. (1999). Interfacing geographic information systems with agronomic modeling. **Agron. J**. 91: 761-772.

HEITHOLT, J. J. (1994). Canopy characteristic associated with deficient and excessive cotton plant densities. **Crop. Sci**. 34: 1291-1297.

JOHNSON, R., R. DOWNER, J. BRADOW, P. BAUER., SADLER. E. (2002). Variability in cotton fiber yield, fiber quality, and soil properties in Southeastern Coastal Plain. Agron. J. 94, 1305–1316.

KALOGIROU, S. (2002). Expert system and GIS: an application of land suitability evaluation. Computers, environment and Urban systems. 26 : 89 p.

KERBY, T. A.; ADAMS, F. (1985). Potassium nutrition of cotton. Chap 36, 843-860 pp. In: Munson, R. D. (Edt) Potassium in Agriculture. **Amer, Soc. Agron**. Madison, Wisc. USA.

MANDAL, D. K, MANDAL, C. VENUGOPALAN, M. V. (2005). Suitability of cotton cultivation in shrink-swell soils in central India. Agricultural system 84: 55-75.

MARTINEZ, L. J. (2003). La Geomática y su importancia en la Agricultura. Memorias del VIII Congreso Sociedad Colombiana de Fitomejoramiento y producción de cultivos-Simposio Agricultura de Precisión.

MEREDITH, W. R. Jr. (1986). Fiber quality variation among USA cotton growing. In J Brown. Ed. Proc. Beltwide Cotton Conf. Natl. Cotton Council Memphis. T. N. 105 -106 pp.

MEREDITH, W. R. Jr. (1994). Where does fiber quality come from. Reprinted from proceeding of the Beltwide cotton conference National C. Council. Memphis. 155–157 p.

LARCHER, W. (1995). The effect of environmental and physiological variables on the carbon dioxide gas exchange of trees. Phytosynthetica 3:167-198.

NOVEL, P. S. (1991). Physicochemical and Environmental Plant Physiology. Academic Press, San Diego, New York, Boston, London, Sydney, Tokio, Toronto.

RIMON, D. (1984). Cotton Growing, Principles and Practices (Hebrew) 416 p.

SILVA, N. M. da., KONDO, J. I., SABINO, N. P. (1994). Importância da adubação na qualidade do algodão e outras plantas fibrosas. In: EUSTÁQUIO, M de S.; BUZZETI, S. (Coord.). **Importância da adubação na qualidade de produtos agrícolas**. São Paulo: Ícone, 189-215.

SILVA, N. M. da. (1999). Nutrição mineral e adubação de algodoeiro no Brasil. In: CIA, E.; FREIRE, E. C.; SANTOS, W. J. Dos (Eds). **Cultura do algodoeiro**. Piracicaba: Potafós, 57-92.

STAFFORD, J.; MILLER. P. (1996). Spatially Variable Treatments of Weed Patches. Pp. 465-473. In: Robert, P.; Rust, H. and R. Larson, eds. Proceedings of the 3rd International Conference on Precision Agriculture. June 23-26, 1996. Minneapolis, MN, USA. (ASA-CSSA-SSSA, Madison, Wisconsin, 1997, pp. 465-474.

STAUT, L. A.; KURIHARA, C. H. (2001). Calagem e adubação. In: Embrapa Agropecuária Oeste. Algodão: tecnologia de produção. Dourados: Embrapa, Algodão e Embrapa Agropecuária Oeste, pp. 103-123.

WADDLE, B.A. (1984). Crop growing Practices. Chap 8. In: Cotton (Ed. Kohel and Lewis), Agronomy Series 2: 233-263.

WANJURA, D. F., JONES J. W. AND HESKETH. J. D. (1979). Field studies and model simulation of the first square event in cotton. **Agron. J.** 71:261-266.