



UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

**Efecto de las variaciones
ambientales en el crecimiento,
desarrollo y acumulación de
azúcares en variedades de sorgo
dulce (*Sorghum bicolor* (L.) Moench)**

JAIME HUMBERTO BERNAL RIOBO

Universidad Nacional de Colombia

Facultad de Ciencias Agrarias

Bogotá, Colombia

2013

Efecto de las variaciones ambientales en el crecimiento, desarrollo y acumulación de azúcares en variedades de sorgo dulce (*Sorghum bicolor* (L.) Moench)

Jaime Humberto Bernal Riobo

Tesis de grado para optar al título de:

Doctor en Ciencias Agropecuarias, Área Agraria Fisiología Vegetal

Directora:

Ph.D. Ciencias Químicas, Liz Patricia Moreno Fonseca

Codirector:

Ph.D Fisiología de Plantas, Jorge Cadena Torres

Línea de Investigación:

Fisiología Vegetal

Universidad Nacional de Colombia

Facultad de Ciencias Agrarias

Bogotá, Colombia

2013

DEDICATORIA

A mi esposa Ruby Stella y mis hijas Catherine Alejandra y Diana a quienes amo, por su comprensión, paciencia, tolerancia y apoyo incondicional

A mis padres Luis Guillermo (QEPD) y Griselda por su amor y bendiciones y por haberme hecho un hombre de bien.

Agradecimientos

A Corpoica, por la oportunidad de realizar los estudios doctorales y a COLCIENCIAS y CAMG, por la financiación en el marco del Proyecto “Obtención de variedades de sorgo dulce con adaptación al trópico bajo, para la producción de alcohol carburante en tres regiones de Colombia”, contrato 268/06.

Al Dr. Jaime José Triana Restrepo (QEPD), Director C.I. La Libertad por su apoyo incondicional, consejo y amistad.

A los Doctores Liz Patricia Moreno Fonseca y Yolanda Rubiano Sanabria, por la dirección y asesoría en mis estudios doctorales y trabajo de tesis.

A mis colegas y amigos Ruby Stella Hernández, Nubia Stella Rodríguez, Judith Martínez A., Dagoberto Criollo, y Edwin Castro, por su colaboración y apoyo en el desarrollo de las actividades de campo.

A los investigadores del Ingenio Providencia Oscar Mauricio Delgado y Gloria Elena Cano Gómez, por su colaboración y apoyo en el desarrollo de las actividades de campo.

A los investigadores del Centro de Investigación Cenicaña Doctores Jesus E. Larrahondo y Edgar Castillo, por su apoyo en el análisis de calidad sorgo dulce.

Al Dr. Gilles Trouche por la asesoría técnica, consejo y amistad.

Resumen

La producción de azúcares en el cultivo de sorgo dulce [*Sorghum bicolor* (L.) Moench] es influenciada por la interacción genotipo por ambiente. El objetivo del estudio fue comprender la contribución del ambiente sobre la acumulación de azúcares en genotipos de sorgo dulce y su efecto sobre procesos fisiológicos del cultivo. Diez líneas de sorgo fueron sembradas en un diseño de bloques al azar en seis ambientes contrastantes por latitud, altitud y fertilidad de suelos. Se realizaron pruebas de análisis genotipo por ambiente, en contenidos de azúcares en el tallo y variables agronómicas asociadas a la producción de azúcares y análisis de regresión lineal múltiple entre el contenido de azúcares (Brix) y condiciones ambientales. Se realizó un análisis funcional de crecimiento en 3 genotipos de sorgo dulce bajo dos ambientes. Los resultados indicaron que el ambiente contribuyó con el 39.2% de la variación en la concentración de azúcares (Brix), el 53.7% en el peso seco del tallo y el 29.9% en el volumen de jugos. Temperaturas mínimas bajas durante la fase reproductiva del cultivo y días secos en la fase de llenado de grano fueron los de mayor contribución en la acumulación de azúcares. La sacarosa fue el azúcar dominante en los sólidos solubles (Brix), $R^2=0.9$. El peso seco total presentó correlaciones positivas con TCC (0.71**), IAF (0.76**) RAFi (0.89**) y ETC (0.28**), y correlaciones negativas con PRETO (-0.28**) y HR (-0.41). Los genotipos HT7, HT46 y JJT18 presentaron tasas máximas de crecimiento de $4.24 \text{ g m}^{-2} \text{ }^\circ\text{Cd}^{-1}$, $4.89 \text{ g m}^{-2} \text{ }^\circ\text{Cd}^{-1}$ y $4.69 \text{ g m}^{-2} \text{ }^\circ\text{Cd}^{-1}$, respectivamente. La mayor acumulación de materia seca total en los genotipos de sorgo fue encontrada en ambientes secos con distribución de materia seca por orden de acumulación en tallos, panículas, hojas y vainas. Valores altos de uso eficiente de radiación se encontraron en HT7 (2.94 g MJ^{-1}), HT46 (2.56 g MJ^{-1}) y JJT18 (2.15 g MJ^{-1}) en condiciones secas. Los resultados permitieron identificar genotipos de sorgo dulce con gran potencial para la agroindustria de biocombustibles por sus altos rendimientos de azúcares y fibra en los ambientes de Palmira, Espinal, Cereté y Codazzi. Por otro lado, los ambientes de trópico húmedo con menor radiación solar y suelos de baja fertilidad como Gaitán y Villavicencio serían ambientes menos favorables para la producción competitiva de sorgo dulce para bioetanol.

Palabras clave: Sorgo dulce, acumulación azúcares, Genotipo x Ambiente, análisis crecimiento, distribución asimilados.

Abstract

Sweet sorghum [*Sorghum bicolor* (L.) Moench] sugar production is influenced by genotype by environment interactions. The aim of the study was to understand the environment contribution on sugar accumulation of sweet sorghum genotypes and its effect on crop physiological processes. Ten lines of sorghum were planted in a randomized block design in six environments different in latitude, altitude and soil fertility. Genotype by environment analysis was performed for sugar concentration, sugar content and agronomic variables associated with the sugar production, and multiple linear regression analysis were conducted between sugar concentration (Brix) and environmental variables. Functional analysis was performed in 3 growing sweet sorghum genotypes under two environments. The results indicated that the environment contributed 39.2% of the variation in the concentration of sugars (Brix) 53.7% in the stem dry weight and 29.9 % by juice volume. Low minimum temperatures during the reproductive phase of the crop and dry days in the grain filling stage had the biggest contribution to the accumulation of sugars. Sucrose was the dominant sugar in soluble solids (Brix), $R^2 = 0.9$. The total dry matter showed a positive correlation with CGR (0.71**), LAI (0.76**) PARi (0.89**) and ETo (0.28**) and negative correlations with rain (-0.28**) and relative humidity (-0.41**). The genotypes HT7, HT46 and JJT18 had maximum growth rates of $4.24 \text{ g m}^{-2} \text{ }^\circ\text{Cd}^{-1}$, $4.89 \text{ g m}^{-2} \text{ }^\circ\text{Cd}^{-1}$ and $4.69 \text{ g m}^{-2} \text{ }^\circ\text{Cd}^{-1}$, respectively. The greatest total dry matter accumulation in sorghum genotypes was found in dry environments with greater dry matter partitioning in stems, panicles, leaves and sheath. High values of radiation use efficiency were found in HT7 (2.94 g MJ^{-1}), HT46 (2.56 g MJ^{-1}) and JJT18 (2.15 g MJ^{-1}) in dry conditions. The results allowed the identification of sweet sorghum genotypes with high potential for biofuel due to its high sugar yields and fiber for Palmira, Espinal, Cereté and Codazzi. Furthermore, humid tropical environments with less solar radiation and low fertility soils like Villavicencio and Gaitán would be less favorable for competitive production of sweet sorghum for bioethanol.

Keywords: Sweet sorghum, Sugar accumulation, GE interactions, Plant growth analysis, Dry matter distribution

Contenido

Resumen	Pág.
Lista de figuras	XI
Lista de tablas	XIII
	XV
Introducción	1
1. Capítulo 1.	
Efecto de la interacción genotipo ambiente en la acumulación de azúcares en el tallo de sorgo dulce y componentes asociados con la producción de azúcares.	6
1.1 Introducción.	6
1.2 Materiales y Métodos.	10
1.2.1 Zona de estudio.	10
1.2.2 Material genético.	12
1.2.3 Manejo agronómico.	13
1.2.4 Variables registradas.	13
1.2.5 Diseño experimental.	15
1.2.6 Análisis estadístico.	15
1.3 Resultados.	18
1.3.1 Caracterización ambiental zonas de estudio.	18
1.3.2 Efecto de la interacción genotipo por ambiente sobre el comportamiento agronómico de genotipos de sorgo dulce.	24
1.4 Discusión	57
1.5 Conclusiones	67
2. Capítulo 2.	
Análisis de la dinámica de crecimiento y producción de biomasa en dos condiciones ambientales.	69
2.1 Introducción	69
2.2 Materiales y Métodos	81
2.2.1 Condiciones ambientales	81
2.2.2 Material genético	82
2.2.3 Manejo agronómico	82
2.2.4 Variables registradas en los genotipos	83
2.2.5 Diseño experimental	86
2.2.6 Análisis estadístico	86
2.3 Resultados	88
2.3.1 Caracterización zonas de estudio	88
2.3.2 Efecto de las condiciones ambientales sobre acumulación de	91

materia seca y distribución de asimilados.	
2.3.3 Efecto de las condiciones ambientales sobre la dinámica de expansión foliar.	100
2.3.4 Efecto de las condiciones ambientales sobre los índices de crecimiento	105
2.3.5 Efecto de las condiciones ambientales sobre las tasa fotosintética y uso eficiente de la radiación	113
2.3.6 Efecto de las condiciones ambientales sobre la producción de biomasa y acumulación de azúcares	116
2.4 Discusión	118
2.5 Conclusiones	123
Bibliografía	125
Anexos	135

Lista de figuras

	Pág.
Figura 1-1. Variaciones en temperaturas máximas y mínimas durante el ciclo de crecimiento de los genotipos de sorgo dulce en las zonas de estudio, 2009-2010.	20
Figura 1-2. Variación de la radiación solar durante el ciclo de crecimiento de los genotipos de sorgo dulce en las zonas de estudio, 2009-2010.:	21
Figura 1-3. Balance hídrico climático durante el ciclo de crecimiento de los genotipos de sorgo dulce en las zonas de estudio, 2009-2010.	22
Figura 1-4. Variación de la humedad relativa durante el ciclo de crecimiento de los genotipos de sorgo dulce en las zonas de estudio, 2009-2010.	23
Figura 1-5. Biplot AMMI para duración fase vegetativa ($^{\circ}\text{Cd}$) de genotipos de sorgo dulce en 6 ambientes, 2009-2010.	25
Figura 1-6. Biplot AMMI para duración fase reproductiva ($^{\circ}\text{Cd}$) de genotipos de sorgo dulce en 6 ambientes, 2009-2010.	27
Figura 1-7. Biplot AMMI para duración fase llenado grano ($^{\circ}\text{Cd}$) de genotipos de sorgo dulce en 6 ambientes, 2009-2010.	29
Figura 1-8. Biplot AMMI para altura de planta (cm) de genotipos de sorgo dulce en 6 ambientes, 2009-2010	31
Figura 1-9. Biplot AMMI para diametro basal (mm) de genotipos de sorgo dulce en 6 ambientes, 2009-2010.	33
Figura 1-10. Biplot AMMI para diametro del quinto entrenudo (mm) de genotipos de sorgo dulce en 6 ambientes, 2009-2010	34
Figura 1-11. Biplot AMMI para biomasa en tallos (t ha^{-1}) de genotipos de sorgo dulce en 6 ambientes, 2009-2010.	37
Figura 1-12. Biplot AMMI para biomasa en hojas (t ha^{-1}) de genotipos de sorgo dulce en 6 ambientes, 2009-2010.	39
Figura 1-13. Biplot AMMI para biomasa en panículas (t ha^{-1}) de genotipos de sorgo dulce en 6 ambientes, 2009-2010.	40
Figura 1-14. Biplot AMMI para valores Brix de genotipos de sorgo dulce en 6 ambientes, 2009-2010.	43
Figura 1-15. Biplot AMMI para el contenido de azúcares (g planta^{-1}) de genotipos de sorgo dulce en 6 ambientes, 2009-2010.	44

	Pág.
Figura 1-16. Biplot AMMI para el contenido de jugo en el tallo (ml) de genotipos de sorgo dulce en 6 ambientes, 2009-2010	46
Figura 1-17. Relación entre los sólidos solubles (Brix) disueltos en el jugo del tallo con el contenido de sacarosa en genotipos de sorgo dulce. Palmira, 2009.	49
Figura 1-18. Correlación entre Brix, contenido de azúcares (AZCON), peso seco tallos (PSTA), peso seco hojas (PSHO), peso seco panoja (PSPA), volumen de jugo (VJUG), altura de planta (ALT), diámetro basal (DIA1), 5to entrenudo (DIA2), y acumulación grados día fa fases vegetativa (TT1), reproductiva (TT2) y madurez fisiológica (TT3) en genotipos de sorgo dulce evaluados en 6 ambientes, 2009-2010s	50
Figura 1-19. Clasificación zonas de estudio a partir de las variables edafoclimáticas, 2009-2010.	52
Figura 2-1. Variación de las temperaturas máximas y mínimas durante el ciclo de crecimiento de los genotipos de sorgo dulce en las zonas de estudio, 2010.	89
Figura 2-2. Balance hídrico climático durante el ciclo de crecimiento de los genotipos de sorgo dulce en las zonas de estudio, 2010.	90
Figura 2-3. Variación de la radiación solar durante el ciclo de crecimiento de los genotipos de sorgo dulce en las zonas de estudio, 2010.	90
Figura 2-4. Variación de la humedad relativa durante el ciclo de crecimiento de los genotipos de sorgo dulce en las zonas de estudio, 2010.	90
Figura 2-5. Valores observados y modelados de la acumulación de materia seca total (g planta ⁻¹) de los genotipos de sorgo dulce HT7, HT46 y JJT18 en Palmira, 2010.	94
Figura 2-6. Valores observados y modelados de la acumulación de materia seca total (g planta ⁻¹) de los genotipos de sorgo dulce HT7, HT46 y JJT18 en Villavicencio, 2010.	95
Figura 2-7. Efecto de las variaciones ambientales sobre la acumulación de materia seca total (g planta ⁻¹) en los genotipos de sorgo dulce HT7, HT46 y JJT18 en las localidades de Palmira (P) y Villavicencio (V).	96
Figura 2-8. Efecto de las variaciones ambientales sobre la acumulación de materia seca en tallos (g planta ⁻¹) en los genotipos de sorgo dulce HT7, HT46 y JJT18 en las localidades de Palmira (P) y Villavicencio (V).	97
Figura 2-9. Efecto de las variaciones ambientales sobre la acumulación de materia seca en hojas (g planta ⁻¹) en los genotipos de sorgo dulce HT7, HT46 y JJT18 en las localidades de Palmira (P) y Villavicencio (V).	98
Figura 2-10. Distribución de fotoasimilados (g planta ⁻¹) en tallo, hojas, vaina y panícula de los genotipos de sorgo dulce HT7, HT46 y JJT18 en las condiciones ambientales de Palmira.	99
Figura 2-11. Distribución de fotoasimilados (g planta ⁻¹) en tallo, hojas, vaina y panícula de los genotipos de sorgo dulce HT7, HT46 y JJT18 en las condiciones ambientales de Villavicencio.	100
Figura 2-12. Valores observados y modelados del área foliar (cm ² planta ⁻¹) en los genotipos de sorgo dulce HT7, HT46 y JJT18 en Palmira, 2010.	103
Figura 2-13. Valores observados y modelados del área foliar (cm ² planta ⁻¹) en los genotipos de sorgo dulce HT7, HT46 y JJT18 en Villavicencio, 2010.	103
Figura 2-14. Efecto de las variaciones ambientales sobre el área foliar (cm ² planta ⁻¹) en los genotipos de sorgo dulce HT7, HT46 y JJT18 en las localidades de Palmira (P) y Villavicencio (V).	104

	Pág.
Figura 2-15. Efecto de las variaciones ambientales sobre el índice de área foliar (IAF) en los genotipos de sorgo dulce HT7, HT46 y JJT18 en las localidades de Palmira (P) y Villavicencio (V).	105
Figura 2-16. Efecto de las variaciones ambientales sobre la Tasa de Crecimiento Relativo (TCR) en los genotipos de sorgo dulce HT7, HT46 y JJT18 en las localidades de Palmira (P) y Villavicencio (V).	106
Figura 2-17. Efecto de las variaciones ambientales sobre la Tasa de Asimilación Neta (TAN) en los genotipos de sorgo dulce HT7, HT46 y JJT18 en las localidades de Palmira (P) y Villavicencio (V).	107
Figura 2-18. Efecto de las variaciones ambientales sobre la Tasa de Crecimiento del Cultivo (TCC) en los genotipos de sorgo dulce HT7, HT46 y JJT18 en las localidades de Palmira (P) y Villavicencio (V).	108
Figura 2-19. Efecto de las variaciones ambientales sobre el Área Foliar Específica (AFE) en los genotipos de sorgo dulce HT7, HT46 y JJT18 en las localidades de Palmira (P) y Villavicencio (V).	109
Figura 2-20. Efecto de las variaciones ambientales sobre la Relación Área Foliar (RAF) en los genotipos de sorgo dulce HT7, HT46 y JJT18 en las localidades de Palmira (P) y Villavicencio (V).	110
Figura 2-21. Efecto de las variaciones ambientales sobre la Fracción Biomasa Foliar (FBF) en los genotipos de sorgo dulce HT7, HT46 y JJT18 en las localidades de Palmira (P) y Villavicencio (V).	111
Figura 2-22. Efecto de las variaciones ambientales sobre la Fracción Biomasa Tallo (FBT) en los genotipos de sorgo dulce HT7, HT46 y JJT18 en las localidades de Palmira (P) y Villavicencio (V).	112
Figura 2-23. Tasa fotosintética y radiación fotosintéticamente activa en los genotipos de sorgo dulce HT7, HT46 y JJT18 en dos condiciones ambientales.	114
Figura 2-24. Respuesta de la tasa fotosintética neta a la Radiación Fotosintéticamente Activa (RAF) en los genotipos de sorgo dulce HT7, HT46 y JJT18 en dos condiciones ambientales.	115
Figura 2-25. Producción de biomasa total, tallos, hojas y panículas ($t\ ha^{-1}$) en los genotipos de sorgo dulce HT7, HT46 y JJT18 en dos condiciones ambientales.	117
Figura 2-26. Grados Brix y contenido de azúcares ($g\ planta^{-1}$) en los genotipos de sorgo dulce HT7, HT46 y JJT18 en dos condiciones ambientales.	117

Lista de tablas

	Pág.
Tabla 1-1. Localización geográfica y fechas de siembra ensayos experimentales multiambientales (EMA) en las seis localidades, 2009-2010.	11
Tabla 1-2. Origen geográfico, características agronómicas, producción de forraje y brix de variedades de sorgo de la colección de trabajo de Corpoica.	12
Tabla 1-3. Análisis completo de varianza a partir de medias, usando los procedimientos de Gollob (1968).	17
Tabla 1-4. Datos promedios de temperatura máxima (Tmax), temperatura mínima (Tmin), radiación solar (Rad), Humedad Relativa (HR), y acumulados de precipitación (PRETO) y evapotranspiración de referencia (ETo) por ciclo de cultivo en las seis localidades, 2009-2010.	19
Tabla 1-5. Características físico-químicas de los suelos en las seis localidades, 2009-2010.	24
Tabla 1-6. Medias, valores mínimos y máximos, desviación estándar para grados día (°Cd) acumulados a diferenciación primordio floral en genotipos de sorgo dulce bajo seis localidades, 2009-2010.	26
Tabla 1-7. Medias, valores mínimos y máximos, desviación estándar para grados día (°Cd) acumulados a floración en genotipos de sorgo dulce bajo seis localidades, 2009-2010.	28
Tabla 1-8. Medias, valores mínimos y máximos, desviación estándar para grados día (°Cd) acumulados a madurez fisiológica en genotipos de sorgo dulce bajo seis localidades, 2009-2010.	30
Tabla 1-9. Medias, valores mínimos y máximos, desviación estándar para altura de planta (cm) en genotipos de sorgo dulce bajo seis localidades, 2009-2010.	32
Tabla 1-10. Medias, valores mínimos y máximos, desviación estándar para el diámetro basal (mm) en genotipos de sorgo dulce bajo seis localidades, 2009-2010.	35
Tabla 1-11. Medias, valores mínimos y máximos, desviación estándar para el diámetro 5 ^{to} (mm) en genotipos de sorgo dulce bajo seis localidades, 2009-2010.	36

	Pág.
Tabla 1-12. Medias, valores mínimos y máximos, desviación estándar para producción de biomasa en tallos ($t\ ha^{-1}$) en genotipos de sorgo dulce bajo seis localidades, 2009-2010.	38
Tabla 1-13. Medias, valores mínimos y máximos, desviación estándar para producción de biomasa en hojas ($t\ ha^{-1}$) en genotipos de sorgo dulce bajo seis localidades, 2009-2010.	40
Tabla 1-14. Medias, valores mínimos y máximos, desviación estándar para producción de biomasa en panículas ($t\ ha^{-1}$) en genotipos de sorgo dulce bajo seis localidades, 2009-2010	41
Tabla 1-15. Medias, valores mínimos y máximos, desviación estándar para valores Brix (grados) en genotipos de sorgo dulce bajo seis localidades, 2009-2010.	43
Tabla 1-16. Medias, valores mínimos y máximos, desviación estándar para contenidos de azúcares en el tallo (g) de genotipos de sorgo dulce bajo seis localidades, 2009-2010.	45
Tabla 1-17. Medias, valores mínimos y máximos, desviación estándar para el volumen de jugo en el tallo (g) de genotipos de sorgo dulce bajo seis localidades, 2009-2010.	47
Tabla 1-18. Medias, valores mínimos y máximos para el porcentaje de humedad en el tallo (Hum), materia seca (Mseca), fibra (Pfibra), Brix, sacarosa (Saca), glucosa (Gluc) y fructosa (Fruct) en genotipos de sorgo dulce en Palmira, 2009.	48
Tabla 1-19. Modelo de regresión explicativo de la concentración de azúcares (Brix) en el jugo del tallo de genotipos de sorgo dulce, construido a partir de variables ambientales (clima y suelo).	53
Tabla 1-20. Modelo de regresión explicativo del contenido de azúcares en el tallo de genotipos de sorgo dulce, construido a partir de variables ambientales (clima y suelo).	55
Tabla 1-21. Modelo de regresión explicativo de la producción de biomasa en el tallo de genotipos de sorgo dulce, construido a partir de variables ambientales (clima y suelo).	56
Tabla 2-1. Localización geográfica y fechas de siembra ensayos de crecimiento de genotipos de sorgo dulce en dos localidades, 2010.	81
Tabla 2-2. Origen geográfico, grupo racial, altura de planta, grados día (TT) a floración, producción de materia seca (Pseco) y grado Brix de variedades de sorgo de la colección de trabajo de Corpoica.	82
Tabla 2-3. Componentes de los parámetros de crecimiento determinados en genotipos de sorgo dulce, 2010.	84
Tabla 2-4. Modelos de regresión no lineales utilizados para el ajuste de los datos de materia seca y área foliar. 2010.	87

	Pág.
Tabla 2-5. Datos promedios de temperatura máxima (Tmax), temperatura mínima (Tmin), grados día (TT), radiación solar (Rad), radiación solar acumulada (Rads), humedad relativa (HR), y acumulados de precipitación (PRETO) y evapotranspiración de referencia (ETo) por	88
Tabla 2-6. Características físico-químicas de los suelos en dos ambientes localidades, 2010.	91
Tabla 2-7. Coeficientes estimados de los modelos ajustados a los datos de peso seco total en tres genotipos de sorgo dulce, y el criterio de información Akaike (AIC). Palmira, 2010.	93
Tabla 2-8. Coeficientes estimados de los modelos ajustados a los datos de peso seco total en tres genotipos de sorgo dulce, y el criterio de información Akaike (AIC). Villavicencio, 2010.	94
Tabla 2-9. Coeficientes estimados de los modelos ajustados a los datos de área foliar (cm ²) en tres genotipos de sorgo dulce, y el criterio de información Akaike (AIC). Palmira, 2010.	101
Tabla 2-10. Coeficientes estimados de los modelos ajustados a los datos de área foliar (cm ²) en tres genotipos de sorgo dulce, y el criterio de información Akaike (AIC). Villavicencio, 2010.	102
Tabla 2-11. Uso eficiente de radiación (RUE en tres genotipos de sorgo dulce en dos ambientes, 2010.	115

Introducción

La producción mundial de biocombustibles de primera generación presentó un incremento exponencial en la última década. El bioetanol es obtenido a partir de la fermentación de los azúcares producto del proceso fotosintético de la caña de azúcar, sorgo dulce, remolacha azucarera y de los almidones presentes en el grano de maíz, sorgo y trigo. El di-éster procedente de los aceites extraídos del fruto de palma de aceite, canola y soya contribuye con la mayor producción de biodiesel en el mundo (Calvino y Messing, 2011). En el año 2009 la producción de bioetanol fue de 73 billones de litros por año, superando en más del 400% lo registrado en el año 2000 (IEA, 2011). Los biocombustibles aportaron el 3% a la demanda mundial de combustibles del sector transportador en el año 2010 y se espera que para el año 2050 superen el 9%. El incremento de ésta demanda es consecuencia de la reducción en la producción de petróleo en países productores políticamente inestables, las metas de reducción en la utilización de combustibles fósiles de los países firmantes del protocolo de Kyoto y la necesidad de generar nuevos mercados para el sector agropecuario (European Parliament, 2003).

Colombia cuenta con cinco plantas de producción de bioetanol, a partir de la biomasa de caña de azúcar, con una capacidad de 1.250.000 litros por día, equivalentes a 85 millones de galones al año, suficiente para soportar la demanda del país en una mezcla de entre el 8% y 10% de etanol en la gasolina. Hoy, se encuentran en expansión varias de las destilerías en funcionamiento que elevarán la oferta actual a 1.880.000 litros por día en el 2013 y a 2.280.000 litros por día a partir del 2014, año en el cual se espera que la mezcla aumente al 15% (Proexport, 2011). La posibilidad de expansión de la producción de biocombustibles a otras regiones del país está ligada a la oferta de especies cultivadas con las cualidades requeridas para producción de etanol y adaptación a las condiciones climáticas de la región.

El sorgo (*Sorghum bicolor* (L.) Moench) es el segundo cereal más cultivado en el África sub-Sahariana y el primero en el Sahel semiárido (FAOSTAT, 2011). Se cultiva principalmente por su grano y la biomasa remanente (después de cosechado el grano) se utiliza como forraje, o en la construcción de techos y cercas (Dogget, 1988).

El sorgo dulce pertenece a la especie de sorgo cultivada (*Sorghum bicolor* ssp *bicolor* (L.) Moench) que tiene la capacidad de almacenar grandes cantidades de azúcares en el tallo después de la floración. La mayor diversidad genética del sorgo se encuentra en la parte oriental de África (Dogget 1988; Deu *et al.*, 2008). Las primeras variedades tradicionales de sorgo dulce fueron introducidas a Estados Unidos entre los siglos XVII y XVIII, por esclavos africanos. Nuevas introducciones de sorgo dulce fueron realizadas durante la inmigración europea y a partir de colectas realizadas en el África a mediados del siglo XIX (Martin, 1970). Las primeras variedades de sorgo dulce mejoradas en Estados Unidos fueron seleccionadas por su producción de jarabe, concentración de azúcares y alta producción de biomasa en programas estatales a inicios del siglo XX (Swanson y Laude, 1934).

El sorgo dulce es considerado como una biomasa energética importante para la producción de alcohol carburante, debido a su alta capacidad de producción de biomasa, acumulación de azúcares, tolerancia a la sequía, menor requerimientos nutricionales y amplia capacidad de adaptación (Stedutto *et al.*, 1997; Mastrolli *et al.*, 1999). De Vries *et al.* (2010) encontró al sorgo dulce como la mejor opción para producir biocombustibles de primera generación de una forma ambientalmente sostenible entre varias especies cultivadas.

El valor económico del sorgo dulce se encuentra en el tallo y no en el grano (Miller y Creelman, 1980). La planta presenta tallos altos, jugosos y gran contenido de azúcares en el parénquima, los cuales son fermentados para producción de etanol (Vietor y Miller, 1990; House *et al.*, 2000; Wani *et al.*, 2012). Comparado con la caña de azúcar y el maíz, los sorgos dulces aportan en forma simultánea tres productos de alto valor, grano, azúcar y forraje (Reddy *et al.*, 2005; Gnansounou *et al.*, 2005; Vries *et al.*, 2010).

En el tallo del sorgo dulce se encuentran diluidos en el jugo azúcares solubles (13% al 20% en promedio; 75% sacarosa y 25% glucosa + fructosa) y carbohidratos insolubles

(12.4% de celulosa y 10.2% hemicelulosa) (Jasberg *et al.*, 1983; Billa *et al.*, 1997; Li, 1997; Woods, 2001; Kawahigashi *et al.*, 2013). Jackson *et al.* (1980) reportaron producciones de azúcares totales de 13.2 t ha⁻¹ y 7682 l ha⁻¹ de etanol en variedades desarrolladas en condiciones ambientales favorables.

Las características fenotípicas importantes para producción de biocombustibles a partir de sorgo dulce, son altura de la planta, diámetro del tallo, biomasa del tallo, contenido de azúcar y producción de jugo en el tallo (Almodares *et al.*, 2006; Almodares *et al.*, 2008). Estas características son de herencia cuantitativa y poligénica altamente afectadas por el ambiente (Zou *et al.*, 2011). Varios estudios han reportado una alta correlación positiva entre la producción de tallos con la altura de planta, el diámetro del tallo y el rendimiento de jugo en el tallo (Makanda *et al.*, 2009; Audilakshmi *et al.*, 2010). También se han reportado fuertes asociaciones entre el rendimiento de azúcares, con valores Brix y contenido de azúcares en el tallo (Murray *et al.*, 2008; Pfeiffer *et al.*, 2010).

Trabajos de mejoramiento previos, sugirieron la existencia de gran variabilidad en el contenido de azúcar y rendimiento de jugo en el germoplasma de sorgo dulce (Ali *et al.*, 2008; Murray *et al.*, 2009; Makanda *et al.*, 2009). Correlaciones positivas fueron reportadas entre la altura de la planta y biomasa de tallo, entre altura de planta con días a madurez (Miller y McBee, 1993) y rendimiento de azúcar con jugos en el tallo (Murray *et al.*, 2008).

En el cultivo de sorgo dulce la dinámica y controles fisiológicos de la acumulación de azúcares en el tallo aún no se conocen (Gutjahr *et al.*, 2013). Algunos autores han sugerido que la acumulación de azúcares ocurre después de la floración (McBee y Miller, 1982; Prasad *et al.*, 2007; Almodares *et al.*, 2008), mientras que otros controvierten esta afirmación (Lingle, 1987; Hoffman-Thoma *et al.*, 1996). El comprender la distribución de carbohidratos en los diferentes compartimientos en las variedades de sorgo es importante debido al intercambio que ocurre entre la producción de grano, azúcares y biomasa, lo que probablemente conducirá a métodos de selección específica para variedades de alta acumulación de azúcares (Gutjahr *et al.*, 2013).

La acumulación de azúcares en el sorgo es en realidad un proceso complejo. Los rendimientos de azúcares pueden variar de un genotipo a otro y de un año a otro (Chapman *et al.*, 2000). La heredabilidad (Murray *et al.*, 2009) y los marcadores

bioquímicos no son fáciles de caracterizar y la interacción genotipo (G) x ambiente (A) en el sorgo es alta (DeLacy et al., 2010; Rao et al., 2011; Makanda et al., 2012).

En Colombia se introdujo en el año 1996 la primera población de sorgo dulce forrajero, procedente del programa de mejoramiento de sorgo del Instituto Internacional de Cultivos para el Trópico Semiárido - ICRISAT. Después de varios ciclos de selección recurrente recíproca con variedades de sorgo granífero adaptadas a las condiciones de suelos ácidos de los Llanos Orientales, fueron seleccionadas líneas de sorgo dulce por su potencial de producción de forraje y tallo dulce (Bernal et al., 2009). Los estudios realizados con estas líneas en las regiones de Córdoba, Llanos Orientales, Tolima y Valle del Cauca, indicaron la presencia de una alta variación en la producción de forraje total, peso de tallos, altura de planta, rendimiento de jugo y azúcares totales entre los genotipos y entre los diferentes ambientes.

Los contenidos de azúcares en el tallo de sorgo dulce y la producción de azúcares por unidad de superficie son afectados por factores genéticos, ambientales y de manejo del cultivo (McBee y Miller, 1982). Estudios realizados por Anglani (1998) reportaron que la sacarosa, glucosa y fructosa eran los principales azúcares encontrados en el jugo extraído del tallo de sorgo dulce en una proporción de 75% para sacarosa y 25% para glucosa más fructosa. Estos porcentajes presentaron variaciones dependiendo del genotipo y las condiciones ambientales presentes durante el ciclo de crecimiento del cultivo (Anglani, 1998).

Se han realizado diferentes estudios para comprender el patrón de la interacción de la acumulación de azúcar y sus componentes entre genotipos de sorgo dulce con el ambiente (Rao et al., 2011; Zou et al., 2011; Makanda et al., 2012; Rakshitel et al., 2013; Olweny et al., 2013; Elangovan et al., 2013). Los resultados confirmaron la presencia de una interacción significativa GA como consecuencia de la respuesta diferencial de los genotipos a los cambios ambientales. En todos los casos, la variación debida al ambiente fue la de mayor aporte al total de la variación observada en los contenidos de azúcares.

Lo expuesto permite plantear la siguiente hipótesis. Las variaciones en las condiciones climáticas durante la fase de desarrollo reproductivo y llenado de grano del cultivo de sorgo dulce, son responsables de los cambios en los contenidos de azúcares en genotipos de sorgo dulce en el trópico ecuatorial.

Para responder a ésta hipótesis, se plantearon los siguientes objetivos.

General

Estudiar el efecto de las variables ambientales sobre el crecimiento, desarrollo y acumulación de azúcares en genotipos de sorgo dulce con características morfo-agronómicas diferentes.

Específicos

- Estudiar el efecto de la interacción genotipo ambiente en la acumulación de azúcares en el tallo de sorgo dulce y sus componentes.
- Determinar el efecto de las variables ambientales sobre la acumulación de azúcares en el tallo.
- Analizar la dinámica del crecimiento del cultivo, rendimiento de biomasa y producción de azúcares de tres genotipos de sorgo dulce en dos condiciones ambientales.

1. Capítulo 1

Efecto de la interacción genotipo ambiente en la acumulación de azúcares en el tallo de sorgo dulce y sus componentes.

1.1 Introducción

Entre varias especies cultivadas, el sorgo dulce, es una gramínea C₄ con una alta eficiencia en el uso de agua y de la radiación (Curt *et al.*, 1998), rendimientos altos de biomasa y azúcar (Mamma *et al.*, 1995; Gnansounou, *et al.*, 2005), bajos requerimientos de agua y nitrógeno (Evans y Cohen, 2009), amplia variabilidad, y tolerancia a sequía y salinidad (Yu *et al.*, 2008). Presenta altos contenidos de azúcares solubles (Antonopoulou *et al.*, 2008), celulosa y hemicelulosa en el tallo (Rattunde *et al.*, 2001; Gnansounou, *et al.*, 2005; Antonopoulou *et al.*, 2008; Zhao *et al.*, 2009). De Vries *et al.* (2010) encontraron que el sorgo dulce [*Sorghum bicolor* (L.) Moench] era una opción viable para la producción ambientalmente sostenible de biocombustibles de primera generación.

El mejoramiento genético en el cultivo de sorgo dulce, se ha enfocado en el desarrollo de nuevos genotipos con rendimientos altos de azúcares para apoyar la industria de biocombustibles. El rendimiento de azúcar es una característica cuantitativa, la cual es el resultado de varias características que contribuyen en su conjunto durante el crecimiento del cultivo (Subramanian, 2013). Diferentes estudios han reportado una alta correlación positiva entre la producción de tallos con la altura de planta, el diámetro del tallo y el rendimiento de jugo en el tallo (Makanda *et al.*, 2009; Audilakshmi *et al.*, 2010). Igualmente se han reportado fuertes asociaciones entre el rendimiento de azúcares, con valores Brix y contenido de azúcares en el tallo (Murray *et al.*, 2008; Pfeiffer *et al.*, 2010).

Por lo tanto para la selección de genotipos de sorgo con altos rendimientos de azúcares se deberán considerar características como producción de tallos, altura de planta, diámetro del tallo, Brix y rendimiento de jugo en el tallo (Makanda *et al.*, 2009; Murray *et al.*, 2009; Audilakshmi *et al.*, 2010; Pfeiffer *et al.*, 2010).

De acuerdo con Pandey y Vargas (1985) generalmente, los programas de mejoramiento intentan desarrollar cultivares estables en su rendimiento y otros atributos deseables a través de un amplio rango de condiciones ambientales. Cuando un carácter es controlado por pocos genes (herencia cualitativa o Mendeliana), la interacción genotipo-ambiente (GA) no es una fuente importante de varianza. Mientras que cuando un carácter está gobernado por varios loci con pequeños efectos mostrando varianzas aditivas, dominantes y epistáticas (herencia cuantitativa), la interacción GA adquiere mayor importancia; se sabe que varios tipos de efectos de los genes interactúan con el ambiente para afectar la expresión de su fenotipo.

En el sorgo dulce el contenido de azúcar y los rendimientos de tallo y jugo son características cuantitativas de herencia poligénica altamente afectadas por el ambiente (Zou *et al.*, 2011; Makanda *et al.*, 2012; Elangovan, 2013). Existe una gran variación en el contenido de azúcares en el tallo entre las variedades de sorgo, por ejemplo, el Brix en el jugo extraído del tallo de 200 cultivares fluctuó entre 8.0% y 19.1% (Zhao *et al.*, 2008). Esta variación es aún más compleja por el hecho que todos los genotipos no responden a los cambios ambientales de una manera similar y los ambientes no son exactamente iguales (Elangovan *et al.*, 2013). Por ello, establecer la contribución del ambiente y el genotipo en la variación de las características asociadas al rendimiento de tallo y la concentración de azúcares solubles, es importante para identificar cultivares de sorgo dulce con mejor expresión para una región objetivo (Makanda *et al.*, 2012; Elangovan *et al.*, 2013).

El comprender la relación entre el comportamiento del cultivo y el ambiente ha sido el tema por excelencia de consideración entre fitomejoradores y genetistas. La expresión fenotípica de cualquier cultivar es el resultado del efecto combinado del genotipo (G), el ambiente (A) y la interacción genotipo-ambiente (GA). El G se refiere a la constitución genética de los individuos, el ambiente (A) puede definirse como la suma total de circunstancias que rodean o afectan a un organismo o conjunto de organismos y la

interacción GA como la respuesta diferencial de G a cambios de A (Yan y Kang, 2002). La interacción GA se refiere a la variación que no puede ser explicada por los efectos principales del genotipo (G) o del ambiente (A) (Yan y Kang, 2002).

La interacción GA surge cuando una variación ambiental tiene un efecto diferencial sobre genotipos diferentes; es decir, la interacción resulta de la respuesta diferencial de los genotipos a la variación ambiental o, a la inversa, cuando un genotipo que presenta una respuesta diferencial responde de distinta manera a las variaciones del ambiente (Crossa *et al.* 1988; Yan y Kang, 2002). La interacción GA es un aspecto a tener en cuenta en los programas de mejoramiento ya que la estabilidad de rendimiento de un genotipo en particular depende de su respuesta a diversos factores adversos en etapas críticas del desarrollo de la planta (Crossa *et al.* 1988; Márquez, 1991). La interacción GA es el factor que más interfiere en la identificación de genotipos específicos para ambientes específicos (Snedecor y Cochran, 1980).

El modelo de Efectos Principales Aditivos y Multiplicativos de la Interacción (AMMI) es adecuado para el análisis de ensayos multi-ambientales, ya que captura una gran proporción de la suma de cuadrados de la interacción GA, separando en forma precisa los efectos principales de aquellos correspondientes a la interacción (Gauch, 1992). El modelo integra el análisis de varianza y el Análisis de Componentes Principales (ACP).

Varios trabajos de investigación se han realizado para definir el patrón de interacción de la acumulación de azúcar y sus componentes entre genotipos de sorgo dulce con el ambiente (Rao *et al.*, 2011; Zou *et al.*, 2011; Makanda *et al.*, 2012; Rakshit *et al.*, 2012; Olweny *et al.*, 2013; Elangovan *et al.*, 2013). Los resultados confirmaron la presencia de una significativa interacción GA como consecuencia de la respuesta diferencial de los genotipos a cambios ambientales. En todos los casos, la variación debida al ambiente fue la de mayor aporte al total de variación observada en los contenidos de azúcares.

El rendimiento de azúcar y la concentración de azúcares en el tallo de sorgo dulce fueron afectados por la interacción genotipo (G) x ambiente (A) (Rao *et al.*, 2011; Makanda *et al.*, 2012) y la concentración de azúcares en el tallo, medido con refractómetro a partir de

los jugos extraídos (Brix), presentó una heredabilidad baja a moderada con genes que presentaron efectos aditivos y no aditivos (Murray *et al.*, 2009).

Elangovan *et al.* (2013), reportaron en 39 líneas mejoradas de sorgo dulce la presencia de una interacción significativa GA para Brix, peso de tallo, peso de 100 granos y contenido de sacarosa en el tallo. Las constantes genéticas para estas características reportaron que la magnitud del coeficiente de variación fenotípica era superior que el coeficiente de variación genotípica indicando que el ambiente estaba regulando su expresión.

El concepto de ambiente ha sido discutido en forma amplia por gran número de investigadores. Allard (1960), lo expresa como la suma de todas las condiciones externas que afectan el crecimiento y desarrollo de un organismo. Para Lin y Binns (1986), el efecto ambiental sobre un genotipo depende del suelo y de las condiciones climáticas. Para estos investigadores el suelo permanece casi constante de año en año y puede ser, a pesar de todo, considerado como un efecto fijo. El clima es más complejo, porque tiene una parte persistente representada por la zona climática general y una parte no predecible representada por la variación del clima, entre años.

La temperatura óptima para el crecimiento y desarrollo de la planta de sorgo se encuentra entre 32°C a 34°C, temperaturas por debajo de 11°C y por encima de 42°C detienen su crecimiento (Alagarswamy *et al.*, 1986; Hammer *et al.*, 1993; Lafarge y Tardieu, 2002; Gutjhar *et al.*, 2013; Rao *et al.*, 2013).

Makanda *et al.* (2012) reportaron reducciones en valores Brix y rendimientos de tallos en 80 híbridos de sorgo dulce en ambientes con temperaturas máximas entre 30°C a 45°C (Makanda *et al.*, 2012). En el cultivo de caña de azúcar se encontró una marcada influencia de la temperatura sobre los contenidos de sacarosa en el jugo y el peso del tallo (Sun y Show, 1949; Yates, 1983; Bonnet *et al.*, 2006; Uehara *et al.*, 2009). Sun y Chow (1949) reportaron reducciones en la elongación del tallo como consecuencia de bajas temperaturas en la noche. Bajas temperaturas en el día y en la noche promovieron la concentración de sacarosa en el tallo, y redujeron la longitud y peso fresco del tallo (Uehara *et al.*, 2009). Bonnet *et al.* (2006) sugirieron que la caña de azúcar asignaba menos carbono al almacenamiento de sacarosa en el tallo cuando crecía en condiciones de alta temperaturas, comparado con el crecimiento en bajas temperaturas.

Diferentes estudios han reportado efectos negativos del estrés hídrico por excesos o déficits, durante la fases de crecimiento vegetativo y estado temprano reproductivo, sobre el crecimiento (altura de la planta y área foliar) y producción de biomasa en genotipos de sorgo (Younis et al., 2000; Xie et al., 2010; Promkhambut et al., 2011).

Aunque el sorgo puede crecer y desarrollarse con un suministro de agua de 300 mm durante su ciclo de cultivo, las mayores producciones de forraje verde, 50 a 100 t ha⁻¹, han sido reportadas en ambientes con un suministro de agua (lluvia más riego) entre 500 a 1000 mm (Rao *et al.*, 2013). La presencia de sequía antes del inicio de formación de la panícula detiene el crecimiento de la planta hasta que retornen las condiciones favorables de humedad en el suelo; la presencia de sequía durante la fase reproductiva reduce el desarrollo foliar de la planta y su capacidad de interceptación de radiación solar (Younis et al., 2000; Xie et al., 2010; Promkhambut et al., 2011; Rao *et al.*, 2013).

Este estudio planteó como objetivo, estudiar la interacción genotipo por ambiente e identificar las variables ambientales que afectan la acumulación de azúcares y producción de biomasa de tallos en genotipos de sorgo dulce bajo diferentes localidades en Colombia.

1.2 Materiales y Métodos

1.2.1 Zona de estudio

Los ensayos experimentales multi-ambientales (EMA) de genotipos de sorgo dulce, se llevaron a cabo entre 2009 y 2010, en cuatro subregiones naturales de Colombia, Caribe seco (Codazzi - CODA) y húmedo (Cereté - CERE); Valle del Magdalena (Espinal - ESPI), Valle del Cauca (Palmira - PALM), Llanos orientales, piedemonte (Villavicencio – VCIO) y altillanura plana Puerto Gaitán - GAIT). En la Tabla 1-1, se detallan la ubicación geográfica, la altura en msnm y las fechas de siembra y cosecha de los experimentos.

Las épocas de siembra coincidieron con el final de la primavera e inicio del verano en el hemisferio Norte por lo que los genotipos de sorgo dulce crecieron en condiciones de

mayor cantidad de horas luz/día, especialmente durante la fase vegetativa, en las localidades de Cereté (12.6), Codazzi (12.7), Espinal (12.3), Palmira (12.3), Gaitán (12.3) y Villavicencio (12.2).

Registros diarios de precipitación (mm), temperaturas (mínimas, medias y máximas), viento (m s^{-1}), humedad relativa (%), radiación solar ($\text{MJ m}^{-2} \text{ día}^{-1}$), fueron adquiridos de las estaciones meteorológicas más cercanas a las áreas experimentales. La información climática fue suministrada por el IDEAM. La evapotranspiración de referencia (ET_o, mm día⁻¹) se estimó con el programa ETo calculator (FAO, www.fao.org/nr/water/eto.html) con base en datos de temperatura mínima y máxima, viento, humedad relativa y radiación solar.

Tabla 1-1. Localización geográfica y fechas de siembra de los ensayos experimentales multiambientales (EMA), 2009-2010.

Código	Localidad	Latitud	Longitud	Altitud (msnm)	Fecha siembra	Fecha Cosecha
CODA	Codazzi	10°0.8' N	73°15.6' W	105	23-May-09	18-Sep-09
CERE	Cereté	8°50.98' N	75°48.89' W	15	26-May-10	10-Sep-10
ESPI	Espinal	4°11.5" N	74°57.59' W	374	23-Apr-09	12-Aug-09
PALM	Palmira	3°30' N	76°21' W	965	31-May-09	15-Sep-09
GAIT	Gaitán	4° 37' N	71° 19' W	175	20-May-09	14-Sep-09
VCIO	Villavicencio	4°3.6' N	73°27.1' W	336	18-Apr-09	5-Aug-09

La información climática fue procesada para generar datos promedios de las temperaturas (máxima y mínima), amplitud térmica (diferencia entre temperatura máxima y mínima), radiación solar y humedad relativa, y datos acumulados de precipitación, evapotranspiración de referencia, radiación solar, número de días con lluvia y número de días secos para cada estado de crecimiento de los genotipos de sorgo en los diferentes ambientes. También, se elaboraron gráficas con datos diarios desde siembra hasta cosecha de los genotipos en las variables temperatura (máxima y mínima), radiación solar, precipitación, evapotranspiración de referencia, y humedad relativa.

Antes de la siembra de los ensayos, en cada una de las localidades de las cuatro subregiones naturales, se tomaron muestras de suelo para su análisis físico-químico. Las muestras fueron extraídas a una profundidad de 0-20 cm, se homogenizaron y se enviaron al laboratorio de suelos del C.I. Tibaitata, en donde se realizó el análisis químico (elementos mayores y menores) y textura por Boyoucos.

1.2.2 Material genético

Diez genotipos de sorgo dulce [*Sorghum bicolor* (L.) Moench] fueron seleccionados con base en la información disponible de bases de datos en Corpoica por su lugar de origen, y contraste en fenología (duración fase reproductiva), altura de planta, producción de forraje y Brix (sólidos solubles). Los genotipos seleccionados son variedades mejoradas de polinización abierta (Tabla 1-2). Los genotipos ICSR91005 e ICSV95126 son líneas restauradoras seleccionadas por sus altas producciones de azúcares en la India (Reddy et al., 2007).

Tabla 1-2. Origen geográfico, características agronómicas, producción de forraje y Brix de 10 genotipos de sorgo seleccionados de la colección de trabajo de Corpoica.

Código	Genotipo	Origen Geográfico	Programa mejoramiento	Altura ^{1/} (cm)	Floración (días)	Forraje t ha ⁻¹	° Brix
BF95	BF95-11/135	Burkina Faso	CIRAD	317	70	60,0	13,4
C328	CEM328/3-3-1-1	Mali	CIRAD-Icrisat	250	71	51,2	14,1
HT3	LASPHT-3	Colombia	Corpoica-Icrisat	345	74	54,1	13,9
HT46	LASPHT-46	Colombia	Corpoica-Icrisat	318	84	72,7	14,6
HT5	LASPHT-5	Colombia	Corpoica-Icrisat	321	72	55,7	13,4
HT7	LASPHT-7	Colombia	Corpoica-Icrisat	361	83	54,8	14,4
IC38	ICSB38	India	ICRISAT	142	70	25,1	11,3
IC91	ICSR91005	India	ICRISAT	261	75	49,1	13,5
ICV9	ICSV95126	India	ICRISAT	188	69	27,4	10,5
JJT18	JJT18	Colombia	Corpoica-Icrisat	325	75	47,1	14,2

^{1/}Fuente Bernal *et al.* (2009).

1.2.3 Manejo agronómico

La preparación del suelo en todos los experimentos consistió en un pase de rastra, uno de pulidor, para dejar el suelo acondicionado y garantizar una buena emergencia de las plantas. Siguiendo el procedimiento recomendado por CORPOICA, se realizó la siembra inicial a chorrillo a razón de un gramo por metro lineal (5 g por surco de 5 m): Una vez establecidas las unidades experimentales, se procedió a entresacar plantas, dejando 10 plantas por metro lineal. La fertilización fue realizada teniendo en cuenta los aportes del suelo y los requerimientos del cultivo. El control de malezas consistió en la aplicación en pre-emergencia de atrazina y glifosato a razón de 1,50 y 1,84 kg i.a. ha⁻¹, respectivamente. No se realizó control químico de plagas durante el desarrollo del cultivo, pero si se realizaron liberaciones de biológicos como *Trichogramma exiguon*, y *Metagonistylum minense* para el control del gusano barrenador del tallo (*Diatraea spp.*).

1.2.4 Variables registradas

- **Fases fenológicas.** Se determinó el número de días y grados día acumulados para cada una de los estados de crecimiento de los genotipos de sorgo en las seis localidades. El ciclo de desarrollo del cultivo fue separado en tres fases fenológicas propuestas por Eastin (1971), fase vegetativa (GS1, desde siembra a inicio de formación de la panícula), fase reproductiva (GS2, inicio de la formación panícula a antesis), y fase de llenado de grano (GS3, antesis a madurez fisiológica, aparición de capa negra en el punto de unión de la semilla en la flor). Para determinar el inicio de la formación de la panícula (inicio de estructuras primordiales en el meristemo apical del tallo) fueron muestreadas cada tercer día dos plantas por cada genotipo y localidad, a partir del día 25 después de la siembra.
- **Grados día (GD).** Se calculó como la acumulación de grados día desde la siembra hasta la terminación de cada una de las fases de desarrollo registradas en los genotipos de sorgo. Para la determinación se utilizó el método del seno sencillo de corte vertical citado por Rolch (1999) el cual permite una mejor estimación de GD, cuando la temperatura fluctúa por encima o por debajo del umbral de temperatura requerido por el cultivo. Para el cálculo se consideraron 4 temperaturas cardinales para el cultivo de

sorgo 11°C, óptima entre 30°C a 34°C y máxima de 42°C (Alagarswamy *et al.*, 1986; Hammer *et al.*, 1993; Lafarge y Tardieu, 2002; Gutjhar *et al.*, 2013).

- **Altura de planta.** Se midió desde la base del tallo principal hasta el extremo superior de la panoja, se tomaron cinco plantas por parcela 10 días antes de la cosecha.
- **Diámetro medio del tallo principal.** Se registró sobre los mismos tallos tomados para altura. Se tomaron cinco plantas por parcela 10 días antes de la cosecha, a las cuales se les midió el diámetro del entrenudo basal del tallo y el diámetro del quinto entrenudo a partir de la base del tallo principal con un calibrador pie de rey digital Mitutoyo.
- **Producción de biomasa.** El peso fresco y seco de las hojas (lamina foliar), los tallos con vainas y las panojas fueron determinados con base en las plantas colectadas en dos surcos centrales (80 a 100 plantas) durante la fase de madurez fisiológica. El peso seco fue determinado a partir de una submuestra después de secado por 72 horas en horno a 70°C.

Determinación de azúcares. Las determinaciones de Brix del jugo extraído de 5 tallos con un molino de tres cilindros fueron realizadas con un refractómetro digital (Atago PAL-1, U.S.A., Inc.). Antes de pasar los tallos por el molino fueron pesados, y se determinó el peso y el volumen del jugo colectado. El bagazo de los cinco tallos fue colectado y llevado a secado por 72 horas a 70°C. Muestras de jugo de 1 mL de seis genotipos de sorgo cosechados en la localidad de Palmira fueron almacenadas a -20°C, para su posterior análisis. La cuantificación y composición de azúcares en el jugo fue realizada con la técnica de Cromatografía líquida de alta resolución (HPLC, Ion Chromatography system DX 600, Dionex, Sunnyvale, CA, USA) en el Laboratorio de Química del Centro de Investigación CENICAÑA. Además, se estimó el contenido (g planta⁻¹) de azúcares en el tallo (ver Ecuación 1.1) con la fórmula propuesta por Gutjahr *et al.* (2013).

$$\text{Contenido azúcar (g)} = \text{Brix} \times 8,827 \times (\text{peso fresco tallo} - \text{peso seco tallo})/1000 \quad (1.1)$$

El valor 8,827 corresponde a la pendiente de regresión entre Brix y la concentración de azúcares en g L⁻¹ de jugo.

1.2.5 Diseño experimental

Los genotipos de sorgo dulce se distribuyeron en un diseño de bloques completos al azar y en cuatro repeticiones por localidad. Las unidades experimentales fueron conformadas por parcelas de seis surcos de 5 m de largo separados a 70 cm y distancia entre plantas de 10 cm, con una parcela útil de 4 surcos centrales (200 plantas aproximadamente).

1.2.6 Análisis estadístico

La información registrada fue codificada y archivada en MS Excel y procesada con el programa de estadística SAS ® (Statistical Analysis System, versión 9.0, 2009) y R (versión 2.15.1). Fueron evaluados los supuestos de normalidad y homogeneidad de varianzas con las pruebas de Shapiro – Wilk y Bartlett respectivamente.

- **Análisis interacción genotipo por ambiente.** Las variables agronómicas fueron inicialmente analizadas para estimar la varianza entre genotipos (G), ambientes (A) e interacción genotipo por ambiente (GA). Para el análisis comparativo de las variables agronómicas y de producción en las seis localidades de cada una de las subregiones se utilizó el modelo lineal que se muestra en la ecuación 2.1.

$$Y_{ijk} = \mu + G_i + A_j + R(A)_{k(j)} + GA_{(ij)} + e_{ijk} \quad (2.1)$$

Y_{ijk} = Respuesta (variable estudiada) del genotipo i , en el ambiente j .

μ = Media general;

G_i = Efecto del genotipo (considerado como fijo) i con $i = 1, \dots, g$.

A_j = Efecto aleatorio del ambiente j con $j = 1, \dots, t$.

$R(A)_{k(j)}$ = Efecto de repetición k dentro del ambiente j .

$GA_{(ij)}$ = Efecto aleatorio de la interacción del genotipo i con el ambiente j .

e_{ijk} = Término de error aleatorio asociado a la observación Y_{ijk} .

El efecto de la interacción entre el genotipo y el ambiente se evaluó con el modelo AMMI (Efectos Aditivos e Interacción Multiplicativa), se empleó el programa SAS y el algoritmo computacional creado por Vargas y Crossa (2000).

Para modelar la respuesta de los genotipos (G), los ambientes (A) y la interacción GA se empleó el modelo AMMI, descrito en la ecuación 3.1.

$$Y_{ge} = \mu + \alpha_g + \beta_e + \sum^N \lambda_n Y_{gn} \delta_{en} + \rho_{ge} \quad (3.1)$$

Y_{ge} = Rendimiento promedio de un genotipo g en el ambiente e.

μ = Media general.

α_g = Desviaciones de las medias de genotipos.

β_e = Desviaciones de las medias de ambientes.

N = Número de CP retenidos en el modelo.

λ_n = Valor singular para el CP.

Y_{gn} = Valores de los vectores de los genotipos para cada CP.

δ_{en} = Valores de los vectores de los ambientes para cada CP.

ρ_{ge} = Residual.

Con el modelo AMMI se realizaron los análisis de estabilidad fenotípica e identificación de ambientes más discriminatorios y representativos. El número de términos AMMI necesarios para una descripción adecuada de la interacción genotipo por ambiente, se evaluó con el método de Gollob (1968). En la Tabla 1-3 se observa la partición de la varianza de la interacción en sus componentes. El cuadrado medio de cada término se obtuvo a partir de los “*eigenvalues*” o valores propios, la suma de cuadrados de estos valores característicos se dividió por los grados de libertad, calculados según el procedimiento propuesto por Gollob (1968). $gl = g + a - 1 - 2n$ (g, número de genotipos; a, número de ambientes y n, número de ejes retenidos), como se describe en la tabla 3. Se calculó la partición de la varianza (cuadrado medio/error general estimado), cuya significación se determinó según la distribución de F.

En el biplot GA, cada genotipo fue representado por un punto o marcador, definido al graficar los coeficientes de cada uno en el CP1 (eje x) contra los respectivos coeficientes del CP2 (eje y). Los ambientes fueron presentados como vectores que se originaron en la coordenada (0,0) del biplot y se extendieron hasta el marcador correspondiente.

- **Análisis de componentes principales.** Se realizó el análisis de componentes principales con el fin de explorar las correlaciones entre las variables, eliminar las variables redundantes para reducir la multicolinealidad en el análisis de regresión lineal

múltiple, y analizar agrupaciones entre los genotipos con las variables morfo-agronómicas, y clasificar los ambientes. Se analizaron los componentes principales con valores propios superiores a 1 y se seleccionaron las variables edafoclimáticas con valores de preponderancia de $\pm 0,8$. Igualmente se realizó un análisis de conglomerados con el fin de agrupar los ambientes de acuerdo a su similitud mediante la distancia Euclidiana 2 (D2).

Tabla 1-3. Análisis completo de varianza a partir de medias, usando los procedimientos de Gollob (1968).

Fuente de variación	G.L. Gollob	Suma de cuadrados
Genotipos (G)	G-1	SC(G)
Ambientes (A)	A-1	SC(A)
Interacción (GxA)	(G-1)(A-1)	SC(GxA)
CP1	G+A-1-(2x1)	λ^2_1
CP2	G+A-1-(2x2)	λ^2_2
CPn	G+A-1-(2xn)	λ^2_n
Error medio	GA(n-1)	SC(error medio)
Total	GAr-1	SC (total)

GL grados de libertad, G. número de genotipos, A. número de ambientes, λ . valor singular (escalar) de la matriz de interacción GA, n=mínimo (g-1, a-1), CPn. efecto de la interacción del análisis de componentes principales.

- **Análisis regresión lineal múltiple.** Con el propósito de explicar la variabilidad de acumulación de azúcares (Brix y contenido de azúcares) y el rendimiento de tallos de los genotipos de sorgo en función de las variables climáticas y de suelo se realizó un análisis de regresión lineal múltiple implementado en el programa estadístico R. Para el análisis se utilizó un modelo descrito en la ecuación 4.1

$$Y_i = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \epsilon_i \tag{4.1}$$

Y_i = i -ésima observación,

X_1, X_2 = Variables regresoras,

β_1, β_2 = Parámetros que dan los pesos de cada variable regresora respectivamente también llamados coeficientes de regresión.

ϵ_i = Término de error aleatorio asociado al i -ésimo dato.

Asumiendo que el modelo es correcto, la función de regresión estimada puede ser utilizada para hacer inferencias y predicciones. Antes de ello, se evaluó la adecuación del modelo, es decir si cumplía los supuestos del modelo sobre los errores (normalidad, independencia y homogeneidad de varianza). Para determinar qué proporción de la variabilidad en Y era explicada por las regresoras introducidas en el modelo se utilizó el coeficiente de determinación (R^2).

1.3 Resultados

1.3.1 Caracterización ambiental zonas de estudio

- **Caracterización climática.** La clasificación de las regiones de estudio por zonas de vida bioclimáticas de acuerdo a las condiciones de temperatura media y precipitación total anual las ubicó en bosque muy seco tropical (bms-T, Palmira), bosque seco tropical (bs-T, Cereté, Codazzi, y Espinal) y bosque húmedo tropical (bh-T, Gaitán y Villavicencio).

Se encontraron diferencias entre las localidades en las variables climáticas registradas durante el ciclo de crecimiento de los genotipos. Los valores más altos en temperaturas máximas y mínimas fueron registrados en Codazzi con temperaturas máximas superiores a 35°C durante algunas etapas del periodo de crecimiento del cultivo. Las temperaturas mínimas fueron más altas en Cerete y Codazzi, mientras que en el Palmira se registraron los valores más bajos. Las regiones con registros de radiación diaria más altos (Codazzi, Espinal y Palmira) coincidieron con menores registros de precipitación total y humedad relativa y mayores valores de evapotranspiración de referencia (Tabla 1-4).

Las temperaturas máximas diarias presentaron las mayores fluctuaciones en todas las localidades, mientras que las mínimas fueron más estables (Figura 1-1). Un análisis detallado de las variaciones de temperaturas máximas y mínimas diarias permitió observar en Codazzi una alta variabilidad en la temperatura máxima diaria con rangos entre 28°C a 40°C. En esta localidad las temperaturas máximas fueron más altas durante la fase reproductiva (GS2) de los genotipos de sorgo dulce.

En Palmira se observó una mayor amplitud térmica (diferencia entre la temperatura máxima y mínima) durante GS2 y la fase de llenado (GS3) de los genotipos de sorgo dulce. En el Espinal las temperaturas mínimas fueron más bajas durante GS2 y GS3. Las localidades de Gaitán y Villavicencio presentaron similitudes en las fluctuaciones de temperatura y los rangos durante el ciclo de crecimiento de los cultivares.

Tabla 1-4. Datos promedios de temperatura máxima (Tmax), temperatura mínima (Tmin), radiación solar (Rad), Humedad Relativa (HR), precipitación total (PRETO) y evapotranspiración de referencia (ETo) por ciclo de cultivo en las seis localidades, 2009-2010.

Código	Localidad	Tmax	Tmin	Rad	HR	PRETO	ETo
		°C	°C	MJ m ⁻² día ⁻¹	%	mm	mm
CERE	Cereté	32,1	23,9	14,8	74	710	425
CODA	Codazzi	35,6	24,9	19,9	72	310	612
ESPI	Espinal	32,7	21,5	17,7	71	217	504
PALM	Palmira	31,7	19,5	17,8	73	121	455
GAIT	Gaitán	30,7	22,1	16,7	87	1525	413
VCIO	Villavicencio	30,1	21,8	15,8	87	1274	379

Diferencias en la radiación solar, principalmente durante GS2 y GS3, fueron encontradas entre las localidades del estudio (Figura 1-2). Los valores más altos de radiación diaria durante el estado reproductivo y llenado de grano se presentaron en Codazzi, Palmira y Espinal y los menores valores en Cereté y Villavicencio.

Se observaron diferencias en la cantidad y distribución de la precipitación en las seis localidades. En Codazzi, Espinal y Palmira la evapotranspiración superó a la precipitación, lo que generó un balance hídrico climático desfavorable para el crecimiento y desarrollo de los genotipos de sorgo (Figura 1-3).

Diferencias marcadas en la distribución de la precipitación entre los ambientes fueron observadas en los estados de crecimiento GS2 y GS3 de los genotipos de sorgo (Figura 1-3). Durante la fase de crecimiento reproductiva de los genotipos de sorgo dulce en Palmira no se presentaron lluvias por lo que fue necesario realizar tres riegos de 35 mm cada uno para mantener el crecimiento del cultivo.

En Espinal se realizaron dos riegos de 35 mm durante el estado de crecimiento GS2. En Gaitán y Villavicencio se presentaron condiciones de excesos de precipitación durante las tres fases de crecimiento con precipitaciones totales de 1525 mm y 1274 mm, respectivamente. En Cereté la precipitación presentó una mejor distribución durante el ciclo de crecimiento de los genotipos de sorgo y un balance hídrico favorable (Figura 1-3). En Codazzi se observó la presencia de un mayor número de días secos durante las fases de crecimiento GS1, GS2 y GS3, seguida por precipitaciones superiores a 20 mm.

Figura 1-1. Variaciones en temperaturas máximas y mínimas durante el ciclo de crecimiento de los genotipos de sorgo dulce en las zonas de estudio, 2009-2010.

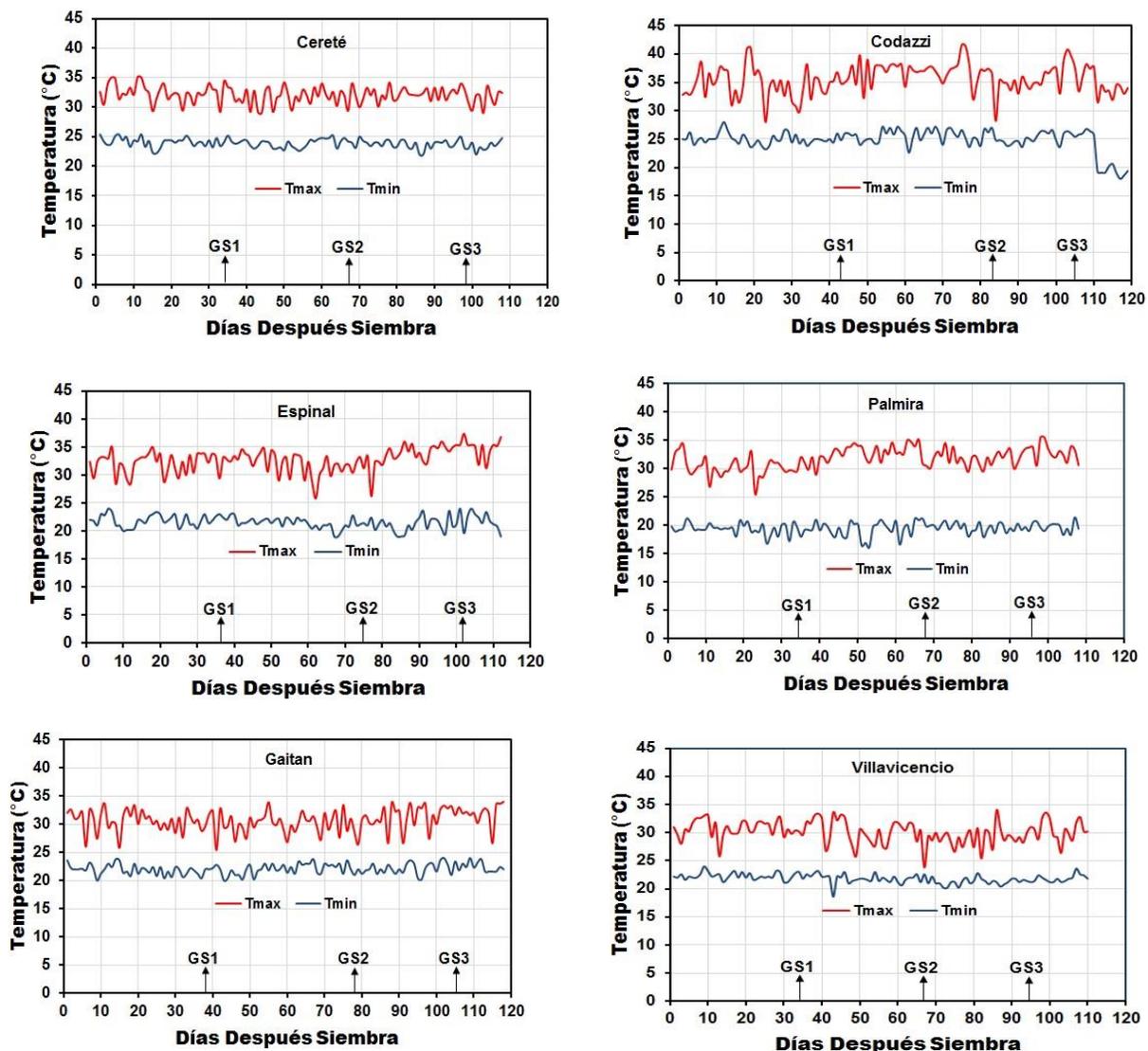
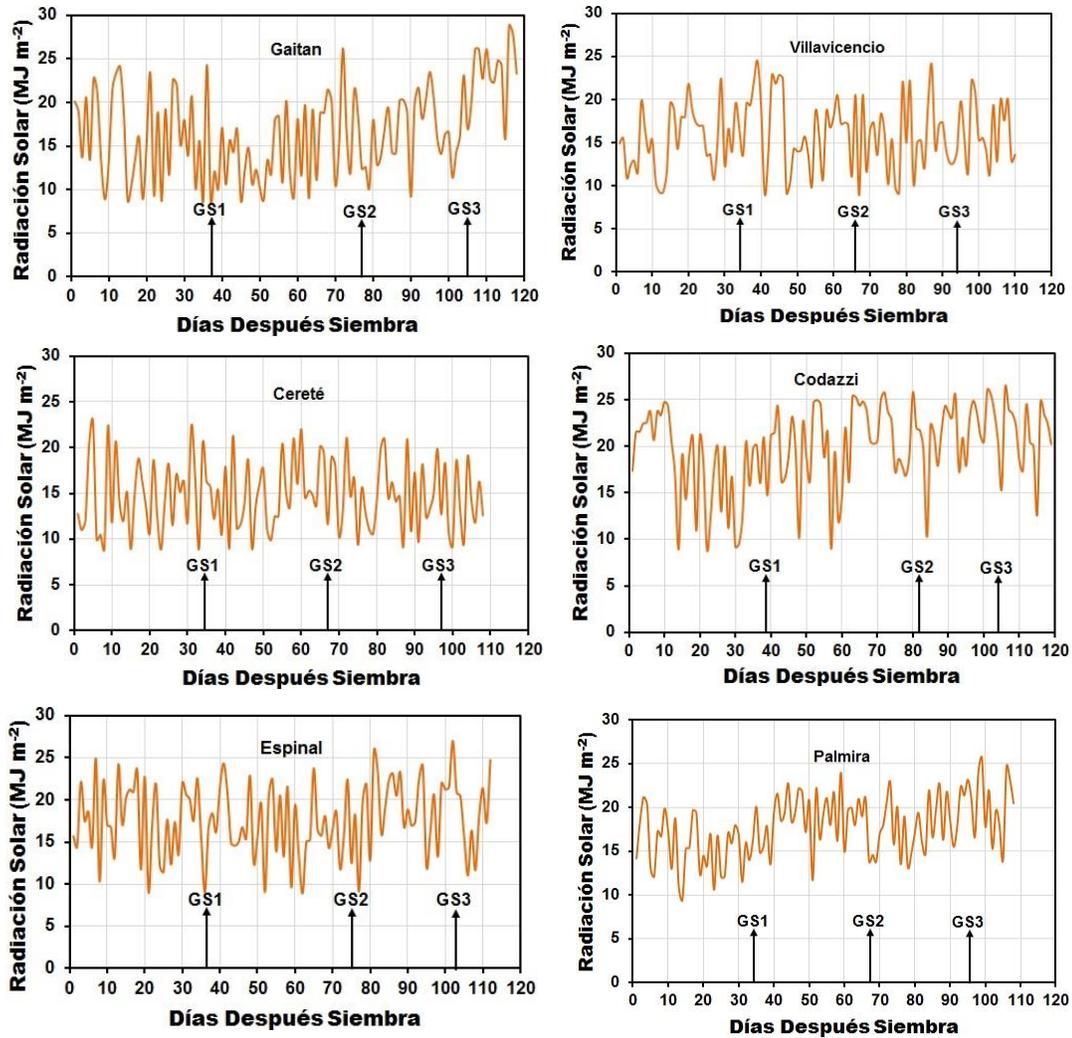


Figura 1-2. Variación de la radiación solar durante el ciclo de crecimiento de los genotipos de sorgo dulce en las zonas de estudio, 2009-2010.



En el año 2009 se presentó el fenómeno del niño a partir del mes de junio y se extendió hasta mayo del año 2010, lo que probablemente alteró la distribución y cantidad de lluvias en las localidades de Palmira y Espinal. Las localidades de Gaitán y Villavicencio registraron una pluviosidad excesiva durante todo el ciclo de crecimiento de los genotipos de sorgo, mientras que en Cereté se observó una mejor cantidad y distribución de la precipitación. En Cereté el total de precipitación fue de 710 mm, valor reportado por Rao *et al.* (2009) como óptimo para alcanzar altos rendimiento de forraje en sorgo dulce.

La humedad relativa durante el ciclo de crecimiento de los genotipos de sorgo dulce fluctuó entre 60% a 80% en los ambientes de Cereté, Codazzi, Espinal y Palmira (Figura 1-4). La humedad relativa diaria fue superior al 80% en las localidades de Gaitán y Villavicencio. En general los ambientes con mayor pluviosidad presentaron valores de humedad relativa más altos. En Codazzi y Palmira los porcentajes menores de humedad relativa se presentaron durante la fase de crecimiento reproductivo de los genotipos de sorgo dulce.

Figura 1-3. Balance hídrico climático durante el ciclo de crecimiento de los genotipos de sorgo dulce en las zonas de estudio, 2009-2010.

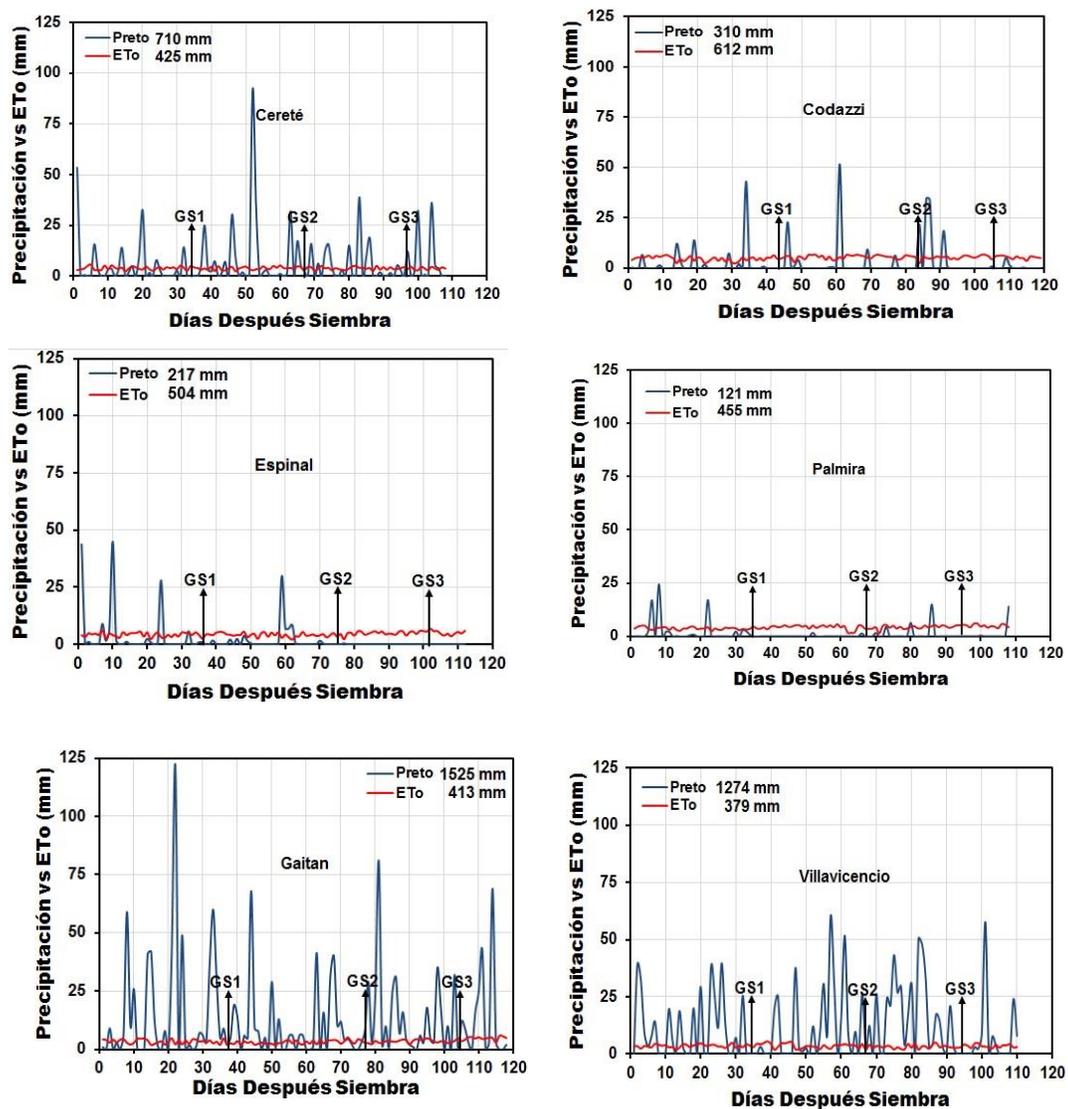
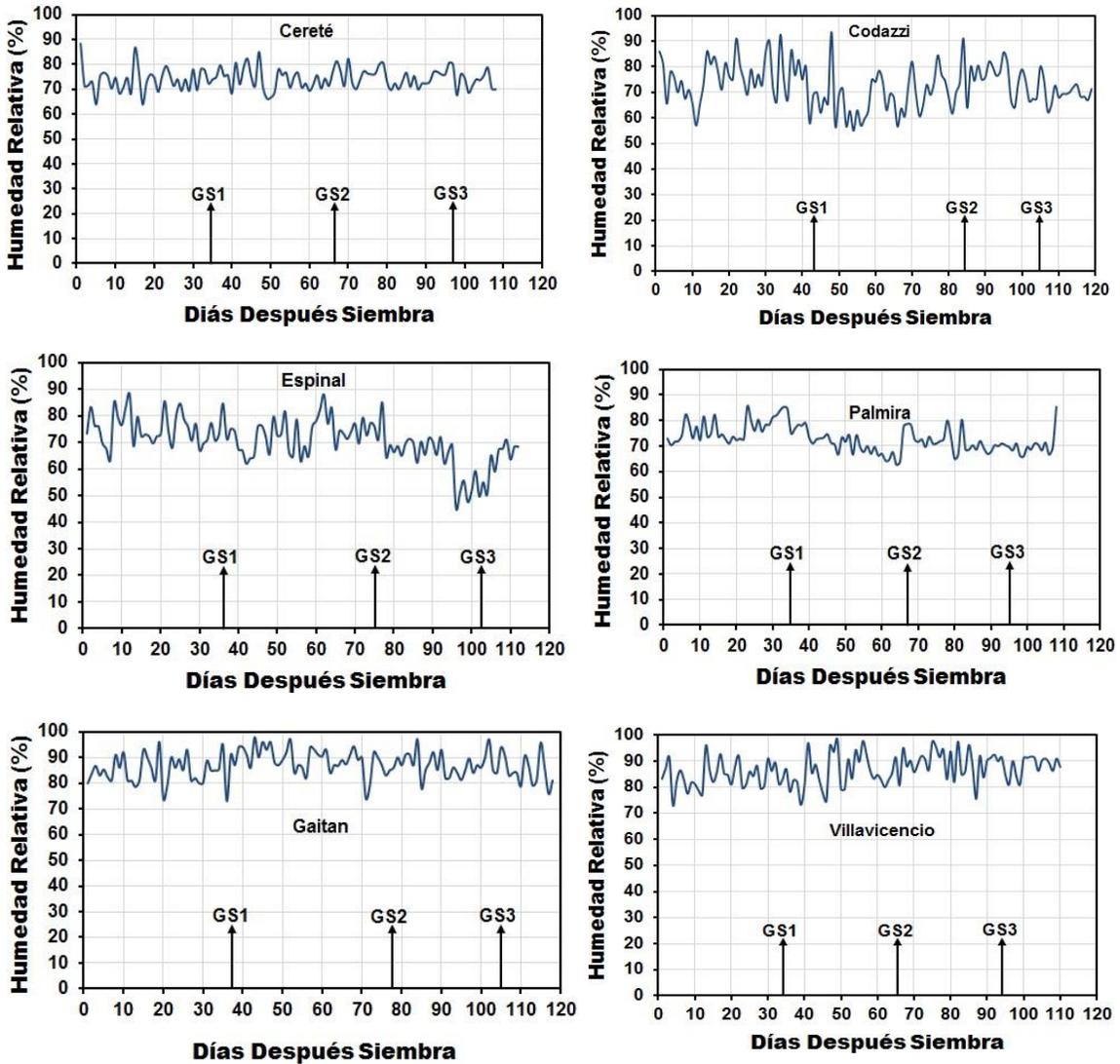


Figura 1-4. Variación de la humedad relativa durante el ciclo de crecimiento de los genotipos de sorgo dulce en las zonas de estudio, 2009-2010.



- **Caracterización edáfica.** Los suelos donde se ubicaron los experimentos correspondieron a paisajes de altiplanicie (A), piedemonte (P), y lomerío (L) con pendientes entre 0 a 3%, diferentes grados de fertilidad y clases texturales (Tabla 1-5).

El pH de los suelos osciló en rangos desde muy fuertemente ácido en Villavicencio (4,8) y Gaitán (5,0), a ligeramente alcalino (7,5) en Codazzi y Palmira (7,4). Los porcentajes de materia orgánica en el suelo son bajos en Espinal (1,9%) a medios en Palmira (3,2%) y

Villavicencio (3,4%). Los contenidos de fósforo disponible muy bajos en Cereté (3,4 mg kg⁻¹) y altos en Codazzi (153 mg kg⁻¹), Espinal (69 mg kg⁻¹) y Palmira (174,1 mg kg⁻¹). Los menores contenidos de bases intercambiables (Ca²⁺, Mg²⁺ y K⁺) se encontraron en Gaitán y Villavicencio, mientras que Palmira presentó mayores valores en Ca²⁺ y Mg²⁺. En los ambientes de Codazzi, Espinal y Palmira los suelos tienen una alta fertilidad, en Cereté media y en Gaitán y Villavicencio baja. Los suelos de las localidades de Espinal y Villavicencio, presentaron los mayores tenores de arena, en contraste con Palmira donde los suelos tienen más alto porcentaje de arcillas (Tabla 1-5).

Tabla 1-5. Características físico-químicas de los suelos en las seis localidades, 2009-2010.

Localidad	pH	MO %	P	S	Ca	Mg	K	Na	Textura			Unidad Cartográfica	
			mg kg ⁻¹			Cmol(+) kg ⁻¹				A ^{1/} (%)	L (%)		Ar (%)
Cereté	6,4	2,0	3,4	2,5	6,5	4,4	0,4	0,1	30	41	29	FAr	LWGa
Codazzi	7,5	2,3	153	11,7	9,8	1,1	0,4	2,5	45	26	29	FArA	PWBa
Espinal	6,1	1,9	69	4,2	4,5	1,1	0,4	0,2	54	19	27	FArA	PWKa
Palmira	7,4	3,2	174,1	12,5	21,9	13,2	0,3	0,2	40	27	33	FAr	GLar
Gaitán	5,0	2,8	16,1	1,2	2,5	0,7	0,1	0,1	19	54	27	FL	AVDa
Villavicencio	4,8	3,4	27,4	5,4	2,0	0,6	0,2	0,0	58	14	28	FArA	PVCa

^{1/} A= Arena; L=Limo; Ar=Arcilla

1.3.2 Efecto de la interacción genotipo por ambiente sobre el comportamiento agronómico de genotipos de sorgo dulce.

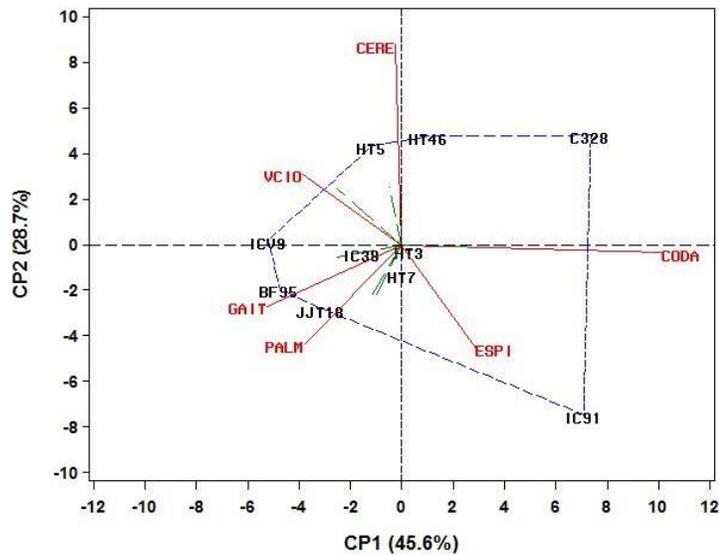
- **Fases de crecimiento.** La suma de grados día requeridos a iniciación de formación de panícula (GS1), a floración (GS2) y a madurez fisiológica (GS3) presentaron diferencias estadísticas (P<0,01) entre ambientes (A), entre genotipos (G) y en la interacción GA lo que significó que los genotipos respondieron de manera diferencial a las variaciones ambientales. El genotipo explicó el 44,9%, 52,2%, y 41,0% de la variación total observada en grados día acumulados para alcanzar el estado de crecimiento GS1, GS2 y GS3, respectivamente (Anexo 1-1). La suma de cuadrados del

ambiente explicó el 42,7%, 35,1%, y 47,5% de la variación total observada en grados día a GS1, GS2 y GS3, respectivamente. Los resultados permitieron observar una alta contribución del ambiente en la explicación de la variación total en la duración del desarrollo fenológico entre los genotipos de sorgo.

El análisis AMMI indicó que los 5 componentes principales de las tres fases de crecimiento presentaron diferencias estadísticas ($P < 0,01$). Los dos primeros términos multiplicativos explicaron el 74,3%, 76,7% y 75,6% de la suma de cuadrados de la interacción con 24 grados de libertad en el tiempo térmico acumulado en los estados de crecimiento GS1, GS2 y GS3, respectivamente (Anexo 1-1).

En la Figura 1-5 se observa la representación gráfica de la contribución de los genotipos y ambientes a la interacción, considerando los dos primeros ejes del análisis de componentes principales, para la duración de la fase vegetativa en grados día acumulados.

Figura 1-5. Biplot AMMI para duración fase vegetativa (°Cd) de genotipos de sorgo dulce en 6 ambientes, 2009-2010.



Los genotipos que presentaron la menor interacción y, por tanto, un comportamiento estable en el tiempo térmico acumulado durante GS1, fueron HT3, HT7 e IC38. Los genotipos de sorgo dulce BF95, C328, HT5, IC91 e ICV9 formaron el polígono de variación y fueron los que mayor diferenciación presentaron en el tiempo térmico

acumulado para completar la fase vegetativa, a través de los ambientes. El genotipo BF95 mostró una mayor duración del estado GS1 (564 °Cd) en Gaitán, C328 en Codazzi (726°Cd), e IC91 en Codazzi (710 °Cd) y Espinal (609 °Cd). El genotipo ICV9 presentó una duración más corta en la fase GS1 en el ambiente de Palmira (429°Cd) y Villavicencio (453°Cd), y una mayor acumulación de tiempo térmico en Gaitán (429°Cd) (Tabla 1-6). ICV9 fue el genotipo con menor duración de la fase vegetativa (494°Cd), mientras que HT7 (658°Cd) y HT46 (697°Cd) fueron los más tardíos.

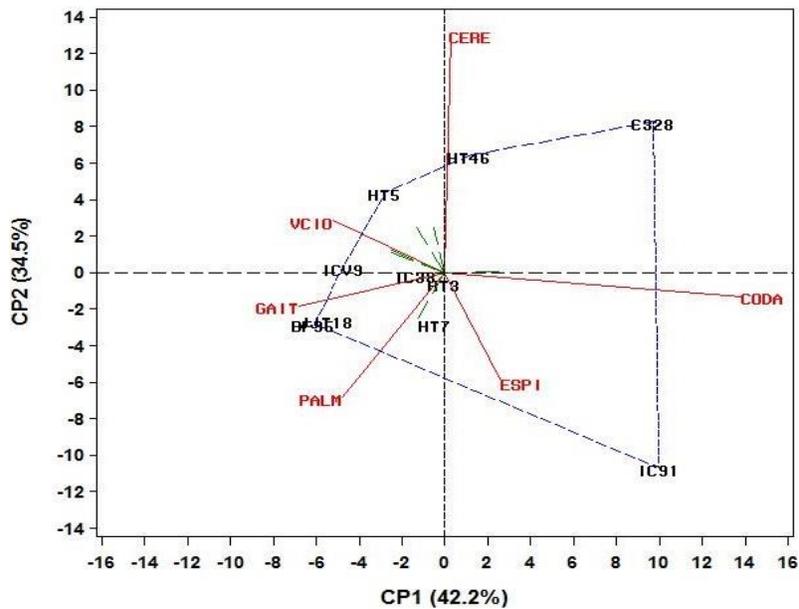
El modelo AMMI permitió agrupar los ambientes en cuatro grupos relativamente homogéneos: El grupo 1 incluyó Cereté; el grupo 2 incluyó Codazzi y Espinal; el grupo 3 Palmira y Gaitán y el grupo 4 Villavicencio (Figura 1-5). Los ambientes que más contribuyeron en la variación total de la interacción fueron Cereté (Cere) y Codazzi (Coda), y también éstos, los que mostraron mayor discriminación en la acumulación de grados día entre los genotipos. Las condiciones ambientales de Codazzi y Espinal favorecieron una mayor duración de la fase vegetativa (665°Cd y 603°Cd, respectivamente), mientras que en Palmira los genotipos tuvieron una duración más corta (479°Cd) (Tabla 1-6).

Tabla 1-6. Medias, valores mínimos y máximos, desviación estándar para duración fase vegetativa, en grados día (°Cd), en genotipos de sorgo dulce en seis localidades, 2009-2010.

Genotipo	Cereté	Codazzi	Espinal	Palmira	Gaitán	Villavicencio
(BF95) BF95-11/135	518	556	543	456	564	467
(C328) CEM328/3-3-1-1	604	726	560	401	550	467
(HT3) LASPHT-3	586	658	625	484	578	528
(HT46) LASPHT-46	753	786	725	569	696	654
(HT5) LASPHT-5	622	658	576	498	564	559
(HT7) LASPHT-7	638	738	725	526	683	639
(IC38) ICSB38	535	587	560	429	550	467
(IC91) ICSR91005	483	710	609	470	535	436
(ICV9) ICSV95126	499	556	460	429	564	453
JJT18	604	672	643	525	683	543
Media	584	665	603	479	597	521
Mínimo	483	556	460	401	535	436
Máximo	753	786	725	569	696	654
D. Estándar	77,1	75,6	78,4	50,1	61,4	74,5

En la Figura 1-6 se observa la representación gráfica de la contribución de los genotipos y ambientes a la interacción para la duración de la fase reproductiva, en grados día acumulados. Los genotipos que presentaron la menor interacción y, por tanto, un comportamiento estable en la duración de la fase reproductiva fueron HT3, HT7 e IC38. Los genotipos con mayor variación en la duración de GS2 fueron BF95, C328, HT5, IC91 y JJT18. El genotipo C328 fue más tardío en Cereté (1208°Cd) y Codazzi (1349°Cd) y precoz en Palmira (823°Cd). El genotipo IC91 presentó los valores más altos de acumulación en grados día para florecer en Codazzi (1340°Cd) y menores valores en Villavicencio (860°Cd). Se observó que los genotipos HT7 y HT46 fueron los de mayor acumulación de grados día (más tardíos) en todos los ambientes, mientras que BF95, IC38 e ICV9 fueron los de menor acumulación (más precoces). JJT18 presentó la mayor acumulación de tiempo térmico en Gaitán, 1349°Cd (Tabla 1-7).

Figura 1-6. Biplot AMMI para duración fase reproductiva (°Cd) de genotipos de sorgo dulce en 6 ambientes, 2009-2010.



Los ambientes de Cereté y Codazzi tienen una mayor contribución a la variación total de grados día requeridos entre los genotipos para florecer (Figura 1-6). En éstos dos ambientes la mayoría de genotipos exhibieron una mayor duración de la fase reproductiva (alta acumulación en grados día) en contraste con Palmira y Villavicencio donde los genotipos fueron menores en los valores de tiempo térmico, 993 °Cd y 1018

°Cd, respectivamente (Tabla 1-7). De acuerdo a su proximidad, posición en los cuadrantes y magnitud de los “escores” se diferenciaron cuatro grupo de ambientes, siendo los ambientes dentro de cada grupo positivamente correlacionados. El grupo 1 incluyó Cereté, el grupo 2 Codazzi y Espinal; el grupo 3 incluyó Palmira y Gaitán; y el grupo 4 Villavicencio (Figura 1-6).

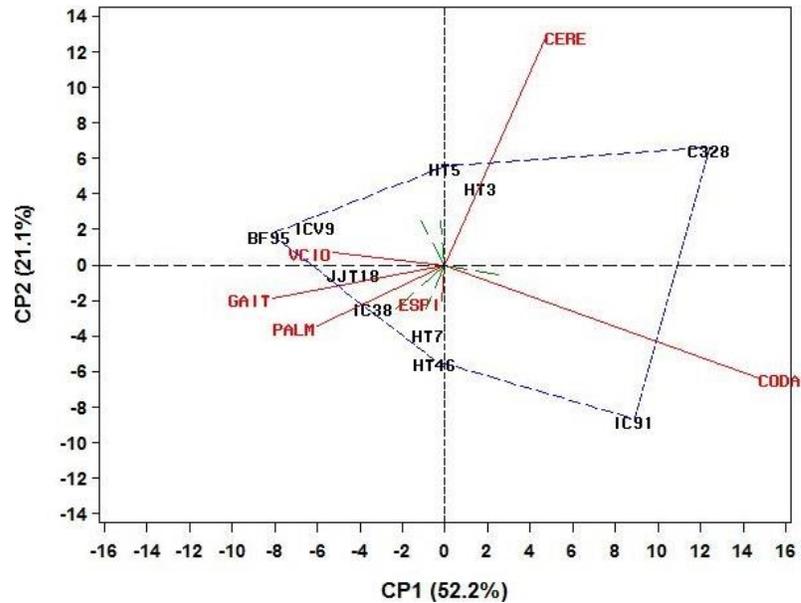
Tabla 1-7. Medias, valores mínimos y máximos, desviación estándar para la duración fase reproductiva, en grados día (°Cd) acumulados, en genotipos de sorgo dulce bajo seis localidades, 2009-2010.

Genotipo	Cereté	Codazzi	Espinal	Palmira	Gaitán	Villavicencio
(BF95) BF95-11/135	1022	1072	1081	947	1137	904
(C328) CEM328/3-3-1-1	1208	1349	1095	823	1107	920
(HT3) LASPHT-3	1159	1246	1233	1005	1152	1037
(HT46) LASPHT-46	1496	1490	1438	1183	1394	1262
(HT5) LASPHT-5	1226	1246	1141	1052	1152	1107
(HT7) LASPHT-7	1243	1400	1404	1097	1349	1220
(IC38) ICSB38	1056	1135	1110	883	1107	920
(IC91) ICSR91005	952	1349	1188	976	1060	860
(ICV9) ICSV95126	986	1072	950	868	1107	874
JJT18	1192	1262	1265	1082	1349	1080
Media	1154	1263	1191	992	1191	1018
Mínimo	952	1072	950	823	1060	860
Máximo	1496	1490	1438	1183	1394	1262
D. Estándar	154	172	146	110	118	140

La Figura 1-7 muestra la representación gráfica de la contribución de los genotipos y ambientes a la interacción, considerando los dos primeros ejes del análisis de componentes principales para la duración de la fase GS3, en grados día acumulados. Los genotipos ubicados en posiciones cercanas al origen de los ejes (HT7 y HT46) contribuyeron poco a la interacción con relación a los que se encuentran más alejados, por lo que presentaron menor variación en el tiempo térmico requerido para lograr la madurez fisiológica, por interaccionar menos con los ambientes.

Los genotipos de sorgo dulce BF95, C328, HT5 e IC91 formaron el polígono de variación y fueron los de mayor contribución a la variación en la duración del estado GS3 a través de los ambientes (Figura 1-7). En el ambiente de Gaitán el genotipo BF95 (1538°Cd) acumulo más grados días para alcanzar la madurez fisiológica. El genotipo C328 logró un mayor tiempo térmico (1349°Cd) en Codazzi y menor acumulación en Palmira (823°Cd). El genotipo IC91 presentó una mayor acumulación de tiempo térmico en Codazzi (1568°Cd) y menores grado día en Villavicencio (1232°Cd), mientras que HT5 fue más tardío en Cereté (1781°Cd) y más precoz en Palmira (1432°Cd) (Tabla 1-8).

Figura 1-7. Biplot AMMI para duración fase llenado grano (°Cd) de genotipos de sorgo dulce en 6 ambientes, 2009-2010.



Los resultados permitieron observar que los genotipos de sorgo generados por el programa de mejoramiento de Corpoica-Icrisat eran más tardíos que los genotipos introducidos. Entre éste grupo se distinguieron HT7 (1623°Cd), HT46 (1691°Cd) y JJT18 (1733°Cd) por presentar una mayor acumulación de grados día, mientras que los genotipos introducidos BF95 (1426°Cd) e ICV9 (1398°Cd) requirieron menos grados día para alcanzar su madurez fisiológica.

Tabla 1-8. Medias, valores mínimos y máximos, desviación estándar para duración fase llenado de grano, en grados día (°Cd) acumulados, en genotipos de sorgo dulce bajo seis localidades, 2009-2010.

Genotipo	Cereté	Codazzi	Espinal	Palmira	Gaitán	Villavicencio
(BF95) BF95-11/135	1547	1400	1471	1328	1538	1275
(C328) CEM328/3-3-1-1	1797	1678	1568	1211	1506	1291
(HT3) LASPHT-3	1764	1592	1641	1390	1555	1405
(HT46) LASPHT-46	1832	1802	1736	1568	1815	1648
(HT5) LASPHT-5	1781	1592	1583	1432	1555	1483
(HT7) LASPHT-7	1814	1725	1763	1478	1765	1601
(IC38) ICSB38	1512	1490	1533	1270	1506	1291
(IC91) ICSR91005	1564	1678	1568	1359	1458	1232
(ICV9) ICSV95126	1530	1400	1453	1255	1506	1247
JJT18	1747	1611	1704	1463	1765	1450
Media	1689	1597	1602	1375	1597	1393
Mínimo	1512	1400	1453	1211	1458	1232
Máximo	1832	1802	1763	1568	1815	1648
D. Estándar	127,2	128,4	102,5	108,1	126	143,9

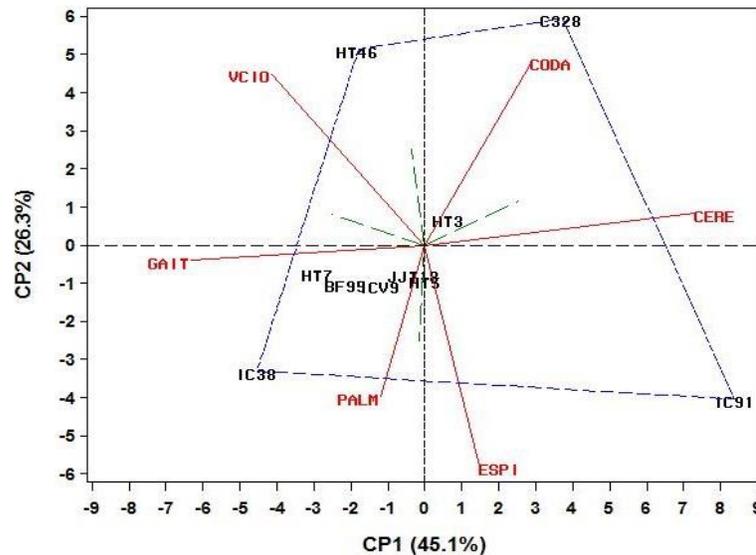
▪ **Altura de planta.** El análisis AMMI reveló que la altura de planta presentó diferencias estadísticas ($p < 0.01$) para el genotipo (G), el ambiente (A) y la interacción genotipo por ambiente (GA) (Anexo 1-2). Para la altura de planta el genotipo explicó el 71,9%, el ambiente el 14,4% y el componente de interacción el 8,5% de la variación total observada. La alta variación explicada por el genotipo indicó una alta diversidad en altura de planta en los cultivares, con grandes diferencias entre medias genotípicas que ocasionaron una gran parte de la variación observada en la altura.

El modelo AMMI indicó que los 3 componentes principales de la altura de planta presentaron diferencias estadísticas ($P < 0.01$). Los dos primeros componentes con 24 grados de libertad explicaron el 71,4% de la interacción genotipo por ambiente (Anexo 1-2).

En la Figura 1-8 se observa la representación gráfica de la contribución de los genotipos y ambientes a la interacción, considerando los dos primeros ejes del análisis de componentes principales, para altura de planta. Los genotipos ubicados en posiciones cercanas al origen de los ejes (BF95, HT3, HT5, JJT18 e ICV9) contribuyeron poco a la

interacción con relación a los que se encuentran más alejados, por lo que presentaron menor variación en la altura de planta, por interaccionar menos con los ambientes.

Figura 1-8. Biplot AMMI para la altura de planta (cm) de genotipos de sorgo dulce en 6 ambientes, 2009-2010.



Los genotipos de sorgo dulce C328, HT46, IC91 e IC38 formaron el polígono de variación y fueron los que mayor diferenciación presentaron en altura de planta a través de los ambientes. La mayor altura de planta en C328 se presentó en Cereté (341 cm) y Codazzi (333 cm) y la menor altura fue encontrada en Espinal (194 cm). El genotipo IC91 alcanzó su mayor altura en el ambiente de Cereté (336 cm) y la menor altura en Villavicencio (176 cm). El genotipo HT7 ocupó el primer lugar en altura en los ambientes de Cereté, Espinal, Gaitán y Villavicencio, mientras que el IC38 presentó la menor altura en Cereté, Espinal y Villavicencio (Tabla 1-9). Los genotipos de sorgo dulce HT3, HT5, HT7, HT46 y JJT18, generados por Corpoica-Icrisat, presentaron una mayor altura de planta comparados con los valores obtenidos por los materiales introducidos.

El ambiente con menor contribución en la variación total de la interacción fue Palmira. En esta localidad se presentaron los rangos de variación más bajos en altura de planta entre los genotipos de sorgo dulce. De acuerdo a su proximidad, posición en los cuadrantes y magnitud de los “scores” se diferenciaron cuatro grupos de ambientes, estando los ambientes dentro de cada grupo positivamente correlacionados. El grupo 1 incluyó el

ambiente de Codazzi; el grupo 2 Cereté y Espinal; el grupo 3 Palmira y Gaitán; y el grupo 4 el ambiente de Villavicencio (Figura 1-8). En los ambientes de Cereté y Espinal los genotipos de sorgo presentaron una clasificación similar por la altura de planta, ambientes en donde se presentó el mayor (Cereté) y el menor (Espinal) promedio de alturas.

Tabla 1-9. Medias, valores mínimos y máximos, desviación estándar para altura de planta (cm) en genotipos de sorgo dulce bajo seis localidades, 2009-2010.

Genotipo	Cereté	Codazzi	Espinal	Palmira	Gaitán	Villavicencio
(BF95) BF95-11/135	228	205	161	203	211	220
(C328) CEM328/3-3-1-1	341	333	194	229	253	276
(HT3) LASPHT-3	412	372	289	358	356	359
(HT46) LASPHT-46	370	368	230	324	349	355
(HT5) LASPHT-5	393	312	266	348	321	350
(HT7) LASPHT-7	413	340	322	356	389	406
(IC38) ICSB38	176	203	135	203	235	153
(IC91) ICSR91005	336	255	211	237	190	176
(ICV9) ICSV95126	229	200	153	189	206	202
JJT18	384	339	279	341	340	339
Media	328	293	224	279	285	284
Mínimo	167	181	130	173	130	147
Máximo	413	402	331	372	407	415
D. Estándar	85,2	71,0	62,5	71,4	73,0	88,1

En Codazzi los genotipos con mayor altura de planta fueron HT3 (372 cm), HT46 (368 cm), HT7 (340 cm), JJT18 (339 cm) y C328 (333 cm), mientras que en Cereté la clasificación por altura fue HT7 (413 cm), HT3 (412 cm), HT5 (393 cm), JJT18 (384 cm) y HT46 (370 cm). Las condiciones ambientales de Cereté y Codazzi fueron favorables para el crecimiento en altura de la mayoría de los genotipos de sorgo, mientras que Espinal fue el menos favorable (Tabla 1-9).

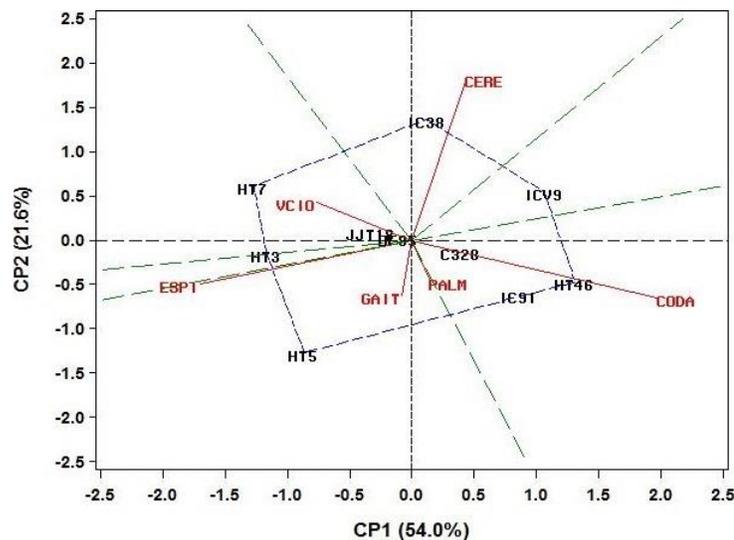
- **Diámetro medio del tallo principal.** El diámetro del tallo basal y del quinto (5^{to}) entrenudo presentaron diferencias estadísticas ($P < 0.01$) entre ambientes (A), entre

genotipos (G) y en la interacción GA. El genotipo explicó el 24,8% y 18,1% de la variación total observada en el diámetro basal y el diámetro del 5^{to} entrenudo, respectivamente (Anexo 1-2). El ambiente explicó el 30,0% y 28,8% de la variación total observada en el diámetro basal y el diámetro del 5^{to} entrenudo, respectivamente. Esto indicó que para el carácter diámetro basal y del quinto entrenudo, el ambiente y los efectos de interacción fueron más relevantes que el comportamiento *per se* de los genotipos.

El modelo AMMI indicó que los 3 componentes principales del diámetro basal presentaron diferencias estadísticas ($P < 0.01$). Los dos primeros componentes con 24 grados de libertad explicaron el 75,6% de la interacción genotipo por ambiente (Anexo 1-2). En la variable diámetro del 5^{to} entrenudo los dos primeros componentes presentaron diferencias estadísticas ($P < 0.01$) y explicaron con 24 grados de libertad el 77,2% de la interacción (Anexo 1-2).

En la Figura 1-9 se observa la representación gráfica de la contribución de los genotipos y ambientes a la interacción, considerando los dos primeros ejes del análisis de componentes principales, para el diámetro basal. Los genotipos ubicados en posiciones cercanas al origen de los ejes (BF95, C32 y JJT18) contribuyeron poco a la interacción con relación a los que se encuentran más alejados, por lo que presentaron menor variación en el diámetro basal, por interaccionar menos con los ambientes.

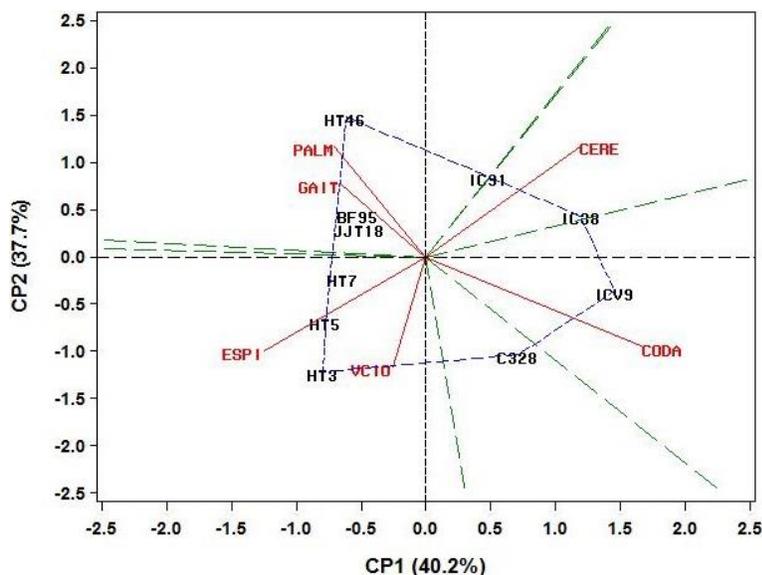
Figura 1-9. Biplot AMMI para el diámetro basal (mm) de genotipos de sorgo dulce en 6 ambientes, 2009-2010.



Los genotipos de sorgo dulce IC38, ICV9, HT46, HT5, HT3 y HT7 formaron el polígono de variación y fueron los que presentaron mayor diferenciación en diámetro basal a través de los ambientes (Figura 1-9). El genotipo IC38 presentó el mayor valor de diámetro basal en el ambiente de Cereté (22 mm), el ICV9 logró su mayor diámetro basal en los ambientes de Cereté (20 mm) y Codazzi (19 mm) y HT5 en Gaitán (16 mm) (Tabla 1-10).

En la Figura 1-10 se observa la representación gráfica de la contribución de los genotipos y ambientes a la interacción, considerando los dos primeros ejes del análisis de componentes principales, para el diámetro del quinto entrenudo. Los genotipos ubicados en posiciones cercanas al origen de los ejes (BF95, HT7 y JJT18) contribuyeron poco a la interacción con relación a los que se encuentran más alejados, por lo que presentaron menor variación en el diámetro quinto entrenudo, por interaccionar menos con los ambientes.

Figura 1-10. Biplot AMMI para el diámetro del quinto entrenudo (mm) de genotipos de sorgo dulce en 6 ambientes, 2009-2010.



Los genotipos de sorgo dulce IC38, ICV9, C328, HT3 y HT46 formaron el polígono de variación y fueron los que presentaron mayor diferenciación en diámetro del quinto entrenudo a través de los ambientes (Figura 1-10). Los mayores valores de diámetro del genotipo C328 fueron obtenidos en Codazzi (18 mm) y los valores más bajos fueron observados en Palmira (13 mm), Gaitán (13 mm) y Villavicencio (13mm) (Tabla 1-11).

Tabla 1-10. Medias, valores mínimos y máximos, desviación estándar para el diámetro basal (mm) en genotipos de sorgo dulce bajo seis localidades, 2009-2010.

Genotipo	Cereté	Codazzi	Espinal	Palmira	Gaitán	Villavicencio
(BF95) BF95-11/135	20	16	14	17	18	16
(C328) CEM328/3-3-1-1	18	18	13	14	14	15
(HT3) LASPHT-3	17	14	15	13	14	14
(HT46) LASPHT-46	23	23	15	20	21	16
(HT5) LASPHT-5	15	15	14	15	16	14
(HT7) LASPHT-7	19	14	16	15	15	15
(IC38) ICSB38	22	16	13	16	15	15
(IC91) ICSR91005	20	20	15	18	16	15
(ICV9) ICSV95126	20	19	12	14	15	16
JJT18	21	18	16	19	17	18
Media	19	17	14	16	16	15
Mínimo	14	12	11	12	13	12
Máximo	25	24	18	23	22	19
D. Estándar	2,9	3,5	1,7	2,4	2,2	1,5

Los ambientes de Cereté, Codazzi y Espinal presentaron una mayor contribución en la variación total del diámetro basal. En Cereté y Codazzi los genotipos de sorgo dulce presentaron el mayor diámetro basal, mientras que en Espinal se obtuvieron los valores más bajos (Tabla 1-10).

El genotipo IC38 presentó el mayor valor de diámetro en el ambiente de Cereté (20 mm), el ICV9 logró su mayor diámetro en los ambientes de Cereté (19 mm) y Codazzi (18 mm) y HT46 en Cereté (21 mm), Palmira (16 mm) y Gaitán (16 mm). El diámetro en el 5^{to} entrenudo fue más grande en los ambientes de Cereté (18 mm), Codazzi (15 mm) y Palmira (15 mm) (Tabla 1-11). Los genotipos de sorgo HT46 (17 mm) y JJT18 (16 mm) se distinguieron por presentar los valores más altos de diámetro en el quinto entrenudo.

De acuerdo a su proximidad, posición en los cuadrantes y magnitud de los “escores” son evidentes cuatro grupo de ambientes, estando los ambientes dentro de cada grupo positivamente correlacionados. El grupo 1 incluyó el ambiente Cereté; el grupo 2 incluyó el ambiente Codazzi; el grupo 3 los ambientes Espinal y Villavicencio; y el grupo 4 incluyó

los ambientes Palmira y Gaitán (Figura 1-10). Los ambientes dentro de cada grupo clasificaron los genotipos de forma similar por el diámetro del 5^{to} entrenudo.

Tabla 1-11. Medias, valores mínimos y máximos, desviación estándar para el diámetro quinto entrenudo (mm) en genotipos de sorgo dulce bajo seis localidades, 2009-2010.

Genotipo	Cereté	Codazzi	Espinal	Palmira	Gaitán	Villavicencio
(BF95) BF95-11/135	18	14	14	16	15	14
(C328) CEM328/3-3-1-1	16	18	14	13	13	13
(HT3) LASPHT-3	14	13	14	12	11	13
(HT46) LASPHT-46	21	16	15	19	19	14
(HT5) LASPHT-5	13	13	13	14	12	13
(HT7) LASPHT-7	18	14	15	15	13	14
(IC38) ICSB38	20	16	12	15	12	13
(IC91) ICSR91005	20	16	14	18	13	12
(ICV9) ICSV95126	19	18	12	13	13	14
JJT18	19	15	15	18	14	15
Media	18	15	14	15	13	14
Mínimo	12	10	10	10	8	11
Máximo	24	22	17	21	20	18
D. Estándar	3,2	2,8	1,7	2,6	2,5	1,4

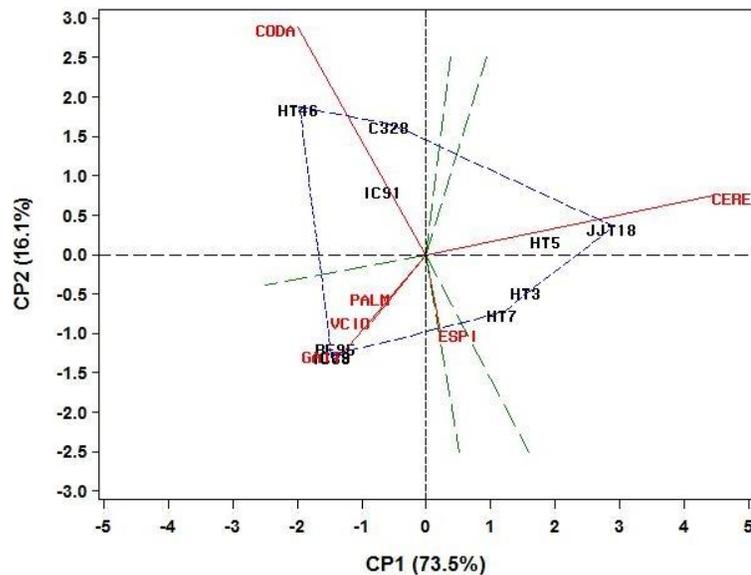
▪ **Producción de biomasa.** Las producciones de biomasa de tallos, hojas y panojas presentaron diferencias estadísticas ($P < 0.01$) entre ambientes (A), entre genotipos (G) y en la interacción GA lo que significa que los genotipos respondieron de manera diferencial a las variaciones ambientales. El genotipo explico el 25,1%, 6,9% y 6,5% de la variación total observada en la producción de biomasa de tallos, hojas y panojas, respectivamente (Anexo 1-3). La suma de cuadrados del ambiente explico el 53,7%, 62,8% y 53,4% de la variación total observada en la producción de biomasa de tallos, hojas y panojas, respectivamente, lo que confirmó una fuerte contribución del ambiente sobre los rendimientos de biomasa en los genotipos.

Para la producción de biomasa en tallos el análisis AMMI indicó que los 3 componentes principales presentaron diferencias estadísticas ($P < 0.01$). Los dos primeros términos multiplicativos explicaron el 89,6% de la suma de cuadrados de la interacción, con 24 grados de libertad (Anexo 1-3). En la producción de biomasa en hojas y panículas solo 2

componentes principales presentaron diferencias estadísticas ($P < 0.01$). Los dos primeros componentes con 24 grados de libertad explicaron el 92,7% y el 76,8% de la interacción genotipo por ambiente en la producción de hojas y panículas, respectivamente.

En la Figura 1-11 se observa la representación gráfica de la contribución de los genotipos y ambientes a la interacción, considerando los dos primeros ejes del análisis de componentes principales, para producción de biomasa en tallos.

Figura 1-11. Biplot AMMI para producción de biomasa en tallos ($t\ ha^{-1}$) de genotipos de sorgo dulce en 6 ambientes, 2009-2010.



Los genotipos que presentaron la menor interacción y, por tanto, un comportamiento estable en producción de tallos, fueron HT3, HT5, HT7 e IC91. Los genotipos HT46, C328, JJJ18, HT7 y BF95 formaron el polígono de variación y fueron los que presentaron mayor diferenciación en el rendimiento de tallo a través de los ambientes. En el ambiente de Cereté los genotipos con mayores rendimientos de tallos fueron JJJ18 ($47,1\ t\ ha^{-1}$), HT5 ($40,2\ t\ ha^{-1}$), HT3 ($37,0\ t\ ha^{-1}$), HT7 ($36,4\ t\ ha^{-1}$) y C328 ($24,3\ t\ ha^{-1}$). En Gaitán se distinguieron por la producción de tallos los genotipos HT7 ($11,9\ t\ ha^{-1}$) y HT46 ($10,9\ t\ ha^{-1}$) (Tabla 1-12). Los genotipos de sorgo dulce con mayor producción de biomasa fueron HT3 ($16,3\ t\ ha^{-1}$), HT5 ($17,1\ t\ ha^{-1}$), HT7 ($18,1\ t\ ha^{-1}$), HT46 ($16,3\ t\ ha^{-1}$) y JJJ18 ($19,1\ t\ ha^{-1}$), los cuales fueron producidos por el programa de mejoramiento de sorgos dulces en Colombia. Los genotipos

introducidos BF95, ICV9, IC38 seleccionados por producción de biomasa y Brix en los sitios de selección, presentaron baja adaptación a las condiciones ambientales del trópico bajo colombiano. Es importante resaltar que las condiciones ambientales de Cereté y Codazzi fueron favorables para la producción de biomasa de los genotipos C328 e IC91.

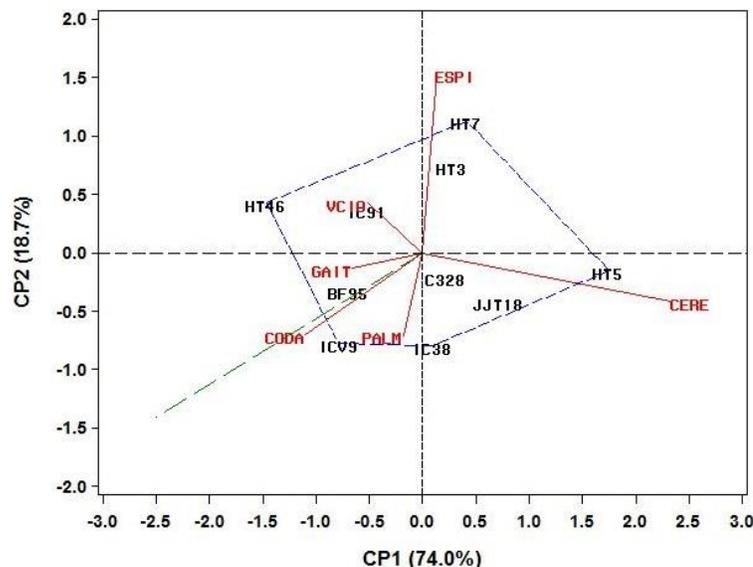
El modelo AMMI permitió agrupar los ambientes en cuatro grupos relativamente homogéneos, de tal forma que se pueda explotar a los genotipos tanto por su capacidad de adaptación amplia como específica. El grupo 1 incluyó el ambiente Codazzi; el grupo 2 el ambiente Cereté; el grupo 3 el ambiente Espinal y el grupo 4 incluyó los ambientes Palmira, Gaitán y Villavicencio (Figura 1-11). Los ambientes Cereté y Codazzi fueron los de mayor contribución en la variación total de la producción de tallos, o sea fueron los ambientes donde se presentó mayor discriminación en producción de biomasa entre los genotipos. Las condiciones ambientales en Cereté permitieron alcanzar la más alta producción de biomasa de tallos entre los genotipos de sorgo (Tabla 1-12). Codazzi fue otro ambiente en donde la mayoría de los genotipos de sorgo alcanzaron su mejor expresión en biomasa. Las menores producciones de biomasa se observaron en Gaitán ($7,5 \text{ t ha}^{-1}$) y Villavicencio ($8,3 \text{ t ha}^{-1}$).

Tabla 1-12. Medias, valores mínimos y máximos, desviación estándar para producción de biomasa en tallos (t ha^{-1}) en genotipos de sorgo dulce bajo seis localidades, 2009-2010.

Genotipo	Cereté	Codazzi	Espinal	Palmira	Gaitán	Villavicencio
(BF95) BF95-11/135	15,4	9,0	3,8	6,1	5,6	6,8
(C328) CEM328/3-3-1-1	24,3	18,8	5,5	6,4	5,2	5,2
(HT3) LASPHT-3	37,0	14,0	15,2	11,9	9,0	10,6
(HT46) LASPHT-46	23,4	27,5	10,1	14,0	10,9	12,2
(HT5) LASPHT-5	40,2	15,4	11,1	15,6	8,6	11,9
(HT7) LASPHT-7	36,4	16,3	20,8	12,5	11,9	10,6
(IC38) ICSB38	13,5	7,8	4,4	5,5	4,8	4,1
(IC91) ICSR91005	21,6	16,3	9,2	6,9	3,5	4,2
(ICV9) ICSV95126	14,2	7,7	1,8	6,9	5,5	4,9
JJT18	47,1	16,0	13,3	15,2	10,1	12,9
Media	27,3	14,9	9,5	10,1	7,5	8,3
Mínimo	11,2	6,2	1,4	4,8	2,0	3,5
Máximo	51,6	31,4	23,5	17,0	12,7	14,0
D. Estándar	11,9	5,9	5,9	4,1	2,9	3,6

En la Figura 1-12 se observa la representación gráfica de la contribución de los genotipos y ambientes a la interacción para producción de biomasa en hojas. El genotipo más estable en producción de hojas fue C328. Los ambientes Cereté y Espinal fueron los de mayor contribución en la variación total de la producción de biomasa. En Cereté el genotipo HT5 alcanzó la mayor biomasa en hojas, $11,3 \text{ t ha}^{-1}$, mientras que en Codazzi los genotipos HT46 y JJT18 fueron los que presentaron los mayores reportes de biomasa, $11,4 \text{ t ha}^{-1}$ y $10,0 \text{ t ha}^{-1}$, respectivamente (Tabla 1-13). Las condiciones ambientales de Cereté y Codazzi favorecieron la producción de biomasa de hojas en la mayoría de genotipos, mientras que el ambiente de Gaitán y Villavicencio fueron menos favorables (Tabla 1-13).

Figura 1-12. Biplot AMMI para producción de biomasa en hojas (t ha^{-1}) de genotipos de sorgo dulce en 6 ambientes, 2009-2010.

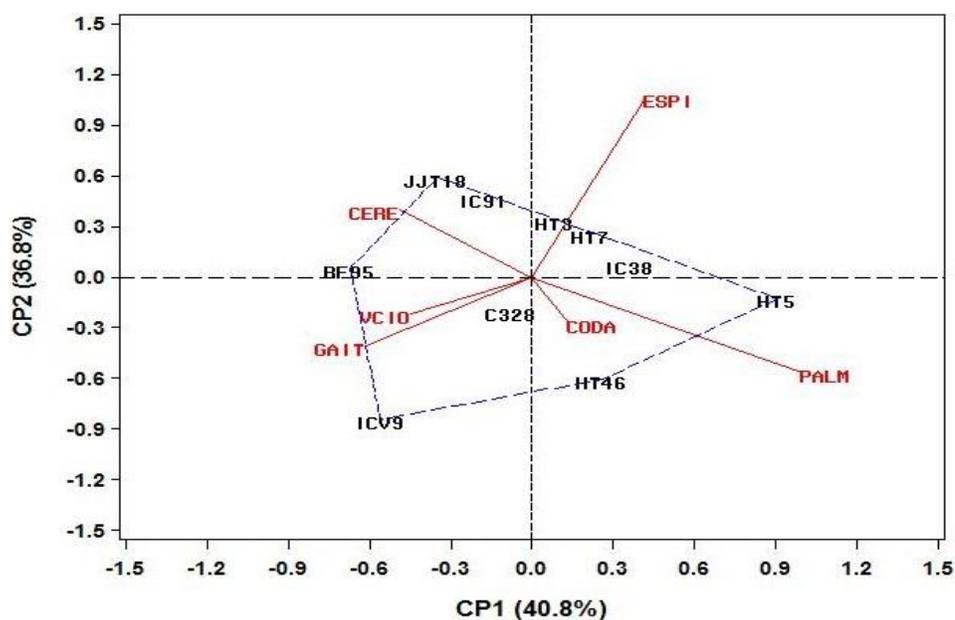


En la Figura 1-13 se observa la representación gráfica de la contribución de los genotipos y ambientes a la interacción para producción de panículas. El genotipo más estable en producción de panículas fue C328. Los ambientes Palmira y Espinal fueron los de mayor contribución en la variación total de la producción de panículas. En las condiciones ambientales de Palmira se distinguieron por su producción de panículas los genotipos HT5 ($3,1 \text{ t ha}^{-1}$), IC38 ($2,6 \text{ t ha}^{-1}$), IC91 ($2,2 \text{ t ha}^{-1}$), C328 ($2,2 \text{ t ha}^{-1}$) y HT46 ($2,2 \text{ t ha}^{-1}$) (Tabla 1-14).

Tabla 1-13. Medias, valores mínimos y máximos, desviación estándar para producción de biomasa en hojas (t ha⁻¹) en genotipos de sorgo dulce bajo seis localidades, 2009-2010.

Genotipo	Cereté	Codazzi	Espinal	Palmira	Gaitán	Villavicencio
(BF95) BF95-11/135	4,6	9,1	3,7	2,2	3,3	2,4
(C328) CEM328/3-3-1-1	6,9	8,6	4,9	3,4	2,2	2,1
(HT3) LASPHT-3	6,4	7,4	6,0	2,3	2,3	2,3
(HT46) LASPHT-46	3,9	11,4	6,9	4,2	4,1	4,3
(HT5) LASPHT-5	11,3	7,4	6,0	4,0	2,5	2,2
(HT7) LASPHT-7	7,0	7,4	6,8	2,2	2,4	3,1
(IC38) ICSB38	7,4	9,9	4,8	4,6	2,8	2,2
(IC91) ICSR91005	4,0	8,1	5,0	2,5	1,8	1,6
(ICV9) ICSV95126	3,7	8,4	2,5	3,0	2,6	1,7
JJT18	9,6	10,0	5,7	3,8	2,8	3,3
Media	6,5	8,8	5,2	3,2	2,7	2,5
Mínimo	2,0	2,9	1,6	1,1	0,4	0,9
Máximo	12,0	13,1	7,6	5,7	6,3	5,0
D. Estándar	2,7	2,2	1,6	1,4	1,1	1,0

Figura 1-13. Biplot AMMI para producción de biomasa en las panículas (t ha⁻¹) de genotipos de sorgo dulce en 6 ambientes, 2009-2010.



▪ **Concentración de azúcares en jugo y contenido en el tallo.** Los valores de Brix (concentración azúcares) en el jugo extraído del tallo en madurez fisiológica, el contenido de azúcares en el tallo y el volumen de jugo presentaron diferencias estadísticas ($P < 0.01$) entre ambientes (A), entre genotipos (G) y en la interacción GA, lo que significa que los genotipos respondieron de manera diferencial a las variaciones ambientales. El genotipo explico el 21,5%, 39,0%, y 29,9% de la variación total observada en valores Brix, contenido de azúcares y volumen de jugo, respectivamente (Anexo 1-4).). La suma de cuadrados del ambiente explico el 39,2%, 20,8%, y 29,9% de la variación total observada en valores Brix, contenido azúcares y volumen de jugo, respectivamente, lo que confirmó una alta contribución del ambiente y la interacción GA en la variación observada de la concentración de azúcares (Brix) en el tallo, el contenido de azúcares y el volumen de jugo entre los genotipos.

Tabla 1-14. Medias, valores mínimos y máximos, desviación estándar para producción de biomasa en las panículas ($t\ ha^{-1}$) en genotipos de sorgo dulce bajo seis localidades, 2009-2010.

Genotipo	Cereté	Codazzi	Espinal	Palmira	Gaitán	Villavicencio
(BF95) BF95-11/135	3,2	1,7	2,8	1,4	1,6	2,2
(C328) CEM328/3-3-1-1	2,8	1,6	2,8	2,2	1,7	1,4
(HT3) LASPHT-3	2,5	1,1	2,9	1,6	0,8	0,8
(HT46) LASPHT-46	1,7	1,6	2,2	2,1	1,5	0,7
(HT5) LASPHT-5	2,8	1,6	3,1	3,3	0,7	1,2
(HT7) LASPHT-7	1,9	0,8	3,0	1,6	1,0	0,7
(IC38) ICSB38	2,8	1,4	3,3	2,6	1,3	1,4
(IC91) ICSR91005	2,8	1,2	3,3	1,4	1,4	0,9
(ICV9) ICSV95126	3,0	1,4	1,8	2,2	2,2	1,7
JJT18	3,6	1,1	3,4	1,6	1,5	1,1
Media	2,7	1,3	2,9	2,0	1,4	1,2
Mínimo	1,1	0,5	1,2	0,8	0,3	0,6
Máximo	4,2	2,1	4,5	4,6	2,4	2,4
D. Estándar	0,8	0,4	0,7	0,7	0,5	0,5

Para los valores de Brix en el jugo el modelo AMMI indicó que los 4 componentes principales presentaron diferencias estadísticas ($P < 0.01$). Los dos primeros términos multiplicativos explicaron el 74,4% de la suma de cuadrados de la interacción, con 24 grados de libertad (Anexo 1-4). Para la variable contenido de azúcares en el tallo y

volumen de jugo solo 3 componentes principales presentaron diferencias estadísticas ($P < 0.01$). Los dos primeros componentes con 24 grados de libertad explicaron el 87,4%, y el 74,4% de la interacción genotipo por ambiente en el contenido de azúcares y volumen de jugo, respectivamente (Anexo 1-4).

En la Figura 1-14 se observa la representación gráfica de la contribución de los genotipos y ambientes a la interacción para los valores Brix en el jugo del tallo, considerando los dos primeros ejes del análisis de componentes principales, para Brix. Los genotipos que presentaron la menor interacción y, por tanto, un comportamiento estable en Brix, fueron C328, HT3, HT7 y JJT18. Los genotipos HT46, ICV9 e IC91 formaron el polígono de variación y fueron los que mayor variación presentaron en la concentración de azúcares (Brix) a través de los ambientes (Figura 1-15). HT46 expuso su mayor concentración de azúcares (Brix) en los ambientes de Villavicencio (21,3) y Espinal (19,0), mientras que en Cereté presentó los valores más bajos de Brix, 10,5. El genotipo IC91 por otro lado alcanzó los valores mayores de Brix en Codazzi (16,9) y menores valores en Villavicencio (11,9) (Tabla 1-15). El genotipo ICV9 presentó una mayor concentración de azúcares en Palmira (17,4) y valores bajos de azúcares en el jugo en Codazzi (4,0). En promedio, los genotipos con mayores concentraciones de azúcares en el jugo fueron C328 (16,0), HT3 (16,0), HT46 (16,0) y JJT18 (16,0). Los genotipos con menores Brix fueron BF95, ICV9 e IC38 (Tabla 1-15).

El modelo AMMI permitió agrupar los ambientes en tres grupos relativamente homogéneos: el grupo 1 incluyó los ambientes Espinal y Villavicencio; el grupo 2 los ambientes Cereté y Codazzi; y el grupo 3 los ambientes Gaitán y Palmira (Figura 1-14). Dentro de estos grupos de ambientes los genotipos de sorgo fueron clasificados en forma similar por su concentración de azúcares. Los ambientes Codazzi y Villavicencio fueron los de mayor contribución en la variación total de la interacción GA para los valores Brix. En estos ambientes los rangos en Brix entre los genotipos fueron los más amplios, lo que indicaría que los ambientes Codazzi y Villavicencio permitirían discriminar mejor los genotipos de sorgo dulce por su capacidad para concentrar azúcares en el jugo. Las condiciones ambientales presentes en Espinal, Palmira y Gaitán fueron favorables para que los genotipos logaran una mayor concentración de azúcares (Brix) en el tallo, 16,4, 17,3 y 15,1, respectivamente. Mientras que en las localidades de Cereté y Codazzi el

ambiente fue menos favorable para Brix en los genotipos de sorgo dulce, 10,7 y 12,8, respectivamente (Tabla 1-15).

Figura 1-14. Biplot AMMI para el valores Brix de genotipos de sorgo dulce en 6 ambientes, 2009-2010

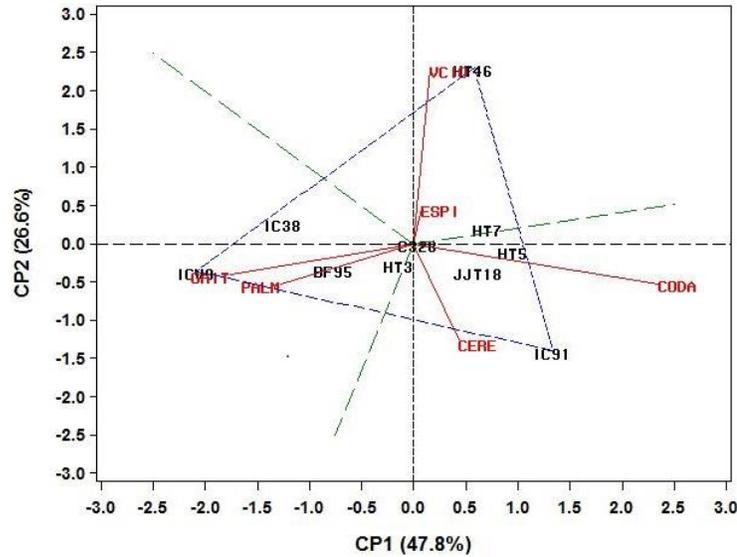
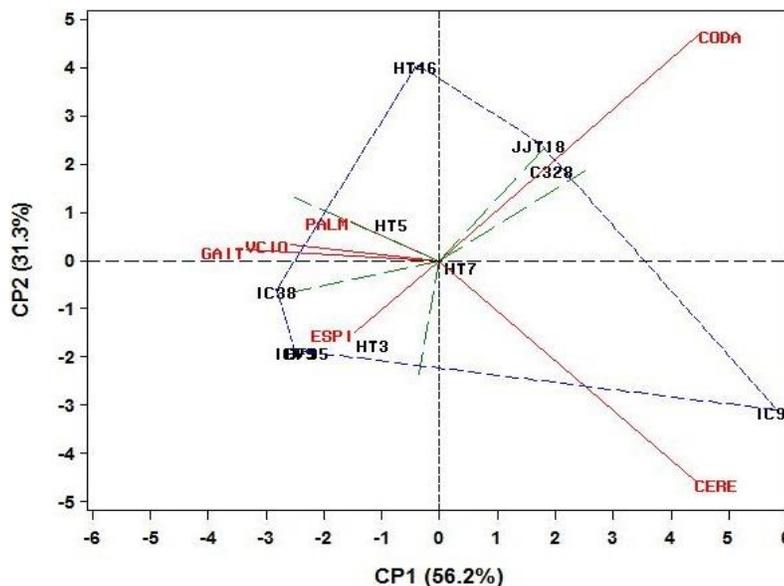


Tabla 1-15. Medias, valores mínimos y máximos, desviación estándar para valores Brix (grados) en genotipos de sorgo dulce bajo seis localidades, 2009-2010.

Genotipo	Cereté	Codazzi	Espinal	Palmira	Gaitán	Villavicencio
(BF95) BF95-11/135	10,3	10,2	13,9	18,0	15,4	12,7
(C328) CEM328/3-3-1-1	9,4	15,9	17,7	16,7	19,3	14,2
(HT3) LASPHT-3	13,5	13,6	18,5	19,2	16,6	15,0
(HT46) LASPHT-46	10,5	14,1	19,0	17,0	14,5	21,3
(HT5) LASPHT-5	10,2	13,5	18,7	16,4	10,9	12,1
(HT7) LASPHT-7	11,8	15,4	16,1	17,6	14,6	15,9
(IC38) ICSB38	6,0	7,9	14,5	16,1	15,5	11,3
(IC91) ICSR91005	14,6	16,9	16,5	16,7	14,0	11,9
(ICV9) ICSV95126	8,1	4,0	13,3	17,4	14,7	9,8
JJT18	12,2	16,4	15,7	18,3	16,0	14,9
Media	10,7	12,8	16,4	17,3	15,1	13,9
Mínimo	5,1	2,7	10,8	14,1	8,7	8,7
Máximo	16,1	18,4	20,3	20,7	20,1	22,7
D. Estándar	2,6	4,2	2,3	1,5	2,2	3,2

En la Figura 1-15 se observa la representación gráfica de la contribución de los genotipos y ambientes a la interacción para el contenido de azúcares en el tallo (g planta^{-1}). Los genotipos que presentaron la menor interacción y, por tanto, un comportamiento estable en contenido de azúcares en el tallo, fueron HT5 y HT7. Los genotipos HT46, JJT18, ICV9, IC91, e IC38 formaron el polígono de variación y fueron los que presentaron mayor diferenciación en el contenido de azúcares a través de los ambientes. En Codazzi los genotipos HT46 y JJT18 obtuvieron los mayores contenido de azúcares ($80,8 \text{ g planta}^{-1}$ y $85,5 \text{ g planta}^{-1}$, respectivamente), mientras que en el Espinal alcanzaron los valores más bajos ($25,3 \text{ g planta}^{-1}$ y $25,6 \text{ g planta}^{-1}$, respectivamente) (Tabla 1-16). Por otra parte, el genotipo IC91 presentó los valores más altos en contenido de azúcares en Cereté ($88,8 \text{ g planta}^{-1}$) y los menores contenidos los alcanzó en Gaitán ($18,2 \text{ g planta}^{-1}$). El genotipo C328 presentó el mayor contenido de azúcares en Codazzi ($59,6 \text{ g planta}^{-1}$) y su menor valor en Villavicencio ($14,4 \text{ g planta}^{-1}$). En promedio, los mayores contenidos de azúcares en el tallo fueron encontrados en los genotipos HT7 ($47,7 \text{ g planta}^{-1}$), HT46 ($51,8 \text{ g planta}^{-1}$), IC91 ($43,3 \text{ g planta}^{-1}$) y JJT18 ($51,3 \text{ g planta}^{-1}$), mientras que los valores más bajos fueron alcanzados por BF95 ($24,9 \text{ g planta}^{-1}$), ICV9 ($14,7 \text{ g planta}^{-1}$) e IC38 ($16,6 \text{ g planta}^{-1}$).

Figura 1-15. Biplot AMMI para el contenido de azúcares (g planta^{-1}) de genotipos de sorgo dulce en 6 ambientes, 2009-2010.



El modelo AMMI permitió agrupar los ambientes en cuatro grupos relativamente homogéneos: El grupo 1 incluyó el ambiente Codazzi; el grupo 2 el ambiente Cereté; el grupo 3 el ambiente Espinal; y el grupo 4 los ambientes Gaitán, Palmira y Villavicencio (Figura 1-15). Las localidades de Codazzi, Palmira y Cereté se distinguieron por presentar los valores más altos en contenido de azúcares, 47,6 g planta⁻¹, 44,8 g planta⁻¹ y 39,6 g planta⁻¹, respectivamente. Mientras que en las localidades de Villavicencio, Gaitán y Espinal se observaron los menores valores en contenido de azúcares, 29,6 g planta⁻¹, 28,3 g planta⁻¹ y 20,5 g planta⁻¹, respectivamente (Tabla 1-16). Los ambientes Cereté y Codazzi fueron los de mayor contribución en la variación total de la interacción GA para el contenido de azúcares en el tallo, o sea fueron los ambientes donde se presentó mayor discriminación en contenido de azúcares entre los genotipos.

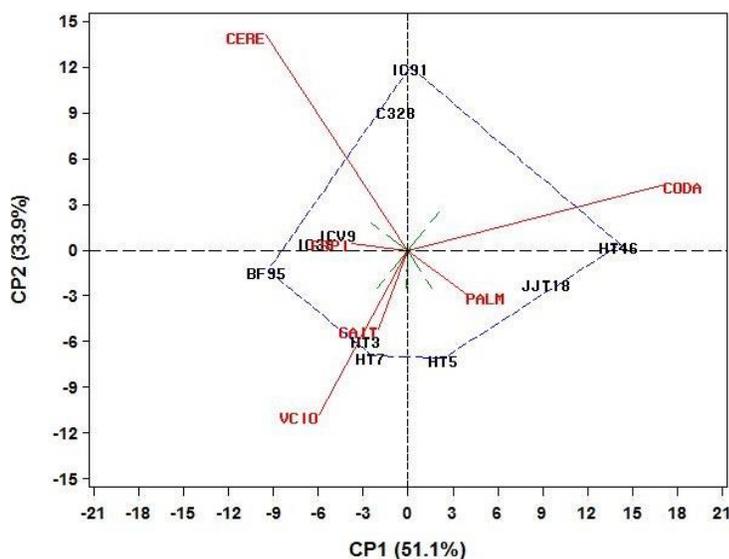
En Codazzi se distinguieron por su contenido de azúcares los genotipos JJT18 (81,5 g planta⁻¹), HT46 (80,8 g planta⁻¹), IC91 (67,0 g planta⁻¹), HT7 (60,9 g planta⁻¹) y C328 (59,6 g planta⁻¹). El valor más alto de contenido de azúcares (88,8 g planta⁻¹) lo presentó el genotipo IC91 en las condiciones ambientales de Cereté (Tabla 1-16). En las condiciones ambientales de Espinal los genotipos con mayores contenidos de azúcares fueron HT7 (33,6 g planta⁻¹), HT3 (32,2 g planta⁻¹), JJT18 (25,6 g planta⁻¹), HT46 (25,3 g planta⁻¹) e IC91 (22,2 g planta⁻¹).

Tabla 1-16. Medias, valores mínimos y máximos, desviación estándar para contenidos de azúcares en el tallo (g planta⁻¹) de genotipos de sorgo dulce bajo seis localidades, 2009-2010.

Genotipo	Cereté	Codazzi	Espinal	Palmira	Gaitán	Villavicencio
(BF95) BF95-11/135	29,5	18,0	11,0	37,9	29,0	23,8
(C328) CEM328/3-3-1-1	28,3	59,6	15,7	20,3	18,1	14,4
(HT3) LASPHT-3	48,8	41,5	32,2	48,6	37,1	41,7
(HT46) LASPHT-46	37,7	80,8	25,3	68,9	51,2	46,7
(HT5) LASPHT-5	28,2	45,3	24,1	48,0	21,3	30,7
(HT7) LASPHT-7	53,8	60,9	33,6	57,4	31,2	49,1
(IC38) ICSB38	11,2	14,3	8,5	27,7	21,9	15,8
(IC91) ICSR91005	88,8	67,0	22,2	44,2	18,2	19,5
(ICV9) ICSV95126	16,8	7,2	6,8	28,2	17,4	12,0
JJT18	53,4	81,5	25,6	67,1	37,4	42,8
Media	39,6	47,6	20,5	44,8	28,3	29,6
Mínimo	8,2	4,8	3,5	18,7	7,6	7,6
Máximo	119,6	99,4	44,0	79,7	85,3	57,0
D. Estándar	23,6	27,7	11,1	17,9	14,1	15,1

En la Figura 1-16 se observa la representación gráfica de la contribución de los genotipos y ambientes a la interacción para volumen de jugo en el tallo (ml planta⁻¹), considerando los dos primeros ejes del análisis de componentes principales.

Figura 1-16. Biplot AMMI para el volumen de jugo en el tallo de genotipos de sorgo dulce en 6 ambientes, 2009-2010.



Los genotipos que presentaron la menor interacción y, por tanto, un comportamiento estable en el volumen de jugo en el tallo, fueron ICV9 e IC38. Los genotipos IC91, HT46, HT5, HT7 y BF95 formaron el polígono de variación y fueron los que mayor variación presentaron en el volumen de jugo a través de los ambientes (Figura 1-16). Los genotipos HT46 y JJJ18 presentaron los mayores volúmenes de jugo en Codazzi (793 planta⁻¹ y 797 planta⁻¹, respectivamente), mientras que los valores más bajos de jugo fueron obtenidos en Cereté (Tabla 1-17). Los genotipos HT3 (477 ml planta⁻¹) y HT7 (497 ml planta⁻¹) presentaron los más altos volúmenes de jugo en Villavicencio y los menores valores en Cereté (203 ml planta⁻¹ y 213 ml planta⁻¹, respectivamente). En promedio, los genotipos de sorgo que presentaron los mayores volúmenes de jugo fueron HT5 (356 ml planta⁻¹), HT7 (382 ml planta⁻¹), HT46 (342 ml planta⁻¹) y JJJ18 (465 ml planta⁻¹), mientras los de menor volumen fueron C328 (154 ml planta⁻¹), ICV9 (174 ml planta⁻¹) y IC38 (198 ml planta⁻¹).

El modelo AMMI permitió agrupar los ambientes en cuatro grupos relativamente homogéneos: el grupo 1 incluyó el ambiente Cereté; el grupo 2 los ambientes Codazzi y Palmira; el grupo 3 los ambientes Gaitán y Villavicencio; y el grupo 4 el ambiente Espinal (Figura 1-16). Los ambientes Cereté y Codazzi y Villavicencio fueron los de mayor contribución en la variación total de la interacción GA para el volumen de jugo en el tallo. En estos ambientes los rangos de volumen de jugo entre los genotipos fueron los más amplios, lo que indicaría que los ambientes de Cereté, Codazzi y Villavicencio permitirían discriminar mejor los genotipos de sorgo dulce por su capacidad para acumular azúcares en el tallo. Las localidades de Codazzi, Palmira y Villavicencio se distinguieron por presentar los valores más altos en el volumen de jugo, 463 ml planta⁻¹, 338 ml planta⁻¹ y 336 ml planta⁻¹, respectivamente. Mientras que en las localidades de Gaitán, Cereté y Espinal se observaron los menores valores en volumen de jugo, 271 ml planta⁻¹, 228 ml planta⁻¹ y 162 ml planta⁻¹, respectivamente (Tabla 1-17).

Tabla 1-17. Medias, valores mínimos y máximos, desviación estándar para el volumen de jugo en el tallo (ml planta⁻¹) de genotipos de sorgo dulce bajo seis localidades, 2009-2010.

Genotipo	Cereté	Codazzi	Espinal	Palmira	Gaitán	Villavicencio
(BF95) BF95-11/135	267	243	99	280	302	343
(C328) CEM328/3-3-1-1	201	359	81	112	80	94
(HT3) LASPHT-3	203	441	214	340	314	477
(HT46) LASPHT-46	135	723	137	463	370	223
(HT5) LASPHT-5	182	538	157	435	328	494
(HT7) LASPHT-7	213	471	324	425	362	497
(IC38) ICSB38	193	247	72	229	208	240
(IC91) ICSR91005	450	561	176	360	186	289
(ICV9) ICSV95126	156	248	64	207	181	192
JJT18	281	797	296	526	377	516
Media	228	463	162	338	271	336
Mínimo	38	185	42	79	52	74
Máximo	550	970	400	605	490	706
D. Estándar	127,9	206,0	93,5	136,9	125,5	169,9

En Codazzi se distinguieron por su volumen de jugo en el tallo los genotipos JJT18 (797 ml planta⁻¹), HT46 (723 ml planta⁻¹), IC91 (561 ml planta⁻¹), HT5 (538 ml planta⁻¹) y HT7

(471 ml planta⁻¹) (Tabla 1-17). En las condiciones ambientales de Espinal los genotipos con mayores volúmenes de jugo en el tallo fueron HT7 (324 ml planta⁻¹), JJT18 (296 ml planta⁻¹), HT3 (214 ml planta⁻¹), IC91 (176 ml planta⁻¹) y HT5 (157 ml planta⁻¹).

▪ **Composición tallo y cuantificación azúcares en el jugo.** Diferencias estadísticas ($P < 0.01$) entre genotipos fueron encontradas en el porcentaje de humedad en el tallo, materia seca, fibra, valores Brix, sacarosa, glucosa y fructosa (Anexo 1-5).

Los tallos en los genotipos de sorgo dulce en la localidad de Palmira presentaron una humedad entre 63,8% y 70,6% y materia seca entre 29,4% a 36,2% (Tabla 1-18). Los genotipos con mayor humedad en el tallo fueron BF95 (70,6%), HT5 (67,8%) y JJT18 (69,4%), mientras que los genotipos con mayores contenidos de materia seca fueron HT3 (35,5%), HT7 (34,5%) y HT46 (36,2%).

El análisis de la materia seca del tallo permitió encontrar que está conformada por fibra, entre 15,0% a 22,7% y sólidos solubles (Brix) con valores de 13,5% a 15,7% (Tabla 1-18). Los mayores porcentajes de fibra se encontraron en los genotipos HT46 (22,7%) y HT3 (20,2%), HT7 (18,8%) y HT5 (18%).

Tabla 1-18. Medias, valores mínimos y máximos para el porcentaje de humedad en el tallo (Hum), materia seca (Mseca), fibra (Pfibra), Brix, sacarosa (Saca), glucosa (Gluc) y fructosa (Fruct) en genotipos de sorgo dulce en Palmira, 2009.

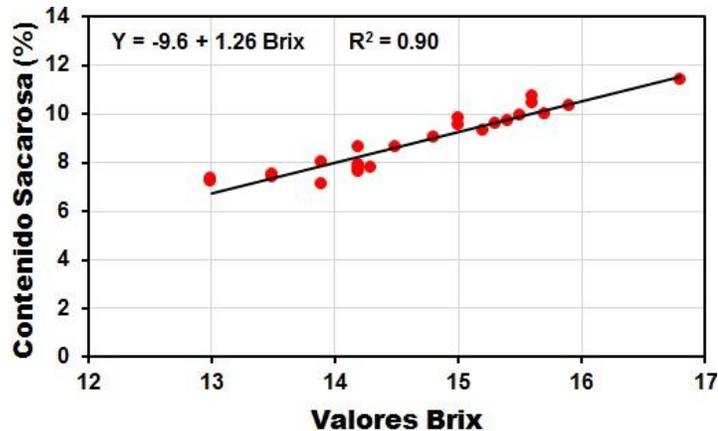
Genotipo	Hum	Mseca	Pfibra	Brix	Saca	Gluc	Fruct
(BF95) BF95-11/135	70,6	29,4	15,0	14,4	8,4	2,0	2,2
(HT3) LASPHT-3	64,5	35,5	20,1	15,4	10,1	1,5	1,7
(HT46) LASPHT-46	63,8	36,2	22,7	13,5	7,6	2,0	2,2
(HT5) LASPHT-5	67,8	32,2	18,0	14,2	7,7	2,1	2,2
(HT7) LASPHT-7	65,5	34,5	18,8	15,7	10,1	1,7	1,8
JJT18	69,4	30,6	15,7	14,9	9,1	1,8	1,9
Mínimo	63,8	29,4	15,0	13,5	7,6	1,5	1,7
Máximo	70,6	36,2	22,7	15,7	10,1	2,1	2,2
DMS ¹ (0.05)	3,40	3,40	2,60	1,00	1,30	0,27	0,26

¹ DMS=Diferencia Mínima Significativa ($P < 0,05$)

La cuantificación de la composición de azúcares en los sólidos solubles (Brix) disueltos en el jugo del sorgo dulce indicó que la sacarosa era el compuesto dominante (7,6% a 10,1%). Proporciones menores de glucosa (1,5% a 2,1%) y fructosa (1,7% a 2,2%) fueron reportadas en el jugo (Tabla 1-18). Los mayores contenidos de sacarosa fueron observados en los genotipos de sorgo HT3 (10,1%) y HT7 (10,1%).

Los contenidos de sacarosa determinados en el jugo de los genotipos de sorgo dulce presentaron una relación lineal positiva con los valores de Brix (Figura 1-17). Los resultados confirmaron la utilidad de la determinación de valores Brix en el jugo como una de las variables de interés para la selección de genotipos de sorgo dulce por rendimiento de azúcares.

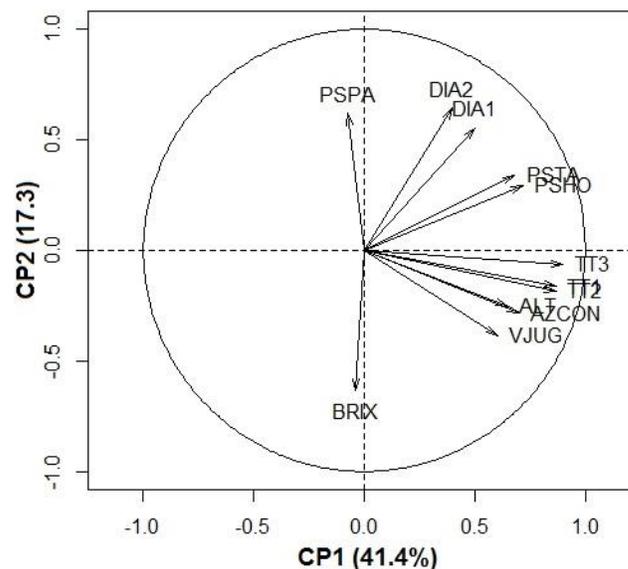
Figura 1-17. Relación entre los sólidos solubles (Brix) disueltos en el jugo del tallo con el contenido de sacarosa en genotipos de sorgo dulce. Palmira, 2009.



Relación entre el contenido de azúcares y variables agronómicas. El análisis de componentes principales de las variables agronómicas reveló que los dos primeros componentes principales explicaban el 58,7% de la variación total. El CP1 explicó el 41,4% de la variación total, mientras que el CP2 explicó el 17,3%. La representación gráfica de los dos componentes principales indicó la presencia de correlaciones positivas entre contenidos de azúcares (g planta^{-1}) con la biomasa de tallos y hojas, la altura de planta, el volumen de jugo y la duración de las tres fases de crecimiento del cultivo (Figura 1-18). En la gráfica el coseno del ángulo entre los vectores se aproxima al coeficiente de correlación entre las variables, entre más cercanos los vectores mayor la asociación es alta y positiva.

Los valores Brix presentaron correlaciones positivas bajas con el volumen de jugo en el tallo, el contenido de azúcares y la altura de planta (Figura 1-18). Se encontró una correlación negativa entre los valores Brix y la biomasa de la panoja en los genotipos, indicando la presencia de una competencia de fotoasimilados entre vertederos (Figura 1-18).

Figura 1-18. Correlación entre Brix, contenido de azúcares (AZCON), peso seco tallos (PSTA), peso seco hojas (PSHO), peso seco panoja (PSPA), volumen de jugo (VJUG), altura de planta (ALT), diámetro basal (DIA1), 5^{to} entrenudo (DIA2), y acumulación grados día fa fases vegetativa (TT1), reproductiva (TT2) y madurez fisiológica (TT3) en genotipos de sorgo dulce evaluados en 6 ambientes, 2009-2010.



Se observaron correlaciones positivas entre la producción de biomasa en el tallo y el diámetro del tallo, el peso seco de las hojas, la altura de planta, el volumen de jugo y la duración de las fases de crecimiento (Figura 1-18).

Clasificación edafoclimática. Se presentaron correlaciones significativas entre las variables edafoclimáticas (Anexo 1-6). El pH del suelo se constituyó en un indicador de la fertilidad del suelo al presentar correlaciones positivas y significativas con los contenidos de P (0,82**), S (0,78**), Ca (0,80**), Mg (0,58**), K (0,66**), Cu (0,61**), Mn (0,52**), Zn (0,62**) y B (0,84**). En el estado de crecimiento GS2 la temperatura máxima presentó

correlaciones significativas con el pH del suelo (0,83**), el contenido de P (0,71**), K (0,66**), Na (0,93**), Cu (0,86**), B (0,86**), la temperatura máxima en GS1 (0,83**) y en GS3 (0,88**) y en el estado de crecimiento GS2 con la amplitud térmica (0,56**), la radiación solar (0,87**), la evapotranspiración de referencia (0,88**) y el número de días secos (0,79**).

Las 46 variables edafoclimáticas se agruparon en cinco componentes principales con valores propios superiores a uno (Anexo 1-7). Estos cinco componentes explicaron el 94,7% de la variabilidad total. En los dos primeros componentes se agruparon 23 variables con mayor aporte a la variación total entre los ambientes, de las cuales 18 correspondieron a variables climáticas.

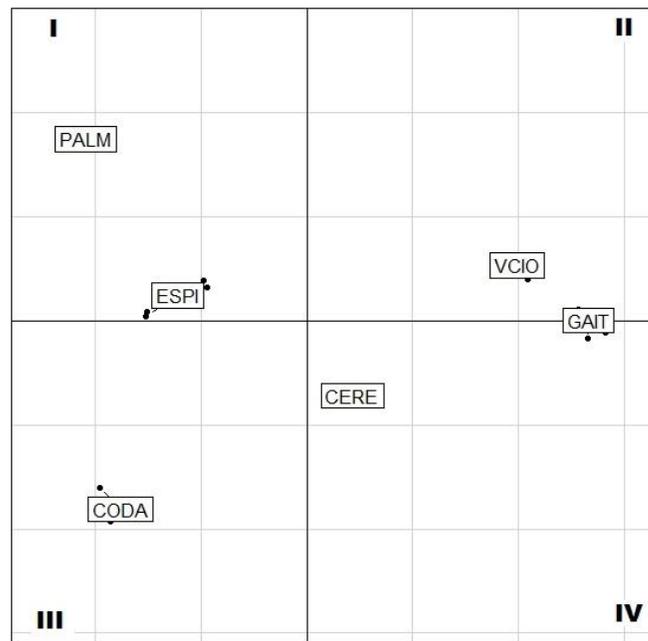
En el primer componente principal (CP1), el cual explico el 48,8% de la variación total observada, se destacaron las temperaturas máximas presentes durante los estados de crecimiento GS2 y GS3, la amplitud térmica en GS2, la precipitación acumulada, el número de días con lluvia y el número de días secos durante los estados GS1, GS2 y GS3, la humedad relativa en los tres estados de crecimiento y los contenidos de P, el pH y la acidez intercambiable en el suelo (Anexo 1-7). En el segundo componente principal se destacaron las temperaturas mínimas promedias durante los estados GS1, GS2 y GS3 y los contenidos de Mg e Fe en el suelo (Anexo 1-7).

El análisis de conglomerado ordenó en un mismo cuadrante a los ambientes de Palmira y Espinal, los cuales se caracterizaron por presentar un mayor número de días secos durante los estados de crecimiento GS2 y GS3, menores valores acumulados de precipitación y temperaturas mínimas bajas durante GS2. Los ambientes de Gaitán y Villavicencio se caracterizaron por presentar durante GS1, GS2 y GS3 valores bajos de temperatura máxima, un menor número de días secos, mayores valores de precipitación, suelos con pH fuertemente ácidos y contenidos bajos de Mg (Figura 1-19).

La localidad de Codazzi ubicada en el tercer cuadrante se distinguió por presentar los mayores valores de temperaturas máximas y mínimas durante los estados GS1, GS2 y GS3, un número alto de días secos durante GS2 y suelo con pH ligeramente alcalino y contenidos altos de P. Esta localidad junto con Cereté fueron las más alejadas del Ecuador, con latitudes de 10° 0.8'N y 8° 50.98'N, respectivamente. Cereté, al igual que

Codazzi, presentó valores altos de temperatura mínima durante los tres estados de crecimiento. Sin embargo, la precipitación en Cereté presentó una mejor distribución durante los estados de crecimiento GS1, GS2 y GS3, con presencia de menores días secos.

Figura 1-19. Clasificación zonas de estudio a partir de las variables edafoclimáticas, 2009-2010.



Efecto de variables ambientales sobre concentración azúcares en el jugo y contenido azúcares en el tallo. Se buscó un modelo de regresión lineal que permitiera seleccionar un conjunto de variables ambientales (clima y suelo) capaz de predecir la concentración de azúcares en el jugo (Brix), el contenido de azúcares en el tallo y la producción de biomasa de tallos. Para el análisis de regresión lineal se incluyeron las variables de clima y suelo seleccionadas por el análisis de componentes principales eliminando las variables redundantes. El método de selección del intercepto y coeficiente de las propiedades fue por medio de la opción por Pasos hacia Atrás y hacia Adelante (Backward and Forward Step Wise) usando el criterio de información bayesiano (STEP BIC) para la elección del modelo en el paquete estadístico R. Para evaluar la calidad del modelo se utilizó la prueba de Breusch-Pagan para constatar la hipótesis de

homocedasticidad de los errores y la prueba de Shapiro-Wilk para comprobar la normalidad en los residuales.

Concentración azúcares en el jugo (Brix). El modelo general construido de manera integral a partir de las variables de clima y suelo (Tabla 1-19), explicó la variabilidad en la concentración de azúcares en el jugo (Brix) en un 67,0%, con un valor $P < 0,01$. Al analizar los coeficientes del modelo de regresión se encontró que las diferencias en la concentración de azúcares en el jugo (Brix) reportadas por los genotipos en los diferentes ambientes de evaluación estaban relacionada con las variaciones de las condiciones climáticas. Las variables climáticas relacionadas con la evapotranspiración del cultivo (ETc) en las tres fases de crecimiento, el número de días con lluvia (NDLL) en GS2 y GS3, el número de días secos (NDS) en las tres etapas de crecimiento, la temperatura máxima (TMAX) en GS3 y las temperaturas mínimas (TMIN) durante las etapas GS2 y GS3, contribuyeron a explicar una gran parte de la variabilidad observada en la concentración de azúcares en el jugo de los genotipos de sorgo dulce (Tabla 1-19).

Tabla 1-19. Modelo de regresión explicativo de la concentración de azúcares (Brix) en el jugo del tallo de genotipos de sorgo dulce, construido a partir de variables ambientales (clima y suelo).

Variables	Coefficiente	Error Estándar	Valor t
β_0^1	-94,92	27,86	-3,40 **
ETc1	0,15	0,03	4,45 **
ETc2	0,41	0,07	6,19 **
ETc3	-0,42	0,07	-5,82 **
HR1	1,68	0,18	9,18 **
NDLL2	-1,69	0,28	-6,07 **
NDLL3	1,47	0,24	6,11 **
NDS1	-0,40	0,12	-3,47 **
NDS2	-1,83	0,35	-5,17 **
NDS3	2,32	0,36	6,47 **
TMAX3	2,25	0,52	4,31 **
TMIN2	-4,56	0,63	-7,29 **
TMIN3	2,69	0,53	5,09 **
R ² ajustado	0,67		
Homocedasticidad	33,3 **		

Normalidad 0,99 ns

[†] Intercepto.

Del grupo de variables mencionadas anteriormente las de mayor contribución a la acumulación de azúcares en el tallo (Brix) fueron las temperaturas mínimas durante la fase reproductiva (TMIN2=-4,56) y de llenado de grano (TMIN3=2,69), la temperatura máxima durante GS3 (TMAX3=2,25) y el número de días secos durante GS2 (NDS2=-1,83) y GS3 (NDS3=2,32).

Los ambientes con temperaturas mínimas bajas y menor número de días secos durante el estado de crecimiento GS2 y temperaturas máximas y mínimas altas junto con mayor NDS en el estado GS3 favorecieron la concentración de azúcares en el jugo de los genotipos de sorgo.

▪ **Contenido de azúcares en el tallo.** El modelo general construido de manera integral a partir de las variables de clima y suelo (Tabla 1-20), explicó la variabilidad en el contenido de azúcares en el tallo en un 68,0%, con un valor $P < 0,01$. Al analizar los coeficientes del modelo de regresión se encontró que las diferencias en los contenidos de azúcares reportadas por los genotipos en los diferentes ambientes de evaluación estaban relacionada con las variaciones en algunas propiedades químicas del suelo y variables climáticas. Los contenidos de Ca, Cu y Mg en el suelo, junto con evapotranspiración del cultivo (ETc) en GS2 (ETc2) y GS3 (ETc3), la humedad relativa en el periodo GS1 (HR1) y GS3 (HR3), el número de días con lluvia en GS1 y GS3, el número de días secos en las etapas GS2 y GS3, la radiación solar acumulada en GS1, GS2 y GS3, la radiación solar promedio en la fase GS1, las temperatura máxima en la fase GS1 y GS3 y la temperatura mínima durante la etapas GS2, contribuyeron a explicar una gran parte de la variabilidad observada en el contenido de azúcares en el tallo de los genotipos de sorgo dulce (Tabla 1-20).

Las variables ambientales de mayor contribución en la variación en el contenido de azúcar en los genotipos de sorgo fueron el contenido de Ca (47.26) y Magnesio (58.51) en el suelo y las temperaturas máximas en la fase GS1 (-89.5) y GS3 (30.02), la temperatura mínima durante el estado de crecimiento GS2 (-38.41) y el número de días secos durante GS3 (29.88).

Los ambientes que presentaron suelos con mayores contenidos de calcio y magnesio, temperaturas máximas bajas durante la fase vegetativa (TMAX1) y altas en la fase de llenado de grano (TMAX3), temperaturas mínimas bajas durante la fase reproductiva (TMIN2) y mayor número de días secos (NDS3) en la fase de llenado de grano favorecieron un mayor contenido de azúcares (g planta^{-1}) en los genotipos de sorgo.

Tabla 1-20. Modelo de regresión explicativo del contenido de azúcares en el tallo de genotipos de sorgo dulce, construido a partir de variables ambientales (clima y suelo).

Variables	Coefficiente	Error Estándar	Valor t
β_0^1	687,13	826,92	2,83 **
Ca	47,26	7,34	-6,44 **
Cu	16,28	19,07	8,62 **
ETc2	-2,44	0,39	-6,30 **
ETc3	-5,11	0,92	-5,54 **
HR1	13,82	4,43	3,12 **
HR3	4,69	1,43	3,29 **
Mg	58,51	10,56	5,54 **
NDLL1	-2,93	1,01	-2,91 **
NDLL3	18,84	3,21	5,87 **
NDS2	8,72	1,29	6,75 **
NDS3	29,88	4,25	7,03 **
RAD3	16,62	3,53	4,71 **
RADS1	0,49	0,07	7,33 **
RADS2	0,08	0,01	5,60 **
RADS3	-0,10	0,03	-3,37 **
TMAX1	-89,50	19,34	-4,63 **
TMAX3	30,02	6,75	4,45 **
TMIN2	-38,41	12,21	-3,15 **
R ² ajustado	0,68		
Homoceadasticidad	158,7 **		
Normalidad	0,94 ns		

¹ Intercepto.

- Producción biomasa de tallos.** El modelo general construido de manera integral a partir de las variables de clima y suelo, explicó la variabilidad en la producción de biomasa en el tallo en un 85,0%, con un valor $P < 0,01$. Al analizar los coeficientes del modelo de regresión se encontró que las diferencias en la producción de biomasa de tallo reportadas por los genotipos en los diferentes ambientes de evaluación estaban

relacionada con las variaciones en algunas propiedades químicas del suelo y variables climáticas. El contenido de calcio en el suelo, junto con evapotranspiración del cultivo (ETc2) en la fase GS2, el número de días con lluvia en la fase GS1 (NDLL1) y GS3 (NDLL3), el número de días secos en las etapas GS1 (NDS1) y GS3 (NDS3), la radiación solar acumulada durante el periodo GS1 (RADS1) y GS2 (RADS2), la radiación solar promedia en la fase GS3 (RAD3), la temperatura máxima en la fase GS3 (TMAX3) y la temperatura mínima durante la etapas GS2 (TMIN2) y GS3 (TMIN3) contribuyeron a explicar una gran parte de la variabilidad observada en la producción de biomasa en el tallo de los genotipos de sorgo dulce (Tabla 1-21).

Tabla 1-21. Modelo de regresión explicativo de la producción de biomasa en el tallo de genotipos de sorgo dulce, construido a partir de variables ambientales (clima y suelo).

Variables	Coefficiente	Error Estándar	Valor t
β_0	-184,30	13,66	-13,49 **
Ca	0,79	0,16	-4,92 **
ETO2	-0,23	0,06	-3,70 **
NDLL1	4,09	0,29	13,94 **
NDLL3	1,50	0,17	8,81 **
NDS1	6,19	0,44	14,05 **
NDS3	0,70	0,12	5,74 **
RAD3	-1,29	0,27	-4,83 **
RADS1	-0,21	0,02	-8,29 **
RADS2	0,01	0,00	3,88 **
TMAX3	5,56	0,97	5,73 **
TMIN2	4,61	0,81	5,67 **
TMIN3	-5,75	1,18	-4,89 **
R ² ajustado	0,85		
Homocedasticidad	250,7 **		
Normalidad	0,92 ns		

¹ Intercepto.

Los ambientes que presentaron un balance entre el número de días con lluvias (NDLL1=4,09) y secos (NDS1=6,19) durante la fase vegetativa, temperaturas máximas altas durante (TMAX3=5,56), temperaturas mínimas altas (TMIN2=4,61) durante la fase reproductiva y temperaturas mínimas (TMIN3=-5,75) bajas durante la fase de llenado favorecieron una mayor producción de biomasa en el tallo en los genotipos de sorgo.

1.4 Discusión

El efecto de la interacción GA en el desarrollo fenológico, la acumulación de azúcares en el tallo y sus componentes y la identificación de las variables ambientales involucradas en la producción de azúcares fue estudiada en 10 genotipos de sorgo dulce sembrados en seis ambientes contrastantes.

- **Desarrollo fenológico.** La duración de las fases de crecimiento vegetativo (GS1), reproductivo (GS2) y llenado de grano (GS3) de los genotipos de sorgo dulce fue afectada por la constitución genética y las condiciones ambientales presentes durante el ciclo de crecimiento del cultivo. Los resultados no permitieron encontrar un valor único de acumulación de grados día que marcara el cambio del estado vegetativo al reproductivo y del reproductivo al llenado de grano en los genotipos de sorgo en los diferentes ambientes. Por el contrario el análisis indicó una gran variación en tiempo térmico explicada por el genotipo, el ambiente y la interacción GA. Los genotipos de sorgo (HT3, HT5, HT7, HT46 y JJT18) seleccionados para las condiciones ambientales de Colombia presentaron en términos generales una mayor acumulación de grados día en casi todos los ambientes, comparados con los genotipos introducidos.

En los ambientes de Cereté y Codazzi en donde se esperaban encontrar una menor duración de las fases de crecimiento GS1, GS2 y GS3 de los genotipos de sorgo por presentar valores altos en las temperaturas mínimas y máximas, fueron en donde se alcanzaron los mayores valores de grado día. Mientras que en Palmira con condiciones de temperaturas mínimas y máximas más favorables para una mayor duración de las fases de crecimiento, la mayoría de los genotipos obtuvieron una menor duración en tiempo térmico. La diferencia en la duración de las fases de crecimiento de los genotipos entre los ambientes podría haber sido ocasionada por el estrés hídrico que se presentó durante el ciclo de crecimiento de los genotipos en Palmira y Espinal que alteró las predicciones de desarrollo fenológico del modelo de tiempo térmico.

Poornima *et al.* (2010) encontraron variación en el tiempo térmico requerido por la variedad de sorgo dulce SSV84 para completar cada una de las fases de crecimiento sembrada en diferentes épocas de siembra. Las unidades de grados día acumuladas para alcanzar cada una de las fases variaron con el retraso en la ventana de siembra.

En el cultivo de sorgo el desarrollo fenológico responde a estímulos ambientales que le permite controlar el momento de la floración de manera que su etapa reproductiva ocurra en una estación determinada (Hammer *et al.*, 1989; Major *et al.* 1990). Algunos investigadores, han indicado que en el cultivo de sorgo la duración del estado vegetativo desde emergencia a iniciación floral es controlado por el fotoperiodo y la temperatura, mientras que la duración del estado GS2 y GS3 es solo controlada por la temperatura Huda *et al.*, 1984; Huda, 1987; Ritchie y Alagarswamy, 1988; Hammer *et al.*, 1989; Major *et al.* 1990). Sin embargo, la disponibilidad de agua y nutrientes pueden reducir y/o acelerar la tasa de desarrollo fenológico de los cultivos. Donatelli *et al.* (1992) observaron una reducción en el tiempo térmico en seis genotipos de sorgo sometidos a estrés hídrico durante la fase reproductiva. Azam-Ali y Squire (2002) indicaron que el concepto de tiempo térmico era válido en un rango amplio de condiciones ambientales, pero que podría ser alterado por condiciones de estrés hídrico. McMaster *et al.* (2005) sugirieron incluir la respuesta específica del genotipo al estrés hídrico en los modelos de grados día (con o sin la incorporación del fotoperiodo).

En el caso del genotipo C328 la mayor acumulación de tiempo térmico requerida para completar las fases GS1 y GS2 presentada en los ambientes de Cereté y Codazzi probablemente se debió a un efecto combinado de temperatura y sensibilidad al fotoperiodo presente durante el estado GS1. Las horas luz/día registradas durante la fase vegetativa en las localidades de Cereté, Codazzi, Espinal, Palmira, Gaitán y Villavicencio fueron 12,6, 12,7, 12,3, 12,3, 12,3 y 12,2, respectivamente. Miller (1968) encontró respuestas al fotoperiodo (longitud del día) en minutos en variedades de sorgo sembradas durante el año en condiciones tropicales.

▪ **Variables de crecimiento.** La altura de planta de los genotipos de sorgo fue afectada por la constitución genética (71,9% explicación variación total) con una menor contribución del ambiente (14,4%) y de la interacción GA (8,5%). La menor contribución del ambiente a la variación observada en la expresión de la altura de planta en los genotipos estudiados sugiere que esta característica estaría bajo el control de pocos genes. Reddy *et al.* (2005) indicaron que la altura de planta en el cultivo de sorgo era controlada por cuatro loci con acción génica no aditiva por lo que se podría explotar la heterosis en la formación de híbridos para este atributo de la planta.

Los mayores promedios de altura de planta fueron encontrados en los genotipos de sorgo seleccionados en Colombia (HT3, HT5, HT7, HT46 y JJT18), los cuales a su vez presentaron una mayor acumulación de grados día en las fases de crecimiento vegetativo (etapa en donde se determina el número hojas y entrenudos del tallo) y reproductivo (periodo durante el cual ocurre la expansión de las hojas y el crecimiento de los entrenudos). En los ambientes de Cereté y Codazzi las condiciones de fertilidad media y alta del suelo, respectivamente, aunado a un balance hídrico favorable durante estas dos fases de crecimiento permitieron a la mayoría de los genotipos asignar suficientes asimilados para la formación y crecimiento de los entrenudos lo que conllevó a su mayor altura. En Espinal y Palmira el déficit hídrico prevalente durante el estado de crecimiento GS2 ocasionó una reducción en la elongación de los entrenudos y por lo tanto una reducción en la altura de planta en todos los genotipos.

Lingle (1987) y Massacci *et al.* (1996) reportaron que el estrés hídrico en el sorgo dulce ocasionaba una reducción en la elongación de los entrenudos como resultado de una reducción en la actividad de las enzimas hidrolíticas responsables de la degradación de los azúcares, lo que a su vez estimuló la acumulación de sacarosa en los tallos.

Los genotipos introducidos C328 e IC91 encontraron en las localidades de Cereté y Codazzi condiciones ambientales que favorecieron una mayor duración de las fases de crecimiento GS1 y GS2 lo que conllevó a la expresión de una mayor altura de la planta en estas localidades.

El diámetro basal y del quinto entrenudo de los genotipos de sorgo dulce fue afectado por las condiciones ambientales y la interacción GA, lo que indicaría que estas características estarían gobernadas por varios loci con pequeños efectos mostrando varianzas aditivas dominantes y/o epistáticas. Resultados similares fueron reportados por Makanda *et al.* (2012) quienes encontraron una alta contribución del ambiente y la interacción GA en la variación total observada en el diámetro del entrenudo medio del tallo en híbridos de sorgo dulce evaluados en ocho ambientes.

Los genotipos HT46, IC91 y JJT18 se distinguieron por presentar en promedio los mayores valores en el diámetro del quinto entrenudo (17 mm, 16 mm y 16 mm, respectivamente). Las condiciones de fertilidad de suelo y un balance hídrico favorable en los estados GS1 y GS2 en Cereté y Codazzi permitieron obtener valores altos en

diámetro basal y del quinto entrenudo en los genotipos de sorgo. Makanda et al. (2009) reportaron correlaciones positivas entre el número de días a floración con la altura de planta (0.67**) y diámetro del tallo (0.42**) en 80 variedades de sorgo dulce.

▪ **Rendimiento de biomasa de tallos.** La producción de tallos de los genotipos de sorgo dulce fue afectada por la constitución genética (25.1%) las condiciones ambientales (53,7% de la variación total) y la interacción GA (18,3%). Los genotipos de sorgo HT3 (16,3 t ha⁻¹), HT46 (16,4 t ha⁻¹), HT5 (17,1 t ha⁻¹), HT7 (18,1 t ha⁻¹) y JJT18 (19,1 t ha⁻¹), seleccionados por su capacidad de producción y adaptación a las condiciones ambientales del trópico bajo colombiano, sobresalieron en promedio por su mayor producción de biomasa de tallos. El ambiente en Cereté y Codazzi favoreció una alta acumulación de carbohidratos en el tallo en la mayoría de los materiales y una mejor discriminación de los genotipos, mientras que en Gaitán y Villavicencio se registraron los menores rendimientos. Los genotipos introducidos C328 (24,3 t ha⁻¹) e IC91 (21,6 t ha⁻¹) encontraron en Cereté condiciones ambientales favorables para una mayor acumulación de carbohidratos en el tallo.

En Cereté y Codazzi los genotipos presentaron una mayor duración de las fases de crecimiento GS1 y GS2 y estuvieron expuestos a condiciones favorables de precipitación durante el ciclo de crecimiento del cultivo, sin excesos y/o déficits, mayores valores en radiación total diaria, temperaturas máximas y mínimas altas y suelos con fertilidad media a alta. Estas condiciones permitieron a los genotipos de sorgo la formación de vertederos de mayor tamaño (tallos) con alta demanda por asimilados y la expansión y duración de un área foliar grande con capacidad de producir fotosintatos para mantener la demanda. Los menores valores de biomasa de tallo obtenidos por los genotipos en los ambientes de Gaitán y Villavicencio fueron ocasionados por su siembra en suelos de baja fertilidad, una menor radiación solar diaria y exceso de precipitación prevalente durante los estados de crecimiento GS2 y GS3 que afectaron probablemente la expansión del área foliar, la capacidad de la fuente para producir fotosintatos y la elongación del tallo reduciendo la capacidad de este vertedero para demandar y almacenar carbohidratos. De igual forma, las condiciones de estrés hídrico durante las fases GS2 y GS3 de los genotipos en los ambientes de Espinal y Palmira redujeron la acumulación de carbohidratos en el tallo.

La sensibilidad del sorgo dulce al estrés hídrico depende del estado de desarrollo (Orchard y Jessop, 1984). El anegamiento temporal durante el estado vegetativo e inicios de la fase reproductiva en las variedades de sorgo dulce Keller y Bailey ocasionaron reducciones significativas en la producción de biomasa, el área foliar, la tasa fotosintética, la conductancia estomática y la transpiración (Promkhambut *et al.*, 2010).

Xie *et al* (2010) indicaron que el sorgo granífero era más sensible al déficit hídrico durante el estado vegetativo y estados iniciales de crecimiento reproductivo. En estados tardíos del desarrollo reproductivo, el requerimiento de agua era menor, pero el rendimiento de grano se redujo debido a la senescencia temprana del dosel. En contraste, Oliveira Neto *et al.* (2009) encontraron que las plantas eran más sensibles a la sequía en el estado de llenado de grano, como consecuencia de las altas tasas de transpiración del cultivo.

Tsuchihashi y Goto (2005) y Alhajturki *et al*, (2012) encontraron reducciones significativas en la acumulación de carbohidratos en el tallo de las variedades de sorgo dulce sembradas durante la estación seca comparado con los pesos alcanzados durante la estación de lluvias.

Gutjahr *et al.* (2013) encontraron que los genotipos de sorgo dulce más tardíos alcanzaron mayores producciones de biomasa y acumulación de azúcares a través de diferentes épocas de siembra.

Concentración de azúcares en jugo, contenido en el tallo y volumen de jugo. Los resultados indicaron que la concentración de azúcares (Brix) en el jugo, el contenido de azúcares y el volumen de jugos en el tallo fueron afectados por la constitución genética de los materiales, las condiciones ambientales y la interacción genotipo por ambiente. El genotipo contribuyó con el 21,5% de la variación en la concentración de azúcares, el 39,0% en el contenido de azúcares y el 29,9% en el volumen del jugo, mientras que el ambiente explicó el 39,2% de la variación en la concentración de azúcares, el 20,8% en el contenido de azúcares y el 29,9% en el volumen de jugo. Los resultados confirmaron que la concentración de azúcares (Brix) en el jugo, los contenidos de azúcares y cantidad de jugo en el tallo de los genotipos de sorgo estudiados son características cuantitativas de herencia poligénica altamente afectadas por el ambiente.

McBee y Miller (1982) encontraron que la acumulación de azúcar en el tallo de sorgo dulce era afectada por el genotipo y el ambiente de crecimiento. Murray *et al.* (2008) y Ritter *et al.* (2008) reportaron que los contenidos de azúcares en el tallo de sorgo dulce presentaba una herencia cuantitativa con efectos aditivos, pero sin observarse un efecto de dominancia marcado. Diferentes estudios han logrado aislar algunos QTL (locis de características cuantitativas) en los cromosomas 1, 2, 3, 4, 5, y 7 relacionados con la concentración de azúcares en diferentes poblaciones de sorgo (Bian *et al.* 2006; Ritter *et al.* 2007; Murray *et al.*, 2009; Lekgari 2010; Shiringani *et al.* 2010; Guan *et al.* 2011; Felderhoff *et al.* 2012).

El otro factor determinante en la producción de azúcares, el contenido de jugo en el tallo, que se creía era controlado por un gen mayor, en estudios recientes se han reportado más de un QTL responsable de esta característica (Guan *et al.* 2011; Lekgari 2010; Lv *et al.*, 2013). Sin embargo, el efecto de estos QTLs no fue detectado en todos los ambientes lo que indicaría una alta contribución de la interacción GA en su expresión.

Las condiciones ambientales de Espinal y Palmira favorecieron la concentración de azúcares (Brix) en el jugo de los tallos en la mayoría de los genotipos de sorgo, mientras que en Cereté y Codazzi fue donde se observaron los menores valores de Brix. Sin embargo, en Codazzi los genotipos IC91 (16.9 °Brix) y JJT18 (16. °Brix) presentaron altas concentraciones de azúcares en el jugo.

Las condiciones de estrés hídrico y temperaturas mínimas bajas durante la noche prevalentes en Espinal y Palmira durante las fases de crecimiento reproductivo y llenado de grano favorecieron la mayor concentración de azúcares en el jugo (Brix) debido probablemente a una reducción en la demanda por carbohidratos para el crecimiento del tallo, al restringirse el crecimiento de los entrenudos, y menores tasas de respiración de crecimiento y mantenimiento como consecuencia de las bajas temperaturas nocturnas.

Resultados similares fueron reportados por Makanda *et al* (2012) en 80 híbridos de sorgo dulce evaluados en cuatro ambientes. Los ambientes que presentaron temperaturas óptimas medias de 25 a 30 °C favorecieron valores altos de Brix en el jugo del tallo de los

híbridos, mientras que los ambientes con temperaturas máximas entre 30 a 45 °C ocasionaron menores acumulaciones de azúcares.

Yamori *et al.* (2005) resaltaron que la fotosíntesis y la respiración son dos procesos metabólicos en la planta que ganan y consumen carbono, respectivamente, y ambos procesos son afectados por la temperatura. Por lo tanto, si la temperatura permanece óptima, una baja temperatura en la noche promoverá una ganancia neta de carbono (mayor acumulación de sacarosa); por otra parte, una baja temperatura en el día promoverá una disminución en las ganancias de carbono. Sun y Chow (1949) reportaron reducciones en la elongación del tallo como consecuencia de bajas temperaturas en la noche. Bajas temperaturas en el día y en la noche redujeron la longitud y peso fresco del tallo, pero promovieron la concentración de sacarosa en el tallo (Uehara *et al.*, 2009). Bonnet *et al.* (2006) sugirieron que la caña de azúcar asignaba menos carbono en el almacenamiento de sacarosa en el tallo cuando crecía en condiciones de alta temperaturas comparado con el crecimiento en bajas temperaturas.

En tanto que, Massacci *et al.* (1996) y Alhajturki *et al.* (2012) indicaron que la acumulación de azúcares registrada en genotipos de sorgo dulce sometidos a estrés hídrico era un mecanismo de ajuste osmótico que le permitía a la planta mantener la absorción de agua y comparativamente mayores tasas fotosintéticas y de crecimiento. Resultados similares fueron reportados por Geng *et al.* (1989) quienes encontraron un 29% de incremento en la concentración de azúcares en sorgo dulce bajo condiciones similares de estrés.

Los genotipos de sorgo presentaron diferencias en la capacidad para producir y almacenar azúcares en el tallo entre los ambientes. Los genotipos con mayores promedios de contenidos de azúcares en el tallo fueron HT46 (51,8 g planta⁻¹), HT7 (47,7 g planta⁻¹) y JJT18 (51,3 g planta⁻¹), mientras que IC38 (16,6 g planta⁻¹) e ICV9 (14,7 g planta⁻¹) fueron los de menor acumulación de azúcares. Los contenidos más altos de azúcares fueron registrado en el genotipo IC91 (88,8 g planta⁻¹) en el ambiente de Cereté y los materiales HT46 (80,8 g planta⁻¹) y JJT18 (81,5 g planta⁻¹) en Codazzi. Por otra parte, los genotipos HT3, HT7 y HT5 fueron los que presentaron mayor estabilidad en el contenido de azúcares entre las localidades.

Cereté y Codazzi fueron los ambientes en donde se encontró la mayor discriminación entre genotipos por el contenido de azúcar, mientras que Palmira fue el ambiente con menor discriminación. Estos ambientes se distinguieron por presentar condiciones ambientales favorables para una mayor acumulación de azúcares en el tallo en los genotipos de sorgo.

El contenido de azúcares en el tallo integra dos componentes importantes en la producción de azúcares en el cultivo de sorgo dulce, la concentración de azúcares en el jugo y el tamaño del vertedero del tallo disponible para la acumulación de los azúcares. En Cereté y Codazzi los suelos con mejores condiciones de fertilidad, junto con condiciones de temperatura y disponibilidad de agua óptimas para el cultivo, que favorecieron el crecimiento de los entrenudos (mayor tamaño y demanda de asimilados por el tallo) y mantener altas tasas de fotosíntesis en el dosel por un periodo más largo de tiempo permitieron a los genotipos de sorgo alcanzar altos contenidos de azúcares en el tallo.

Los genotipos con mayor volumen de jugo fueron HT5 (356 ml), HT (382 ml) y JJT18 (466 ml), mientras que el menor volumen de jugo lo presentaron C328 (155 ml) e ICV9 (175 ml). C328 (359 ml) logró el volumen más alto de jugo en el ambiente de Codazzi. Los ambientes de Codazzi, Palmira y Villavicencio se distinguieron por presentar los valores más altos en el volumen de jugo, mientras que en Espinal se observaron los menores volúmenes de jugo.

Es interesante resaltar que a pesar de las condiciones de estrés hídrico que se presentaron en Palmira los genotipos de sorgo dulce lograron mantener mayor humedad en el tallo mientras que en el Espinal las condiciones de déficit hídrico afectaron el volumen de jugo almacenado en el tallo. La mayor capacidad de almacenamiento de agua en el suelo de Palmira, el cual presentó un mayor contenido de arcilla y materia orgánica comparado con Espinal, probablemente le permitió al cultivo una mayor disponibilidad de agua.

El contenido de azúcares en el tallo de los genotipos de sorgo dulce presentaron correlaciones positivas con la duración de las fases de crecimiento GS1, GS2 y GS3, la altura de la planta, el peso del tallo, el volumen del jugo y la concentración de azúcares

(Brix) en el jugo. Igualmente, el peso de tallos presentó correlaciones positivas con la altura de la planta, el diámetro del tallo, el volumen de jugo y la duración de las etapas de crecimiento GS1, GS2 y GS3. Los resultados confirmaron lo reportado por diferentes investigadores quienes indicaron que en la selección de genotipos de sorgo con altos rendimientos de azúcares se deberían considerar características como producción de tallos, altura de la planta, diámetro del tallo, Brix y rendimiento de jugo en el tallo (Makanda *et al.*, 2009; Murray *et al.*, 2009; Audilakshmi *et al.*, 2010; Pfeiffer *et al.*, 2010).

Las correlaciones encontradas entre los contenidos de azúcares en el tallo y sus componentes, explicarían la alta acumulación de azúcares (g planta^{-1}) que presentaron los genotipos HT7, HT46 y JJT18 en los diferentes ambientes.

El modelo de regresión lineal indicó que las variables ambientales con mayor contribución en la concentración de azúcares (Brix) en el jugo en los genotipos de sorgo dulce fueron las temperaturas mínimas bajas y menor número de días secos durante el estado de crecimiento GS2 (-4,56 y -1,83, respectivamente) y temperaturas máximas y mínimas altas junto con mayor número de días secos en el estado GS3 (2,25, 2,69 y 2,32, respectivamente).

En la planta de sorgo dulce el tallo es un vertedero activo de los fotosintatos producidos por el dosel antes de la antesis los cuales son utilizados para la elongación de los entrenudos y continúan acumulando azúcares aun después de floración independiente de la presencia y tamaño de la panícula (Lingle, 1987; Hoffmann-Thoma *et al.* 1996; Djanaguiraman *et al.*, 2005; Zhao *et al.* 2009; Gutjahr *et al.*, 2013). Bajo condiciones ambientales óptimas para el crecimiento y expansión foliar las temperaturas mínimas bajas en la noche durante el estado de crecimiento GS2 disminuyen la actividad de las enzimas hidrolíticas responsables de la partición de la sacarosa, reducen el crecimiento de los entrenudos y estimulan una mayor concentración de azúcares en el jugo del tallo. Durante el estado de llenado de grano el tallo cesa su crecimiento y sigue acumulando azúcares en condiciones de temperaturas mínimas altas y temperaturas máximas altas que no sobrepasen el nivel crítico para la fotosíntesis.

Gutjahr *et al.* (2013) relacionaron los incrementos en Brix entre la floración y madurez fisiológica en genotipos de sorgo dulce con la disminución en la humedad del tallo.

Doggett (1988), por otro lado, reportó la presencia de un fenómeno de dilución de los azúcares en variedades de sorgo dulce. Los genotipos de sorgo con menores volúmenes de jugo en el tallo tendieron a presentar valores altos de Brix en el jugo.

El modelo de regresión lineal indicó que el contenido de azúcares en el tallo de los genotipos de sorgo dulce era favorecido en ambientes con altos contenidos de calcio (47,3) y magnesio (58,5) en el suelo, temperaturas máximas bajas (-89,5), menor número de días lluviosos (-2,9), mayor radiación solar acumulada (0,5) en la fase de crecimiento vegetativo, temperaturas mínimas bajas (-38,4), menor evapotranspiración (-2,4), mayor número de días secos (8,7), mayor radiación acumulada (0,08) en la fase de crecimiento reproductivo y temperaturas máximas altas (30,0), menor evapotranspiración (-5,1), mayor número de días lluviosos (18,8) y secos (29,9) y mayor radiación solar diaria (16,6) en la fase de llenado de grano.

Los ambientes con suelos fértiles y un balance adecuado del número de días con lluvia y secos durante los estados de desarrollo GS1 y GS2 contribuyeron a la formación y expansión de un área foliar eficiente en la captación de la radiación y a la formación de tallos con alta capacidad de almacenamiento de azúcares (tallos grueso con entrenudos largos) y mayor volumen de agua y las temperaturas mínimas bajas en el estado de crecimiento GS2 y temperaturas máximas altas en GS3 y un mayor número de días secos en GS3 favorecieron la concentración de azúcares en el jugo conllevando por lo tanto a un mayor contenido de azúcares en el tallo.

Los resultados indicarían que los ambientes de Palmira y Espinal con adecuada distribución de la precipitación y/o con riego suplementario serían los de mayor potencial para el cultivo de sorgo dulce con fines de producción de biocombustibles. Las localidades de Cereté y Codazzi con genotipos seleccionados por su alta acumulación de azúcares en estos ambientes permitirán alcanzar producciones competitivas de azúcares requeridas para la agroindustria de biocombustibles. Por otro lado, los ambientes de trópico húmedo con menor radiación solar y suelos de baja fertilidad como Gaitán y Villavicencio serían ambientes menos favorables para la producción competitiva de sorgo dulce para biocombustibles.

1.5 Conclusiones

- A excepción de la altura de planta, la expresión de las características asociadas al rendimiento de azúcares en los genotipos de sorgo, duración fases de crecimiento, concentración (Brix) y contenidos de azúcares, diámetro y peso del tallo y volumen de jugo fueron altamente influenciadas por las condiciones ambientales y la interacción GA.
- Los genotipos de sorgo dulce con mayor potencial de producción de azúcares fueron de ciclo largo, con plantas altas, tallos gruesos y jugosos, rendimientos altos de biomasa de tallo y alta concentración de azúcares (Brix) en el jugo.
- Las condiciones ambientales de Cereté y Codazzi fueron las que más discriminaron los genotipos por la duración de las fases de crecimiento, la concentración (Brix) y contenido de azúcares en el tallo, el peso y diámetro del tallo y el volumen de jugo.
- Las condiciones ambientales de Cereté y Codazzi favorecieron la utilización de los fotoasimilados al crecimiento del tallo y a mayores tasas de respiración de mantenimiento lo que ocasionó una menor concentración de azúcares en el jugo en los genotipos de sorgo. Mientras que en Espinal y Palmira las condiciones de estrés hídrico durante las fases reproductivas y de llenado y temperaturas mínimas bajas durante GS2 redujeron el crecimiento de los entrenudos y las tasas de respiración, lo que a su vez estimuló la concentración de sacarosa en el jugo.
- Los genotipos de sorgo HT3, HT5 y HT7 fueron los que menor variación presentaron en el contenido de azúcares entre los ambientes.
- La concentración de azúcares (Brix) en el jugo de los genotipos de sorgo fue favorecido por la presencia de temperaturas mínimas bajas y menor número de días secos durante el estado de crecimiento reproductivo y temperaturas máximas y mínimas altas junto con mayor número de días secos durante el llenado de grano.
- La acumulación de azúcares en el tallo de los genotipos de sorgo dulce fue favorecido en ambientes con altos contenidos de calcio y magnesio en el suelo, temperaturas máximas bajas en la fase de crecimiento vegetativo; temperaturas

mínimas bajas, menor evapotranspiración y mayor número de días secos en la fase de crecimiento reproductivo; y temperaturas máximas altas, menor evapotranspiración, mayor número de días lluviosos y secos y mayor radiación solar diaria en la fase de llenado de grano.

- Los resultados indicarían que los ambientes de Palmira y Espinal con adecuada distribución de la precipitación y/o con riego suplementario serían los de mayor potencial para el cultivo de sorgo dulce con fines de producción de biocombustibles. Las localidades de Cereté y Codazzi con genotipos seleccionados por su alta acumulación de azúcares en estos ambientes permitirán alcanzar producciones competitivas de azúcares requeridas para la agroindustria de biocombustibles. Por otro lado, los ambientes de trópico húmedo con menor radiación solar y suelos de baja fertilidad como Gaitán y Villavicencio serían ambientes menos favorables para la producción competitiva de sorgo dulce para biocombustibles.

2. Capítulo 2

Análisis de la dinámica de crecimiento y producción de biomasa de genotipos de sorgo dulce en dos condiciones ambientales.

2.1 Introducción

Diferentes estudios realizados sobre el potencial energético del sorgo dulce han reconocido al cultivo como una de las materias primas con mayor potencial para producción de biocombustibles en el Norte de China (Gnansounou, *et al.*, 2005; Yu *et al.*, 2008; Zhao *et al.*, 2009; Liu *et al.*, 2008; Mei *et al.*, 2008), Europa (Venturi y Venturi, 2003), Asia (Zhang *et al.*, 2010), Oceanía (Thoma, 2009), África (Diaz-Chaves y Jamieson, 2010) y América (Kim y Day, 2010; Guigou *et al.*, 2010).

El sorgo dulce es una especie C₄ con una alta capacidad de acumulación de materia seca por día y mayores tasas fotosintéticas. En los tallos de sorgo dulce se acumulan grandes cantidades de azúcares (materia prima importante para la producción de alcohol carburante) y fibra de gran utilidad para la generación de energía al presentar un poder calórico similar a la caña de azúcar (Tsuchihashi y Goto 2005; Thakare y Bhongle 200). Existe una gran variación en el contenido de azúcares en el tallo entre las variedades de sorgo dulce. Por ejemplo, el brix en el jugo extraído del tallo de 200 cultivares de sorgo fluctuó entre 8,0% y 19,1% (Zhao *et al.*, 2008).

Por ser una planta C₄, el sorgo no tolera bajas temperaturas. Para la germinación de la semilla se requiere una temperatura mínima de 10°C y óptima entre 21°C y 34°C (Peacock, 1982; Anda y Pintér 1994; Maiti, 1996). Bajo condiciones de campo la emergencia de la plántula ocurre cuando las temperaturas del suelo superan los 15°C y

en condiciones favorables de humedad en el suelo el cultivo emerge de 5 a 10 días después de la siembra (Yu y Tuinstra, 2001). La temperatura óptima para el crecimiento vegetativo y desarrollo es de 26°C a 34°C y de 25°C a 28°C para el crecimiento reproductivo (Maiti, 1996). Los cultivares precoces presentan un ciclo vegetativo entre 90 días a 110 días en regiones con temperatura superiores a 20°C, mientras que los genotipos intermedios alcanzan un ciclo vegetativo que fluctúa entre 110 a 140 días (Wani *et al.*, 2012).

La tasa de emisión foliar en la planta de sorgo está estrechamente relacionada con el tiempo térmico. Hammer *et al.* (1993) reportaron temperaturas base, óptima y máxima de 11°C, 30°C y 48°C, respectivamente. Estas temperaturas cardinales son consistentes con reportes de estudios sobre modelamiento fototérmico del desarrollo fenológico en sorgo de acuerdo a la temperatura y fotoperiodo (Hammer *et al.*, 1989; Crauford *et al.*, 1998, 1999). Las hojas aparecen opuestas una de otra a lado y lado del tallo. Como en todos los cultivos, la tasa de producción de materia seca es afectada por la radiación interceptada, la cual depende del área foliar, especialmente entre la emergencia y la iniciación de la panícula. El número de hojas es variable, desde 7 a 24, dependiendo del cultivar, grado de mejoramiento genético y las condiciones climáticas. Los genotipos mejorados de sorgo desarrollan de 14 a 17 hojas y los cultivares silvestres menos adaptados pueden desplegar hasta 30 hojas (Doggett, 1970).

La iniciación de la panícula ocurre cuando se ha cumplido un tercio del ciclo de vida de la planta, que coincide con el inicio de la formación de la última hoja y el desarrollo de una tercera parte del área foliar (Wani *et al.*, 2012). La duración del tiempo para el inicio de la formación de la panícula en sorgo dulce es afectada por la temperatura y el fotoperiodo, existiendo una interacción compleja entre la temperatura, el fotoperiodo y el grupo de madurez del cultivar (Morgan *et al.*, 1987; Tari *et al.*, 2012). El sorgo es una planta de ciclo corto cuantitativa y la iniciación de la panícula es acelerada por días cortos y noches largas, cuando el meristemo apical entra en la fase crítica de sensibilidad al fotoperiodo (Major, 1980; Alagarswamy *et al.*, 1998). Shinde *et al.* (2013) reportaron retrasos en la floración de variedades de sorgo dulce sensibles al fotoperiodo en ambientes con más de 11,1-12,6 horas luz/día. El desarrollo es acelerado con el incremento en la temperatura entre la base (11°C) y la óptima (30°C), luego declina con incrementos de temperatura

entre la óptima y la máxima (48°C) (Hammer *et al.*, 1989; Crauford *et al.*, 1998). El tiempo de iniciación floral determina el número de hojas que emergerán en el tallo principal de la planta de sorgo. Dado que la iniciación de la panícula ocurre posterior al inicio de todas las hojas, si la iniciación de la panícula y la floración ocurre tempranamente la planta desplegará un menor número de hojas (Muchow y Camberra, 1990; Hammer *et al.*, 1993; Quinby *et al.*, 1973).

El crecimiento rápido de la panícula ocurre después de aparición de la mayoría de las hojas, cuando la hoja bandera es visible solo quedan por expandirse las últimas tres hojas y la intercepción de la luz se aproxima a su máximo. Algunas hojas bajas inician su senescencia si no se le ha suministrado suficiente nitrógeno al cultivo o en condiciones de baja humedad del suelo y altas densidades de población (Alagarswamy *et al.*, 1998; Wani *et al.*, 2012).

El crecimiento es un proceso complejo que incluye la división celular, la elongación, la fotosíntesis, la síntesis de otros compuestos, la respiración, la translocación, la absorción y la transpiración (Gómez *et al.*, 1999). El crecimiento se refiere al incremento irreversible de materia seca o volumen, cambios en tamaño, masa, forma y/o número, como una función del genotipo y su interacción con el ambiente, dando como resultado un aumento cuantitativo del tamaño y peso de la planta (Kru, 1997).

Luque *et al.* (2006) concluyeron que el crecimiento y desarrollo de las plantas dependían tanto de la oferta de asimilados de la fuente (determinado por el tamaño del área foliar, la tasa de fotosíntesis de las hojas y la duración de estas) y de la actividad y tamaño de los vertederos.

El crecimiento de una planta es el resultado neto de la absorción de carbono y las pérdidas de carbono en la forma de acumulación de materia seca. La tasa neta de acumulación de carbono en toda la planta en un periodo de tiempo específico es determinada por la tasa fotosintética por unidad de área foliar, el área foliar total por biomasa total de la planta, la respiración total de la planta, la exportación de carbono (por simbiosis) y la actividad de los vertederos para el crecimiento estructural o almacenamiento (Körner, 2013). No es posible realizar predicciones acerca de la acumulación de carbono o crecimiento solo con uno de estos factores.

Las plantas están compuestas por órganos autotróficos (fuente) que producen azúcares, aminoácidos y ácidos grasos a partir de los compuestos resultantes de la fotosíntesis, y órganos heterotróficos (vertederos) que consumen estos productos en crecimiento, mantenimiento y almacenamiento (Foyer and Paul, 2001). La fuente se refiere a los tejidos de la planta que son productores netos de carbono, generalmente tejidos verdes fotosintéticos que son exportadores netos de asimilados. Los órganos vertederos son importadores netos de asimilados y consisten de órganos que crecen rápidamente tales como los meristemos, hojas inmaduras y tallos. Un vertedero es un usuario neto de carbohidratos para los procesos de respiración (crecimiento y mantenimiento) y almacenamiento de compuestos de carbono.

La actividad de los vertederos de carbono es variable y es regulada por la disponibilidad de otros recursos diferentes al CO₂. En la mayoría de los casos (con la excepción de luz insuficiente), la actividad del vertedero es el factor que más afecta la asimilación del carbono. El proceso fotosintético solo actúa cuando los asimilados producidos son exportados desde los sitios de producción a los sitios de metabolismo o crecimiento estructural y almacenamiento (Körner, 2013). El metabolismo de la fuente y el vertedero están estrechamente acoplados porque la información de disponibilidad de asimilados en cada órgano, es percibida y usada para regular la expresión de genes. Esta coordinación es necesaria para evitar amplias fluctuaciones y desbalances entre el abastecimiento y la demanda (Foyer y Paul, 2001).

Bajas demandas de fotoasimilados pueden ocasionar una acumulación de estos en las hojas fuente, causando la detención de genes que codifican para componentes de la maquinaria fotosintética lo cual resulta en una disminución de la capacidad fotosintética, demostrando que la capacidad de la demanda puede regular la actividad de la fuente (Foyer y Paul, 2001; Körner, 2013).

La actividad de los vertederos en las plantas depende de la disponibilidad de recursos de suelo (agua y nutrientes), de la temperatura y del estado de desarrollo de la planta, la cual a su vez está afectada por los factores ambientales anteriores y el fotoperiodo. Diferentes estudios han demostrado que la actividad del vertedero responde primero (a excepción de la luz) a los efectos ambientales (es más sensiblemente) que la

fotosíntesis. Los procesos del crecimiento (división celular, expansión y diferenciación) responden al estrés hídrico y a bajas temperaturas mucho antes que se vea afectada la fotosíntesis. Por lo tanto, no es exagerado afirmar que en la mayoría de los casos, con excepción de las limitaciones de la luz o pérdida foliar, el crecimiento (demanda por asimilados) regula la fotosíntesis y no al revés (Luque *et al.*, 2006; Fourcaud *et al.*, 2008; Körner, 2013). La respiración, la cual está parcialmente acoplada a la actividad del vertedero (respiración de crecimiento y mantenimiento), es también más sensible a los efectos ambientales (particularmente a la temperatura).

La raíz, el tallo las hojas y la panícula son los vertederos de la planta de sorgo dulce. En los estados iniciales de crecimiento, el área foliar de la planta es el único proveedor, también como vertedero, de los carbohidratos. Durante la fase reproductiva el tallo es el vertedero principal de los fotoasimilados formados en las hojas, mientras que las hojas y panículas son vertederos secundarios. Durante la fase de llenado de grano, el tallo y la panícula son vertederos que compiten activamente por asimilados alcanzando la máxima acumulación de biomasa en madurez fisiológica (Nan *et al.*, 1994; Djanaguiraman *et al.*, 2005). Willey y Baiime (1973) indicaron que el grano pequeño en la planta de sorgo dulce era el resultado de la competencia entre el crecimiento del tallo y el desarrollo de la panícula antes de la antesis.

Nan *et al.* (1994) reportaron que la distribución de materia seca en tallos, hojas, vainas y panículas era diferente en las variedades de sorgo dulce Rio y Shenonn 2. En la variedad Rio la materia seca acumulada se distribuyó en un 60.3% en el tallo, 14.4% en hojas, 10.0% en vainas y 15.3% en la panícula, mientras que en la variedad Shannon 2 la distribución fue menor en tallos (53.7%), hojas (13.3%) y vainas (6.8%) y mayor en las panículas (26.2%).

La sacarosa es la forma principal de transporte de los asimilados desde la fuente a los vertederos. Durante el estado vegetativo en el cultivo de sorgo dulce, ocurre un flujo de sacarosa desde las hojas fotosintéticamente activas a los tallos en crecimiento, hojas inmaduras y raíces (Qazi *et al.*, 2012). En el estado de emergencia de la panícula y llenado de grano, la panícula es un vertedero importante para la sacarosa en el sorgo dulce y en el sorgo granífero, pero los entrenudos inferiores en el sorgo dulce funcionan como vertederos activos en el almacenamiento de sacarosa (Tarpley *et al.*, 1994).

Varios estudios de acumulación de azúcares en variedades de sorgo dulce, mostraron que la fructosa era el azúcar predominante en el jugo en los estados tempranos de desarrollo, mientras que la sacarosa presentaba la mayor cantidad después de la floración (Vietor *et al.*, 1989; Mnminov, 1997; Sipos *et al.*, 2009). McBee y Miller (1982) hallaron incrementos en los contenidos de sacarosa desde la aparición de la hoja bandera hasta la floración. Lingle (1987) reportó incrementos en la concentración de sacarosa, siete veces superior en el estado de grano masa suave, con relación a lo determinado en el estado de hoja bandera. Hunter y Anderson (1997) encontraron entre el estado de masa suave de grano y madurez fisiológica un contenido de azúcares en el tallo dos veces superior al determinado entre el estado de grano lechoso y masa suave. Diferentes estudios reportaron acumulación de sacarosa en el tallo durante y después del llenado de grano (Mc Bee *et al.*, 1983; Tarpley *et al.*, 1994; Tarpley *et al.*, 1996). En el sorgo dulce las hojas permanecieron fotosintéticamente activas después de la madurez del grano y probablemente fueron las responsables de la producción de la sacarosa almacenada en el tallo (Miller y Creelman, 1980; Vietor *et al.*, 1990).

Estudios realizados por Djanaguiraman *et al.* (2005) revelaron que durante el estado de llenado de grano, el tallo era el vertedero principal de acumulación de azúcares a expensas del crecimiento apical de los entrenudos y no observaron competencia entre el grano y el tallo por los carbohidratos producidos en la hoja. El conocimiento del patrón de distribución de carbohidratos en los diferentes vertederos en variedades de sorgo dulce es importante en un programa de mejoramiento para orientar la formación de variedades con fines forrajeros, para biocombustibles o doble propósito (tallos para biocombustibles y grano para consumo humano) (Gutjahr *et al.*, 2013). Las interacciones fuente-vertedero y vertedero-vertedero han sido poco estudiadas en variedades de sorgo dulce.

En caña de azúcar los rendimientos de azúcar dependen de la biomasa de la planta y la concentración de sacarosa en el tallo (Ebrahim *et al.*, 1998). Debido a que se requiere una mayor cantidad de carbohidratos para producción de biomasa y almacenamiento de sacarosa en altas concentraciones, un balance adecuado de carbono en toda la planta podría inducir altos rendimientos de azúcar. Los carbohidratos son producidos en las hojas y transportados al tallo (Moore, 1995). La fotosíntesis y la respiración ganan y consumen carbono, respectivamente, y ambos procesos son afectados por la

temperatura (Yamori *et al.*, 2005). Por lo tanto, si la temperatura permanece óptima, una baja temperatura en la noche promoverá una ganancia neta de carbono; por otra parte, una baja temperatura en el día promoverá una disminución en las ganancias de carbono.

Cuando la planta tiene un balance adecuado de carbono, el crecimiento y almacenamiento compiten por el sustrato (Hatch y Glasziou, 1963; Bonnett *et al.*, 2006; Inman-Barber *et al.*, 2008). Por lo tanto, es importante conocer en cuál órgano o fracción (ejemplo, azúcares solubles, componentes estructurales) son incorporados los nuevos fotoasimilados. Así, el rendimiento de azúcar dependerá de la concentración de sacarosa y del peso fresco del tallo y un balance negativo de carbono puede reducir la elongación del tallo y la concentración de sacarosa.

Sun y Chow (1949) reportaron reducciones en la elongación del tallo como consecuencia de bajas temperaturas en la noche. Bajas temperaturas en el día y en la noche redujeron la longitud y peso fresco del tallo, pero promovieron la concentración de sacarosa en el tallo (Uehara *et al.*, 2009). Bonnet *et al.* (2006) sugirieron que la caña de azúcar asignaba menos carbono al almacenamiento de sacarosa en el tallo cuando crecía en condiciones de alta temperatura comparado con el crecimiento en bajas temperaturas. Los resultados sugirieron que independiente de si esto ocurre en el día o en la noche, una baja temperatura podría asignar los nuevos carbohidratos no al crecimiento de los entrenudos, si no a la acumulación de sacarosa en el tallo. Las plantas que crecieron en condiciones de baja temperatura almacenaron más sacarosa en el tallo que las que crecieron en altas temperaturas (Uehara *et al.*, 2009).

El análisis del crecimiento es una herramienta importante para entender la dinámica de crecimiento de una planta o población de plantas bajo condiciones ambientales naturales o controladas y se ha utilizado ampliamente para estudiar los factores que influyen sobre el desarrollo y rendimiento del cultivo. Hay dos tipos de análisis de crecimiento, el primero denominado análisis clásico, contempla medidas hechas a intervalos relativamente largos utilizando un gran número de plantas; el segundo, denominado análisis funcional, comprende medidas a intervalos de tiempo más frecuentes con un pequeño número de plantas y usa el método de regresión (Hunt, 1978).

Existe un consenso general acerca de la utilidad del análisis clásico de crecimiento de las plantas, arraigado en modelos lineales y exponenciales que limitan el rango de modelos que pueden ser utilizados en el análisis de crecimiento (Causton y Venus, 1981; Hunt, 1982; Poorter, 1989; Paine *et al.*, 2012). Los modelos lineales asumen tasas de crecimiento absolutas constantes (TCA, g d^{-1}) y los modelos exponenciales asumen tasas de crecimiento relativo (TCR, $\text{g g}^{-1} \text{d}^{-1}$) constantes. Estos supuestos limitan su utilidad, ya que tanto TCA como TCR varían con las condiciones ambientales y la ontogenia de la planta.

El ambiente sostiene el crecimiento, pero la regulación biológica modula el patrón de su utilización y finalmente su expresión. Para entender la naturaleza de esta regulación en la planta y apreciar sus interacciones con el medio que la rodea, se requieren mediciones detalladas de los patrones de acumulación de biomasa y parámetros de crecimiento. El análisis funcional de crecimiento y los modelos matemáticos de crecimiento y desarrollo suministran tales parámetros (Gardner *et al.*, 1985; Clavijo, 1989; Paine *et al.*, 2012; Porter *et al.*, 2013).

La mejor forma de analizar las variaciones en las tasas de crecimiento es la utilización de modelos de crecimiento no lineales. En la actualidad, los programas estadísticos y los modelos no lineales de ajuste han avanzado hasta el punto, en donde un rango amplio de modelos pueden ser explorados en el análisis de experimentos complejos (Pinheiro y Bates, 2000; Ritz y Streibig, 2008). Las principales ventajas de los modelos no lineales son la parsimonia (menor número de coeficientes), interpretabilidad y predicción (Bates y Watts, 2007). La interpretabilidad proviene del hecho que los coeficientes pueden ser asociados a un significado biológico.

El análisis matemático de crecimiento utiliza medidas directas, como Peso Seco (W), Área Foliar Total (AF) y Tiempo (T), mientras que las medidas derivadas Tasa Relativa de Crecimiento (TRC), Tasa de Crecimiento del Cultivo (TCC), Relación de Área Foliar (RAF), Tasa de Asimilación Neta (TAN), Área Foliar Específica (AFE), Índice de Área Foliar (IAF) y Tasa Unitaria Foliar (ULR) son calculadas a partir de las medidas directas (Hunt, 1978). Estos índices de crecimiento son parámetros que permiten analizar el crecimiento de la planta a través de la acumulación de materia seca y comparar la

habilidad de una especie vegetal para crecer y desarrollarse en un ambiente dado explicando su comportamiento en función del tiempo (Hunt, 1982; Poorter, 1989).

En el análisis de crecimiento se han creado índices para evaluar la eficiencia de la planta, como la tasa relativa de crecimiento (TRC) que es denominado el índice de eficiencia de producción de materia seca, la tasa de asimilación neta (TAN) que es un indicador de la eficiencia fotosintética promedio, ya que mide la ganancia neta de asimilados por unidad de área foliar y por unidad de tiempo y la tasa de crecimiento del cultivo (TCC) que es considerado un índice de la productividad agrícola, mide la ganancia en peso de una comunidad de plantas por unidad de área de suelo y por unidad de tiempo (Hunt, 1978; Gardner *et al.*, 1985; Clavijo, 1989).

El patrón de la tasa de acumulación de materia seca del cultivo se caracteriza por una curva sigmoidea en donde se distinguen tres fases: un periodo de crecimiento exponencial durante los estados iniciales de desarrollo, seguido de un periodo más o menos constante de tasa de acumulación de materia seca y finalmente un periodo declinante de la tasa de crecimiento durante la fase final de desarrollo, cuando el área foliar disminuye debido a la senescencia foliar y la fotosíntesis foliar se reduce debido a la edad de la hoja (Causton y Venus, 1981; Hunt, 1982; Poorter, 1989; Paine *et al.*, 2012).

La tasa de crecimiento relativo (TCR) alcanza los valores más altos durante el periodo de crecimiento exponencial pero decae rápidamente a medida que las plantas aumentan de tamaño y la cubierta vegetal se cierra. Durante la fase exponencial, la TCR se relaciona estrechamente con el área foliar y la actividad fotosintética. Los modelos de crecimiento deben considerar la disminución en la TCR que ocurre a medida que la planta incrementa su biomasa. Esta disminución resulta de una combinación de factores, incluyendo la acumulación de biomasa no fotosintética en la forma de tallos y raíces, auto-sombreamiento de las hojas y disminución en la concentración local de nutrientes (Paine *et al.*, 2012; Poorter *et al.*, 2013). En términos amplios, los costos de la respiración están relacionados con la biomasa total de la planta, mientras que la captura de carbono es dependiente de la biomasa fotosintética. Por lo tanto, la tasa de acumulación de biomasa, como una fracción de la biomasa total, se desacelera a medida que la planta crece (Hunt, 1982; South, 1995).

La tasa de acumulación de materia seca durante los estados iniciales de desarrollo está directamente relacionada con el IAF y como el IAF está estrechamente asociado con la materia seca de la planta durante esta fase, la tasa de acumulación de materia seca de un cultivo está en función de su propio peso (Hunt, 1982; Poorter, 1989). El incremento en el IAF y, por lo tanto, el incremento en la tasa de acumulación de materia seca, es proporcional a la tasa de materia seca acumulada por unidad de área foliar (TAN). La TAN declinará una vez se da el sombreado entre las hojas en el dosel. Cuando esto ocurre el dosel ha alcanzado su fase de crecimiento constante. De manera similar, el cultivo alcanzará la fase de crecimiento constante cuando la expansión del área foliar se complete, aún si la absorción de la radiación fotosintéticamente activa es menor del 100%.

Bajo la premisa, que la fotosíntesis tiene lugar solo en las hojas, el balance del carbono de toda la planta puede ser modelado como el resultado neto de la fotosíntesis total de la planta y la respiración por unidad de área (lo cual es la tasa unitaria foliar, ULR), la relación del área foliar con la masa foliar (área foliar específica, AFE) y la fracción del total de la biomasa distribuida al follaje (Evans, 1972). Dependiendo de la cantidad total de carbono invertido en las hojas, la planta puede fijar más o menos carbono y por lo tanto es capaz de sintonizar la productividad fotosintética de toda la planta sin cambiar su capacidad fotosintética por unidad de área foliar. La radiación solar, la temperatura, la disponibilidad de agua y el suministro de nutrientes determinan cuanta fotosíntesis la planta puede “permitirse” y cuantos asimilados pueden ser invertidos. Muchos análisis han demostrado que las plantas de crecimiento rápido o lento difieren principalmente en su inversión de biomasa por unidad de área foliar y por longitud de raíz. Plantas de rápido crecimiento tienen un área foliar específica y longitud radical específica grande comparadas con plantas de lento crecimiento (Körner, 2013).

El índice de área foliar (IAF) es la relación entre el área foliar (superficie fotosintetizadora) y el área de suelo ocupada por el cultivo y la Relación de Área Foliar (RAF) relación entre el área foliar total de la planta y su peso seco total (Hunt, 1982; Poorter, 1989). El índice de área foliar (IAF) en el cultivo de sorgo depende de la densidad de población, del número y área foliar de las hojas en la planta y del estado de crecimiento (Wani *et al.*, 2012). La máxima cobertura del dosel en cultivares forrajeros de sorgo en el trópico es

alcanzada con un IAF 7 o superior, con una densidad de plantas superior a 150 mil plantas por hectárea y un manejo eficiente de insumos. El área foliar máxima (cobertura total) se alcanzó a los 50 días después de emergencia en un cultivar de ciclo corto bajo condiciones favorables de temperatura (Wani *et al.*, 2012).

Durante el segundo periodo de crecimiento la tasa de acumulación de materia seca es casi constante y, en consecuencia, la tasa de crecimiento del cultivo (TCC) es el parámetro apropiado para el análisis de crecimiento. Con cobertura completa, el cultivo entra en el periodo en el cual la intercepción de radiación y la fotosíntesis son máximas. En ese estado, la TCC varía, con los cambios en la radiación solar y el estrés abiótico. Dado que la TCC es relativamente constante, la acumulación total de materia seca durante este periodo está estrechamente relacionada con la duración del periodo de crecimiento del cultivo. Este periodo es la etapa más importante de acumulación de materia seca y producción de biomasa en la mayoría de los cultivos. Por ejemplo en maíz, se alcanza el 75% de acumulación de materia seca durante esta fase y es la que más contribuye con el rendimiento final de grano (Hunt, 1982; Poorter, 1989).

En la variedad de sorgo dulce Wray y en el sorgo forrajero SP1 se observaron reducciones en el crecimiento, área foliar y acumulación de materia seca en la planta cuando se mantuvieron condiciones de anegamiento durante el inicio del estado vegetativo y estados iniciales de la fase reproductiva (Promkhambut *et al.*, 2011). El encharcamiento posterior a 45 días después de emergencia no afectó significativamente el crecimiento de la plántula.

En experimentos realizados con sorgo dulce bajo condiciones de lluvias no se encontraron diferencias en producción de biomasa y azúcares con precipitaciones entre 250 y 580 mm durante la estación de crecimiento del cultivo en Nebraska y la productividad media encontrada fue de 50 kg de biomasa y 8,1 kg de azúcar por mm de precipitación (Wortmann *et al.*, 2010).

La tasa de acumulación de materia seca es el producto de la radiación solar total incidente (Q , MJ m⁻² día⁻¹), la absorción de la radiación solar incidente por el dosel del cultivo (I_A , %) y la eficiencia de la conversión de la radiación solar absorbida en materia seca (RUE, g materia seca MJ⁻¹) (Stöckle y Kemanian, 2009; Poorter *et al.*, 2013). Las principales variables que afectan la RUE son la tasa máxima de fotosíntesis foliar bruta,

la tasa de respiración del cultivo, las condiciones de estrés que afecten la tasa fotosintética foliar y los cambios en la tasa fotosintética foliar asociados con la fase de desarrollo. Otros factores que pueden afectar la RUE son el nivel de radiación incidente, y la fracción de la radiación difusa (Stöckle y Kemanian, 2009). Mastrorilli *et al.* (1995) Encontraron un valor de RUE para sorgo dulce de 3,7 g de materia seca por MJ interceptado de la radiación fotosintéticamente activa, el cual fue relativamente superior a lo reportado para caña de azúcar de 2,7 g (Goose *et al.*, 1986), maíz de 2,1 g a 3,2 g (Bonhomme *et al.*, 1982) y para millo perla de 3,0 g (Begue *et al.*, 1991).

En las especies anuales determinadas como el sorgo dulce y el maíz, la fase decreciente del crecimiento del cultivo se debe a la maduración y a la senescencia. En la fase final de desarrollo, la tasa de acumulación de materia seca por día inicia su descenso, debido a la senescencia foliar. La disminución en la tasa de acumulación de materia seca durante esta fase está asociada con la senescencia funcional y visual de las hojas. La senescencia funcional es la disminución en la fotosíntesis por unidad de área debido al envejecimiento foliar. La senescencia foliar visible es la pérdida de la clorofila en la hoja. Aunque las hojas retienen la clorofila, esto no es un indicativo de su funcionalidad (Hunt, 1982; Poorter, 1989).

La dinámica de crecimiento, la acumulación de materia seca y su distribución en la planta de sorgo dulce ha sido poco estudiada. La mayor parte de los estudios se han centrado en determinar los patrones de acumulación de azúcares y la competencia entre la acumulación de carbohidratos en el tallo y la panícula (Gutjhar *et al.*, 2013).

Este estudio planteó como objetivo analizar el efecto del ambiente sobre la dinámica del crecimiento, desarrollo y acumulación de materia seca de tres genotipos mejorados de sorgo dulce.

2.2 Materiales y Métodos

2.2.1 Condiciones ambientales

Los ensayos experimentales de crecimiento de genotipos de sorgo dulce, se llevaron a cabo en el año 2010 en el Ingenio Providencia localizado en Palmira-Valle, y en el Centro de Investigación La Libertad, Corpoica en Villavicencio. En la Tabla 2-1 se detallan la ubicación geográfica, la altura en msnm y las fechas de siembra y cosecha de los experimentos.

Tabla 2-1. Localización geográfica y fechas de siembra de los ensayos de crecimiento de genotipos de sorgo dulce en dos localidades.

Localidad	Latitud	Longitud	Altitud (msnm)	Fecha siembra	Fecha Cosecha
Palmira	3°38,367' N	76°15,583' W	1050	21-May-10	9-Sep-10
Villavicencio	4°4,825' N	73°27,998' W	321	15-May-10	5-Sep-10

Para la valoración de los parámetros climáticos, se tomaron los registros de las estaciones meteorológicas más cercanas a las áreas experimentales. En Palmira se contó con la información diaria suministrada por la red de estaciones automáticas que maneja el Centro de Investigación Cenicaña y en Villavicencio el registro se obtuvo de una estación automática DAVIS (Vantage Pro2). Se procesaron datos de pluviometría, temperaturas (mínimas, medias y máximas), velocidad del viento (m s^{-1}), humedad relativa (%), radiación solar ($\text{MJ m}^{-2} \text{ día}^{-1}$), de cada localidad para el periodo de tiempo de siembra a cosecha de los genotipos de sorgo. La evapotranspiración del cultivo (ETc , mm día^{-1}) fue calculada como el producto de la evapotranspiración de referencia (ETo , mm día^{-1}) por el coeficiente K_c del cultivo de sorgo dulce (Wani, 2012). La evapotranspiración de referencia fue estimada mediante el programa ETo calculator (FAO, www.fao.org/nr/water/eto.html) con base en datos de temperatura mínima, máxima, velocidad del viento, humedad relativa y radiación solar. Se realizaron cálculos acumulados o promedios de las variables climáticas semanales, correspondientes a las épocas de muestreo de biomasa. Se elaboraron gráficas con datos semanales de

siembra hasta la cosecha de los genotipos en las variables temperatura (máxima y mínima), radiación solar, precipitación, evapotranspiración de referencia y humedad relativa.

Antes de la siembra de los ensayos, en cada una de las localidades, se tomaron muestras de suelos para su análisis físico-químico. Las muestras fueron extraídas a una profundidad de 0 a 20 cm, se homogenizaron y se enviaron al laboratorio de suelos del C.I. Tibaitata, en donde se realizó el análisis químico (elementos mayores y menores) y la textura por Bouyoucos.

2.2.2 Material genético

Tres genotipos de sorgo dulce [*Sorghum bicolor* (L.) Moench] fueron seleccionados por su producción de biomasa y concentración de azúcares (Brix) en los ensayos multi-ambientales realizados en el año 2009 (Tabla 2-2).

Tabla 2-2. Origen geográfico, grupo racial, altura de planta, grados día (TT) a floración, producción de materia seca (Pseco) y grado Brix de variedades de sorgo de la colección de trabajo de Corpoica.

Código	Genotipo	Origen Geográfico	Programa mejoramiento	Altura (cm)	TT (°Cd)	Pseco t ha ⁻¹	° Brix
HT7	LASPHT-7	Colombia	Corpoica-Icrisat	371	1352	24,4	15,2
HT46	LASPHT-46	Colombia	Corpoica-Icrisat	333	1444	23,8	16,0
JJT18	JJT18	Colombia	Corpoica-Icrisat	337	1268	27,0	15,6

2.2.3 Manejo agronómico

Para la preparación del suelo en los experimentos se realizaron las siguientes labores: un pase de rastra, uno de pulidor, siembra inicial a chorrillo 1 g por metro lineal (5 g por surco de 5 m) y se dejaron 10 plantas por metro lineal. La fertilización se efectuó con

base en los requerimientos de la planta y la oferta del suelo, para el control de malezas se aplicaron herbicidas pre-emergentes (atrazina y glifosato 1,50 y 1,84 kg i.a. ha⁻¹, respectivamente). Para el control de plagas se hicieron liberaciones de biológicos como *Trichogramma exiguon*, y *Metagonistylum minense* para el control del barrenador del tallo *Diatraea* spp.

2.2.4 Variables registradas en los genotipos

- **Fases de crecimiento.** A partir de la curva de crecimiento se determinó el número de días y grados día acumulados para cada una de las fases de crecimiento de los genotipos de sorgo en las dos localidades. El crecimiento fue separado en tres fases, exponencial (velocidad lenta de crecimiento), fase lineal (velocidad de crecimiento constante) y fase de senescencia (crecimiento decelerado).
- **Grados día.** Se calculó como la acumulación de grados día desde la siembra hasta la terminación de cada una de las fases de crecimiento registradas en los genotipos de sorgo. Para la determinación se utilizó el método del seno sencillo de corte vertical citado por Rolch (1999) el cual permite una mejor estimación de GD cuando la temperatura fluctúa por encima o por debajo del umbral de temperatura requerido por el cultivo. Para el cálculo se consideraron 4 temperaturas cardinales para el cultivo de sorgo 11°C, óptima entre 30°C a 34°C y máxima de 42°C (Alagarswamy *et al.*, 1986; Hammer *et al.*, 1993; Lafarge y Tardieu, 2002; Gutjhar *et al.*, 2013).
- **Muestreo material vegetal.** Para el monitoreo de la biomasa aérea de la planta se realizaron 16 muestreos en la localidad de Palmira y 17 muestreos en Villavicencio. El peso fresco y seco de hojas, tallos, vainas y panojas fue determinado cada 7 días, tomando de cada unidad experimental cinco plantas al azar, para un total de 20 plantas por muestreo. El peso seco fue determinado después de llevar el material vegetal a peso constante en un horno de secado a 70°C por un periodo de 72 horas. Con la información generada de los muestreos se cuantificó el material vegetal existente en la planta y se obtuvo la materia seca (*W*) en cada tiempo de muestreo, para toda la planta y sus componentes.

Área foliar e índice de área foliar. El índice de área foliar fue calculado mediante la estimación del área foliar por planta sobre el área ocupada de suelo. El área foliar fue determinada matemáticamente utilizando mediciones lineales de la hoja (longitud y el ancho máximo) y aplicando la ecuación 2.1 propuesta por Shih et al (1981) para sorgo dulce.

$$\text{Área foliar (cm}^2\text{)} = L \times A \times m \quad (2.1)$$

L = Longitud de la hoja, cm.

A = Ancho máximo de la hoja, cm.

M = Constante, el valor de la constante m utilizada fue 0,741.

- **Índices de crecimiento.** Para la construcción de las curvas de crecimiento de los genotipos en las dos localidades se utilizó el análisis funcional. Con base en los coeficientes obtenidos en el modelo no lineal de mejor ajuste, se elaboraron las curvas de crecimiento para peso seco total, peso seco de tallos, peso seco hojas, peso seco vainas, peso seco panículas y área foliar. A partir de la información de las variables de área foliar y materia seca se calcularon los siguientes índices de crecimiento: Índice de Área Foliar (IAF), Relación de Área Foliar (RAF), Tasa de Asimilación Neta (TAN), las Tasas Relativas de Crecimiento total (TRC), la Tasa de Crecimiento del Cultivo (TCC), la fracción de materia seca foliar y la fracción de materia seca de tallo (Tabla 2-3).

- **Tabla 2-3.** Componentes de los parámetros de crecimiento determinados en genotipos de sorgo dulce (Poorter *et al.*, 2011).

Índice	Descripción	Fórmula	Unidades
TRC	Tasa relativa de crecimiento	$(1/W)(dW/dt)$	$\text{mg g}^{-1}\text{°Cd}^{-1}$
IAF	Índice de área foliar	LA/P	Adimensional
TCC	Tasa de crecimiento del cultivo	$(1/P)(dW/dt)$	$\text{g m}^{-2}\text{°Cd}^{-1}$
AFE	Área foliar específica	LA/W	m^2kg^{-1}
RAF	Relación de área foliar	LA/W	m^2kg^{-1}
TAN	Tasa de asimilación neta	$(1/LA)(dW/dt)$	$\text{g m}^{-2}\text{°Cd}^{-1}$
FMF	Fracción materia seca foliar	LW/W	g g^{-1}
FMT	Fracción materia seca tallo	SW/W	g g^{-1}

W = materia seca total (g); LA = Área foliar; P = Área foliar por unidad de superficie de suelo (m^2); LW = materia seca foliar por planta (g); SW = materia seca tallo por planta (g); dW/dt = variación de la masa seca en función del tiempo térmico.

- **Uso eficiente de la radiación.** Se calculó para cada genotipo como la pendiente de la regresión lineal entre la materia seca total acumulada en cada muestreo y la radiación fotosintéticamente activa (RFAi 400-700 nm) interceptada por el cultivo (Mastrolli *et al.*, 1995; Linqvist *et al.*, 2005; Narayanan *et al.*, 2013). La estimación de la radiación fotosintéticamente activa interceptada se realizó con la ecuación 2.2 (Varlet-Grancher *et al.*, 1982; Campbell y Norman, 1998).

$$RFAi = 0.47 RS [1 - e^{(-kIAF)}] \quad (2.2)$$

RAFi = Radiación fotosintéticamente activa interceptada ($MJ m^{-2} d^{-1}$).

RS = Radiación solar global ($MJ m^{-2} d^{-1}$), se asumió que el 47% de la radiación solar era fotosintéticamente activa (Howell *et al.*, 1983).

k = Coeficiente de extinción, reportado con valor de 0.6 para sorgo dulce (Ripa, 1992; Curt *et al.*, 1998; Narayanan *et al.*, 2013.).

IAF = Índice de área foliar.

- **Fotosíntesis.** La dinámica de intercambio de gases fue determinada con el sistema portátil de fotosíntesis LI-6200. Una hoja completamente expandida en la parte superior de la planta fue tomada para realizar la medición entre las 11.00 AM a la 1.00 PM, para garantizar una alta densidad de flujo de fotones ($\mu mol m^{-2} s^{-1}$), previo, análisis de las curvas diarias de radiación global, obtenida de la estación agroclimática Davis. Cada medición fue replicada en tres plantas por tratamiento y repetición. La determinación se realizó al inicio de la fase reproductiva de los genotipos de sorgo dulce (45 días) y en el periodo de llenado de grano (90 días). En la fase de llenado de grano se realizaron curvas de respuesta fotosintética a la densidad de flujo de fotones ($\mu mol m^{-2} s^{-1}$) en los genotipos y en las dos localidades.

- **Producción de biomasa por hectárea.** El peso fresco y seco de las hojas (lamina foliar), tallos con vainas y panojas fueron determinados con base en plantas colectadas en dos surcos centrales durante la fase de madurez fisiológica. El peso seco fue determinado a partir de una submuestra después de secado por 72 horas en horno a 70°C.

- **Determinación de azúcares.** Las determinaciones de Brix fueron realizadas con un refractómetro digital (Atago PAL-1, U.S.A., Inc) del jugo extraído de 5 tallos con un molino de tres cilindros en el periodo de madurez fisiológica. Antes de pasar los tallos por el molino fueron pesados y al jugo colectado se le determinó el volumen.

Se estimó además, el contenido de azúcares (g planta^{-1}) en el tallo (ver Ecuación 2.3) con las formulas propuestas por Gutjahr *et al.* (2013) y Subramanian (2013).

$$\text{Contenido azúcar (g)} = \text{Brix} \times 8,827 \times (\text{peso fresco tallo} - \text{peso seco tallo})/1000 \quad (2.3)$$

El valor 8,827 corresponde a la pendiente de regresión entre Brix y la concentración de azúcares en g L^{-1} de jugo.

2.2.5 Diseño experimental

Los genotipos de sorgo dulce se distribuyeron en un diseño de bloques completos al azar con cuatro repeticiones por localidad. Las unidades experimentales fueron conformadas por parcelas de ocho surcos de 5 m de largo, separados a 70 cm con una distancia entre plantas de 10 cm, con una parcela útil de 6 surcos para la medición de variables agronómicas y producción de forraje.

2.2.6 Análisis estadístico

La información registrada fue codificada y archivada en MS Excel y procesada con el programa de estadística SAS® (Statistical Analysis System Institute versión 9.0, 2009) y R (versión 2.15.1). Para determinar las diferencias en materia seca y área foliar entre los genotipos y el cambio de las medias de las mediciones en el tiempo se utilizó el procedimiento mixto (PROC MIXED) del programa SAS para el análisis de medidas repetidas. La modelación de datos experimentales en el marco teórico de los modelos lineales y generalizados mixtos ofrece la posibilidad de analizar datos con estructuras de dependencia, desbalances y falta de normalidad.

Curvas de crecimiento. El análisis preliminar de la dinámica de la materia seca a través del tiempo (térmico) para cada genotipo, indicó que esta presentaba una distribución sigmoidea, por lo que fueron seleccionados seis modelos de función sigmoidea para el ajuste de los datos (Tabla 2-4). Debido al comportamiento en forma acampanada del

área foliar a través del tiempo, se adicionó el modelo gaussiano que presenta una función de esta forma. Para evaluar el ajuste de los modelos a los datos se utilizó el procedimiento estadístico de modelos mixtos no lineales (PROC NL MIXED) con el programa de estadística SAS (Tabla 2-4).

Tabla 2-4. Modelos de regresión no lineales utilizados para el ajuste de los datos de materia seca y área foliar.

Nombre y referencia	Función	Ecuación	Definición coeficientes
Logística (Verhulst, 1838)	Sigmoidea	$Y = \alpha \div 1 + e^{-\beta(t-k)}$	<p>Y es la variable respuesta (biomasa), α es el máximo valor de biomasa, β es una constante que determina la curvatura del patrón de crecimiento, y k es el punto de inflexión en el cual la tasa de crecimiento alcanza su valor máximo. En el tiempo k, la tasa de crecimiento relativo es β/2. δ parámetro creado para eliminar la simetría de la curva logística (si δ es igual a 1, la ecuación de Richards se convierte en logística). En la ecuación Beta, te es el tiempo donde se alcanza el valor máximo de biomasa y tm es el tiempo donde ocurre la tasa máxima de crecimiento.</p>
Gompertz (1825)	Sigmoidea	$Y = \alpha e^{-e^{-\beta(t-k)}}$	
Weibull (1951)	Sigmoidea	$Y = \alpha (1 - e^{-\beta tk})$	
Beta (Yin et al., 2003)	Sigmoidea	$Y = \alpha \left(1 + \frac{te-t}{te-tm}\right) \left(\frac{t}{te}\right)$	
Richards (1959)	Sigmoidea	$Y = \alpha \div (1 + \delta e^{-\beta(t-k)})^{1/\delta}$	
MMF (Morgan et al., 1975)	Sigmoidea	$Y = \frac{\alpha \beta + kx^\delta}{\beta + x^\delta}$	
Gausiano	Curva con forma de campana	$Y = \alpha e^{-(t-\beta)^2 \div 2k^2}$	<p>Y es la variable de respuesta, t (grados día, °Cd) es la variable explicativa, α es la asíntota o valor máximo de biomasa, β es la posición del centro de la cima (asíntota) y k coeficiente que controla el ancho de la campana.</p>

Para ajustar los modelos el programa utiliza el método de máxima verosimilitud. El procedimiento permite realizar el ajuste de modelos mixtos no lineales, en los cuales los efectos fijos y aleatorios presentan relaciones no lineales en la variable de respuesta.

Al ajustar distintos modelos a un mismo conjunto de datos, es necesario utilizar criterios para la comparación de los ajustes y por tanto para la selección del modelo. Para la cual se utilizó el criterio de información de Akaike (AIC) y la significancia de los coeficientes estimados.

Los coeficientes de correlaciones de Pearson fueron estimados con el procedimiento PROC CORR del paquete estadístico SAS.

2.3 Resultados

2.3.1 Caracterización zonas de estudio

▪ **Caracterización climática.** La clasificación de las regiones de estudio por zonas de vida bioclimáticas de acuerdo a las condiciones de temperatura media y precipitación total anual las ubicó en bosque muy seco tropical (bms-T, Palmira) y bosque húmedo tropical (Villavicencio).

Se encontraron diferencias entre las localidades en las variables climáticas registradas durante las fases de crecimiento de los genotipos. Los valores más altos en temperaturas mínimas, radiación solar diaria (Rad), radiación solar acumulada (Rads), y evapotranspiración del cultivo (ETc) fueron registrados en Palmira en los tres periodos de crecimiento. En Villavicencio se reportaron valores altos en precipitación y humedad relativa (Tabla 2-5).

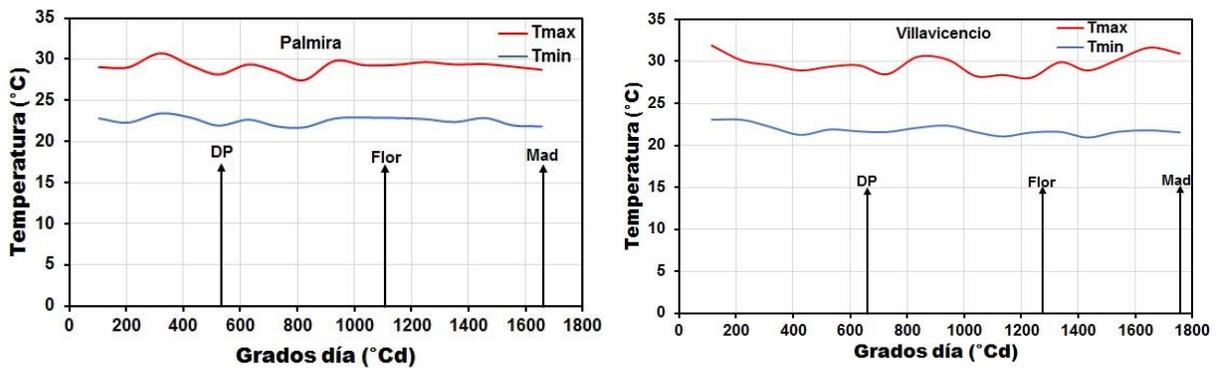
Tabla 2-5. Datos promedios de temperatura máxima (Tmax), temperatura mínima (Tmin), grados día (TT), radiación solar (Rad), radiación solar acumulada (Rads), humedad relativa (HR), precipitación total (PRETO) y evapotranspiración del cultivo (ETc).

Variable	Palmira			Villavicencio		
	GS1 ¹	GS2	GS3	GS1	GS2	GS3
Tmax (°C)	29,3	28,9	29,3	29,8	29,1	30,2
Tmin (°C)	22,7	22,4	22,4	22,2	21,7	21,6
TT (°Cd)	586	1156	1657	645	1263	1649
Rad (MJ m ⁻² día ⁻¹)	14,3	14,5	14,3	13,2	13,2	13,7
Rads (MJ m ⁻²)	558	566	502	569	567	356
HR (%)	85	84	82	89	87	86
Preto (mm)	126,8	93,4	52,3	547	556	311
ETc (mm)	126,1	126,8	116,7	127,0	127,2	82,1

¹ GS= hace referencia a los estados de crecimiento del sorgo

La temperatura máxima durante el ciclo de crecimiento de los genotipos de sorgo fluctuó entre 27,5 °C a 30,7 °C en Palmira y 28,0 °C a 31,9 °C en Villavicencio (Figura 2-1). Las variaciones en temperatura mínimas encontradas en Palmira fueron 21,7 °C a 23,4 °C, mientras que en Villavicencio fueron menores con variaciones entre 20,9 °C a 23,1 °C. Es interesante resaltar los valores altos de temperaturas mínimas durante el ciclo de crecimiento de los genotipos registrados en Palmira, localidad ubicada a mayor altura sobre el nivel del mar que Villavicencio.

Figura 2-1. Variación de las temperaturas máximas y mínimas durante el ciclo de crecimiento de los genotipos de sorgo dulce en las zonas de estudio en 2010.



El balance hídrico climático fue desfavorable en precipitación en la localidad de Palmira, en donde se presentaron varios periodos secos durante el ciclo de crecimiento de los genotipos de sorgo (Figura 2-2). Por otro lado, en Villavicencio se reportaron excesos de lluvia en toda la estación de crecimiento de los sorgos con un total de precipitación de 1414 mm, comparado con los 273 mm registrados en Palmira.

Los periodos secos en Palmira mostraron la mayor radiación solar en esta localidad (Figura 2-3). Los promedios semanales de radiación solar registrados en el ciclo de crecimiento fluctuaron entre 12,2 MJ m⁻² d⁻¹ a 17,4 MJ m⁻² d⁻¹ en Palmira y 10,9 MJ m⁻² d⁻¹ a 15,7 MJ m⁻² d⁻¹ en Villavicencio.

En relación con la humedad relativa en Palmira fluctuó entre 79% a 90%, mientras que en Villavicencio se registraron valores de 84% y 90% (Figura 2-4).

Figura 2-2. Balance hídrico climático durante el ciclo de crecimiento de los genotipos de sorgo dulce en las zonas de estudio en 2010.

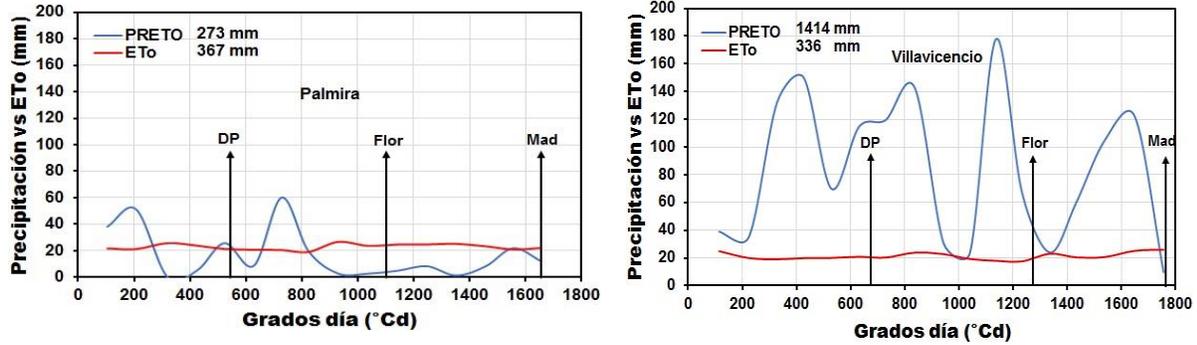


Figura 2-3. Variación de la radiación solar durante el ciclo de crecimiento de los genotipos de sorgo dulce en las zonas de estudio en 2010.

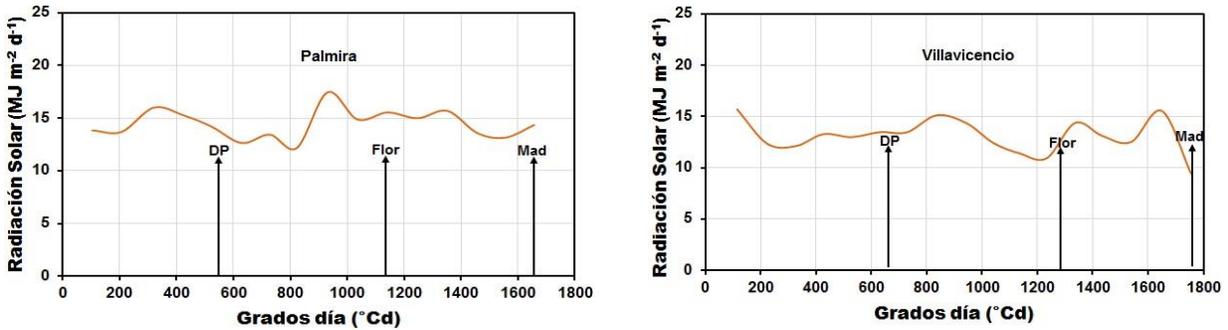
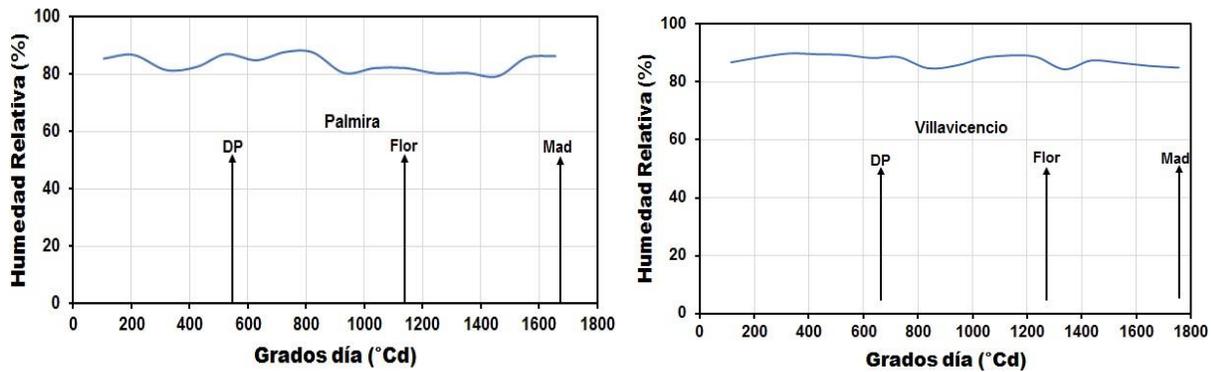


Figura 2-4. Variación de la humedad relativa durante el ciclo de crecimiento de los genotipos de sorgo dulce en las zonas de estudio en 2010.



En general las variables climáticas de la localidad de Palmira se encontraron más cercanas a los requerimientos para una especie C_4 como el sorgo dulce, con valores altos de radiación solar, temperaturas mínimas y máximas entre 21,7°C a 31,7°C (respectivamente) y condiciones de precipitación más ajustadas a una especie adaptada a zonas con menor oferta hídrica. Sin embargo, las temperaturas mínimas altas observadas en esta localidad no fueron favorables para la concentración de azúcares en el jugo del tallo, al considerar los resultados reportados en los ensayos realizados en el año 2009 (capítulo 1).

- **Caracterización edáfica.** Los suelos donde ubicaron los experimentos en las dos localidades analizadas ocupan la posición de piedemonte, con una topografía ligeramente inclinada, pendiente 0-3%. Se diferencian en el grado de fertilidad alto en Palmira y bajo en Villavicencio, en la textura arcillosa del primero y franca en el segundo, el cual además presenta un drenaje imperfecto con un nivel freático fluctuante a 50 cm de profundidad, evidente en la época lluviosa. El valor del pH y en general las características físico-químicas se acercan más a los requerimientos específicos del sorgo dulce, acorde a lo reportado por Smith y Frederiksen (2000). Los datos de los suelos se presentan en la Tabla 2-6.

Tabla 2-6. Características físico-químicas de los suelos en las localidades de Palmira y Villavicencio en 2010.

Localidad	pH	MO %	P	Ca	Mg	K	Na	Textura			Clase
			mg kg ⁻¹			Cmol _c kg ⁻¹		A (%)	L (%)	Ar (%)	
Palmira	7,1	2,7	103,5	21,5	12,1	0,37	0,15	25,0	27,0	48,0	Ar
Villavicencio	4,6	1,6	19,1	1,4	0,6	0,13	0,10	48,0	29,0	23,0	F

2.3.2 Efecto de las condiciones ambientales sobre acumulación de materia seca y distribución de asimilados.

Tal como se describió arriba, en la dinámica de crecimiento sigmoideo en las especies anuales se distinguen tres periodos característicos, uno de máxima aceleración del crecimiento (P1) otro donde se alcanza la tasa máxima de crecimiento (Pi) y el último que

corresponde a la reducción de la velocidad de la tasa de crecimiento (P2) (Hunt, 1982; Poorter, 1989; Paine *et al.*, 2012).

- **Dinámica de acumulación de la materia seca.** En Palmira se encontraron diferencias significativas ($P < 0,01$) en la dinámica de acumulación de la materia seca total, en tallos, en hojas, en vainas y en panículas, entre los periodos de muestreo (medidas en grados día) y en la interacción periodo por genotipo (Anexo 2-1). Entre genotipos solo se observaron diferencias estadísticas ($P < 0,01$) en la biomasa de tallos, hojas, vainas y panículas. En Villavicencio se presentaron diferencias significativas ($P < 0,01$) en la acumulación de materia seca total, en tallos, hojas y vainas entre periodos, genotipos y en la interacción periodo por genotipo (Anexo 2-1).

El análisis estadístico, realizado con los datos de acumulación de materia seca por periodo de muestreo, resultó en seis modelos con ajuste significativo a los valores observados en los tres genotipos de sorgo y los coeficientes presentaron significancia ($P < 0,01$) en Palmira (Tabla 2-7) y Villavicencio (Tabla 2-8). Los modelos Beta y Gausiano fueron los que mejor representaron la dinámica de acumulación de la materia seca total de los genotipos de sorgo en Palmira y Villavicencio, de acuerdo al criterio de información de Akaike (AIC).

En la Figura 2-5 se observa el grado de ajuste de los modelos Beta y Gausiano, comparado con el Logístico, sobre los datos registrados de materia seca en los genotipos de sorgo HT7, HT46 y JJT18 en la localidad de Palmira. Los tres modelos presentaron un ajuste adecuado sobre el patrón general de incremento de biomasa en los tres genotipos, sin embargo, el modelo Beta se ajustó mejor a los datos bajos de materia seca observados durante el periodo de crecimiento exponencial.

En Palmira JJT18 presentó un crecimiento rápido en la etapa vegetativa al terminar la fase de crecimiento exponencial con una acumulación en grados día de 598°Cd , comparado con los 610°Cd requeridos por HT7 y 758°Cd en HT46 (Figura 2-5). JJT18, alcanzó la tasa máxima de crecimiento con un tiempo térmico de 1196°Cd , mientras que HT7 y HT46 requirieron de 1219°Cd y 1515°Cd , respectivamente.

Tabla 2-7. Coeficientes estimados del ajuste de modelos a los datos de acumulación de materia seca total en tres genotipos de sorgo y el criterio de información Akaike (AIC) para Palmira en 2010.

Genotipo	Modelo	α	B	κ	δ	AICC ¹
HT46	Logístico	406,7 **	0,003 **	1394 **		598,0
	Gompertz	453,3 **	0,0018 **	1260 **		599,6
	Weibull	400,0 **	0,0006 **	3,1 **		600,5
	Beta	403,6 *	2233 *	1515 **		594,5
	Gausiano	354,5 **	2067 **	636 **		595,6
	Richards	390,0 **	0,0036 *	1394 **	0,94 *	600,5
	MMF	-90,6 **	5023 ns	1999 ns	0,92 **	666,7
HT7	Logístico	278,3 **	0,0044 **	1173 **		594,5
	Gompertz	375,8 *	0,002 *	1175 **		590,0
	Weibull	271,1 **	0,0008 **	3,5 **		590,7
	Beta	244,5 **	1662 **	1219 **		588,6
	Gausiano	245,4 **	1692 **	487 **		589,9
	Richards	320,0 **	0,003 **	471 **	5,49 **	593,4
	MMF	-87,0 **	5019 ns	1994 ns	0,91 **	654,3
JJT18	Logístico	289,9 **	0,0046 **	1139 **		577,0
	Gompertz	391,5 **	0,002 *	1140 **		576,4
	Weibull	248,3 **	0,0008 **	50,4 **		574,3
	Beta	259,9 **	1628 **	1196 **		570,5
	Gausiano	260,9 **	1660 **	477 **		573,0
	Richards	298,4 **	0,004 **	1061 **	1,31 **	578,8
	MMF	-91,1 ns	5021	1998 ns	0,92 **	652,9

¹ A menor valor de AIC mejor es el ajuste.

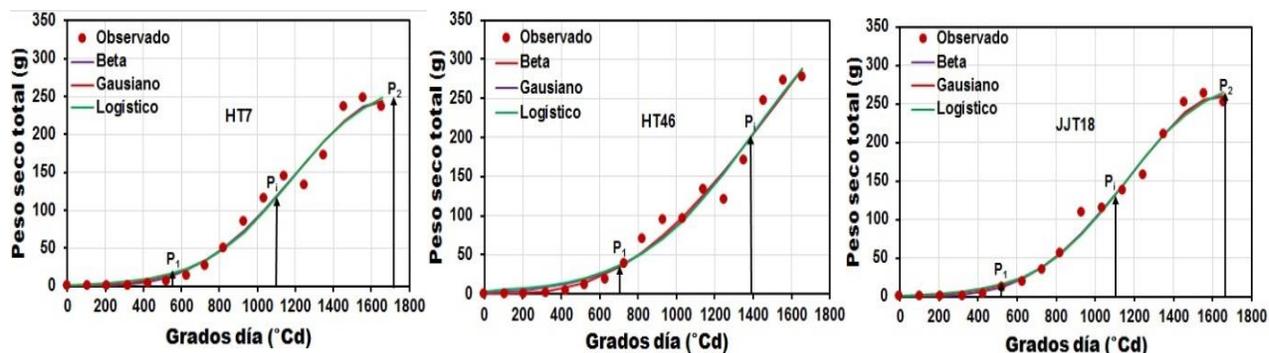
El análisis de la dinámica de acumulación de materia seca con el modelo Beta indicó que JJT18 acumulo un total de 1628°Cd para lograr su valor máximo de biomasa de 259,9 g y HT7 requirió de 1662°Cd para obtener un valor de materia seca total de 244,5 g. HT46 al presentar una mayor duración de su ciclo de crecimiento (2233°Cd) logro el valor más alto de acumulación de materia seca (403,6 g) (Tabla 2-7).

Tabla 2-8. Coeficientes estimados de los modelos ajustados a los datos de acumulación de materia seca total en tres genotipos de sorgo dulce y el criterio de información Akaike (AIC) para Villavicencio en 2010.

Genotipo	Modelo	α	β	κ	δ	AICC ¹
HT46	Logístico	216,1 **	0,004 **	1317 **		577,7
	Gompertz	279,1 **	0,0017 **	1279 **		582,1
	Weibull	220,1 **	0,0007 **	3,2 **		582,1
	Beta	170,4 **	1712 **	1300 **		550,9
	Gausiano	176,7 **	1828 **	527 **		573,6
	Richards	171,5 **	0,49 **	1538 **	0,0049 **	574,6
	MMF	-62,4 ns	5009 ns	1992 ns	0,85 **	645,1
HT7	Logístico	237,6 **	0,004 **	1295 **		551,8
	Gompertz	354,6 **	0,0015 **	1358 **		548,6
	Weibull	255,8 **	0,0007 **	3,1 **		549,6
	Beta	214,9 **	1932 **	1357 **		547,9
	Gausiano	210,6 **	1918 **	579 **		549,3
	Richards	242,4 **	0,004 **	1332 **	0,945 **	554,5
	MMF	-70,4 **	5011 ns	1992 ns	0,8715 **	646,5
JJT18	Logístico	193,3 *	0,003 *	1338 **		530,1
	Gompertz	206,9 **	0,0017 **	1153 **		514,6
	Weibull	643,2 **	0,00029 **	2,0 **		526,9
	Beta	150,9 **	1942 **	1247 **		514,2
	Gausiano	144,6 **	1858 **	609 **		520,0
	Richards	194,8 **	0,0021 **	414 **	4,8 **	523,7
	MMF	-50,5 **	5005 **	1994 **	0,83 **	580,2

¹ A menor valor de AIC mejor es el ajuste.

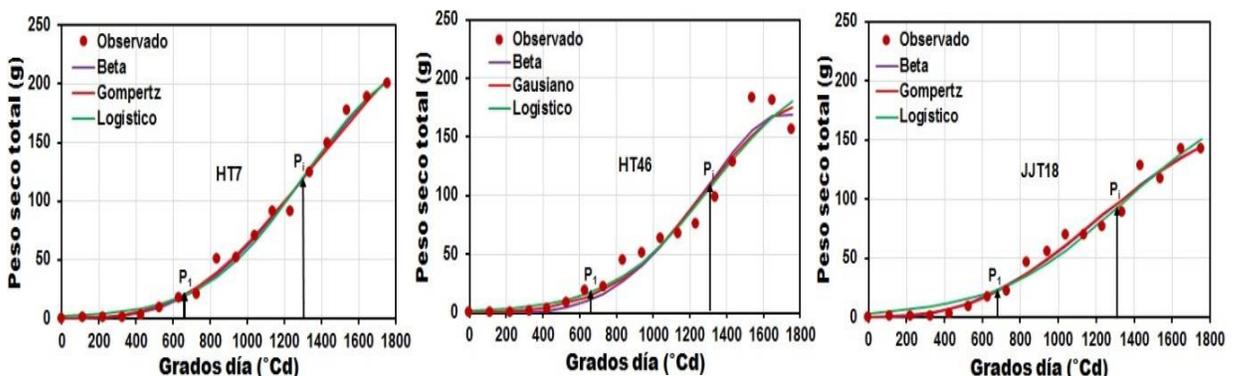
Figura 2-5. Valores observados y modelados de la acumulación de materia seca total (g planta⁻¹) de los genotipos de sorgo dulce HT7, HT46 y JJT18 en Palmira, 2010.



En Villavicencio, los modelos Beta, Gausiano y Logístico presentaron un buen ajuste sobre el patrón de incremento de biomasa registrado en HT7, HT46 y JJT18, con el modelo Beta representando mejor el ajuste a los datos menores de materia seca observados durante el periodo de crecimiento exponencial (Figura 2-6).

En esta localidad, los genotipos de sorgo presentaron una duración similar de la fase exponencial con valores de 679°Cd para HT7, 650°Cd para HT46 y 624°Cd para JJT18. La duración del periodo de máximo crecimiento fue menor en el genotipo JJT18 (1247°Cd) y mayor en HT7 (1357°Cd) (Tabla 2-8). El análisis de la dinámica de acumulación de materia seca con el modelo Beta indicó, que la menor duración en el ciclo de crecimiento del genotipo HT46 (1712°Cd) conlleva a una menor acumulación de materia seca (170,4 g) de este genotipo en Villavicencio. En tanto que, el genotipo HT7 presentó un ciclo de crecimiento más prolongado (1932°Cd) y un valor más alto de materia seca (214,9 g). JJT18 con valores más bajos de materia seca (150,9 g) a pesar de tener un ciclo de crecimiento (1942°Cd) superior al registrado por HT7 y HT46 (Figura 2-6).

Figura 2-6. Valores observados y modelados de la acumulación de materia seca total (g planta⁻¹) de los genotipos de sorgo dulce HT7, HT46 y JJT18 en Villavicencio, 2010.

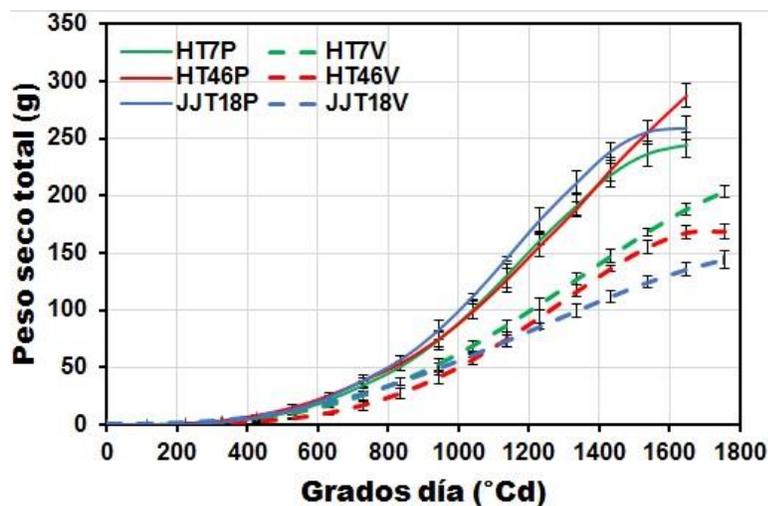


Se observaron diferencias en el patrón de acumulación de materia seca total entre los genotipos y entre los ambientes. Las condiciones ambientales de Palmira, favorecieron la dinámica de acumulación en materia seca en los genotipos de sorgo dulce HT7, HT46 y

JJT18 (Figura 2-7). En Villavicencio, el genotipo HT7 supero significativamente en peso seco total ($214,9 \text{ g planta}^{-1}$) a HT46 ($170,4 \text{ g planta}^{-1}$) y JJT18 ($150,9 \text{ g planta}^{-1}$).

La dinámica de acumulación de materia seca en el tallo y hojas de los genotipos de sorgo fue adecuadamente simulada por los modelo Beta y Gausiano, de acuerdo al criterio de información de Akaike (AIC).

Figura 2-7. Efecto de las variaciones ambientales sobre la acumulación de materia seca total (g planta^{-1}) en los genotipos de sorgo dulce HT7, HT46 y JJT18 en las localidades de Palmira (P) y Villavicencio (V).

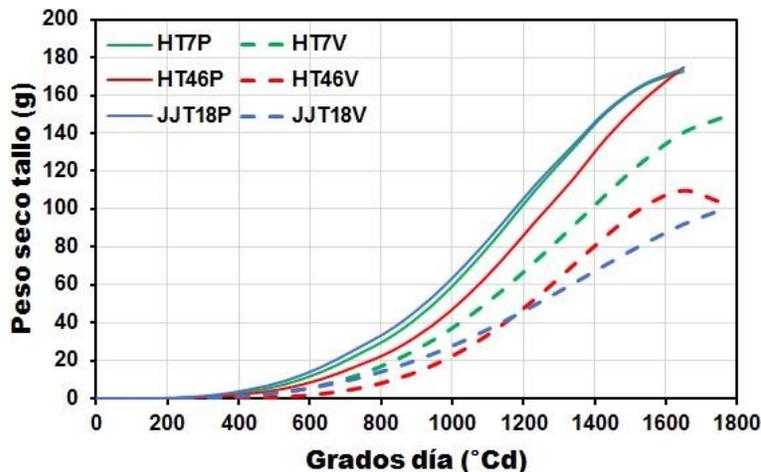


Los resultados muestran diferencias en el patrón de acumulación de materia seca en tallos entre los genotipos y entre los ambientes (Figura 2-8). Los mayores valores de acumulación de materia seca en el tallo fueron registrados por los genotipos HT7, HT46 y JJT18 que se desarrollaron bajo las condiciones ambientales de Palmira.

En Palmira no se encontraron diferencias en la dinámica de acumulación de materia seca en el tallo entre los genotipos HT7 y JJT18. HT46, por otro lado, presentó una menor acumulación de materia seca durante el crecimiento exponencial y un tiempo térmico mas prolongado para alcanzar la tasa máxima de crecimiento en el periodo de

crecimiento lineal. El modelo Beta indicó que el tiempo en grados día para alcanzar las tasas máximas de crecimiento en tallo fue de 1375°Cd en HT46, 1240°Cd en HT7 y de 1225°Cd en JJT18 (Figura 2-8). En Villavicencio, al contrario de Palmira, se presentaron diferencias en la dinámica de acumulación de materia seca en tallos entre los genotipos de sorgo. El genotipo de sorgo HT7 presentó una acumulación de materia seca en el tallo superior a lo registrado por HT46 y JJT18. La acumulación de materia seca en tallos en HT46 y JJT18 fue afectada negativamente por las condiciones ambientales presentes en Villavicencio.

Figura 2-8. Efecto de las variaciones ambientales sobre la acumulación de materia seca en tallos (g planta^{-1}) en los genotipos de sorgo dulce HT7, HT46 y JJT18 en las localidades de Palmira (P) y Villavicencio (V).

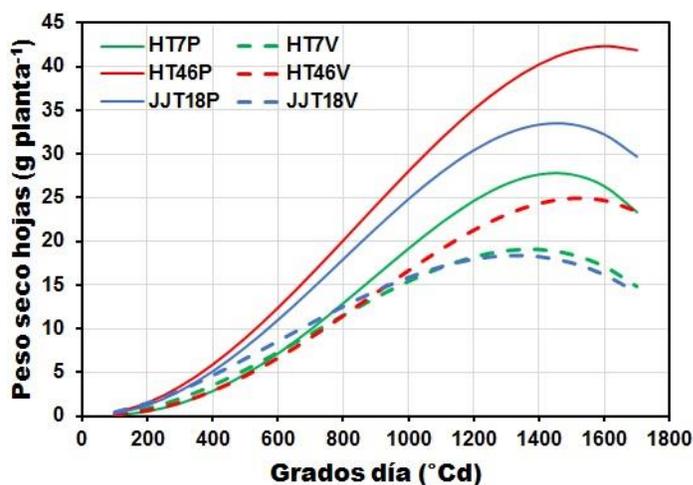


Se observaron diferencias en el patrón de acumulación de materia seca en hojas entre los genotipos y entre los ambientes (Figura 2-9). Los mayores valores de acumulación de materia seca en hojas fueron encontrados en los genotipos de sorgo dulce que crecieron bajo las condiciones ambientales de Palmira.

En Palmira y Villavicencio la dinámica de acumulación de materia seca en las hojas fue diferente entre los genotipos. Los genotipos HT46 y JJT18 presentaron en las hojas una mayor demanda por fotoasimilados durante los periodos de crecimiento exponencial y lineal al compararlo con HT7. Mientras que en Villavicencio HT46 fue el que presentó la

mayor demanda por asimilados durante la fase lineal de crecimiento (Figura 2-9). Como resultado de la demanda por asimilados de las hojas en los periodos de crecimiento exponencial y lineal el genotipo HT46 presentó el mayor peso foliar en Palmira (42,4 g) y Villavicencio (24,9 g).

Figura 2-9. Efecto de las variaciones ambientales sobre la acumulación de materia seca en hojas (g planta^{-1}) en los genotipos de sorgo dulce HT7, HT46 y JJT18 en las localidades de Palmira (P) y Villavicencio (V).



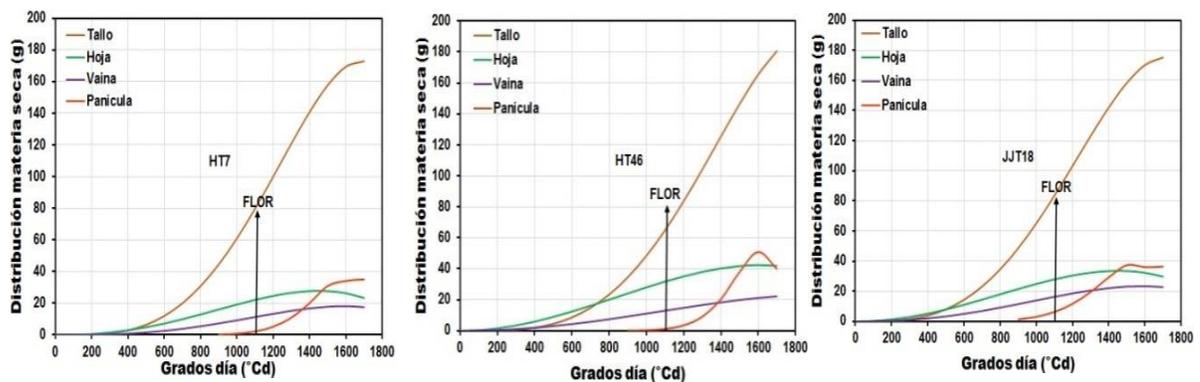
En Palmira los genotipos JJT18 (33,5 g) y HT7 (27,8 g) asignaron mayores cantidades de asimilados para el crecimiento foliar comparado con lo registrado por HT7 (19,1 g) y JJT18 (18,4 g) en Villavicencio.

- **Distribución de asimilados en tallo, hojas vainas y panículas.** Durante el ciclo de crecimiento de los genotipos HT7, HT46 y JJT18 la planta asignó los asimilados producidos en la hoja de acuerdo a la demanda generada por los vertederos de las hojas, las vainas, los tallos y las panículas en los periodos de crecimiento exponencial, lineal y de senescencia. No se encontraron diferencias entre genotipos en la distribución de los fotoasimilados a los diferentes órganos de la planta.

En la fase de crecimiento exponencial los genotipos HT7, HT46 y JJT18 condicionaron una mayor asignación de los asimilados, producidos en la hoja fotosintéticamente activa (fuente), al crecimiento y expansión de las hojas (vertederos) en los ambientes de Palmira (Figura 2-10) y Villavicencio (Figura 2-11). Al iniciarse el periodo de crecimiento lineal el tallo se convirtió en el demandante principal de los asimilados formados por el proceso fotosintético. Durante este periodo la planta continuó con la asignación de asimilados para el crecimiento y expansión foliar y formación de las vaina hasta alcanzar la máxima acumulación al final de la fase de crecimiento lineal. Hacia finales de este periodo se dio inicio a la demanda de asimilados por parte de la panícula en los tres genotipos de sorgo.

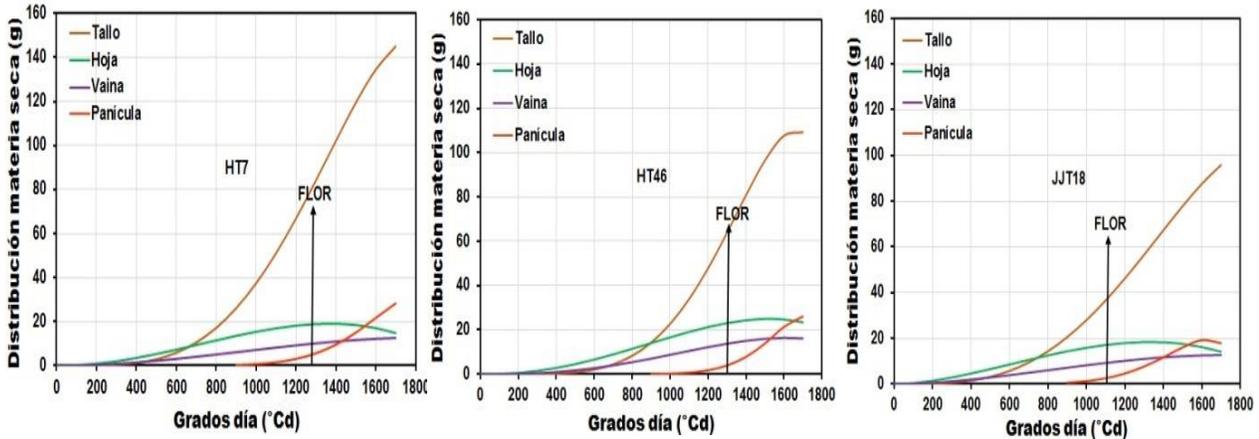
Durante la fase de senescencia la planta de sorgo dulce continuó con la distribución de asimilados al tallo y a la panícula. Como se observa en las figuras 2-10 y 2-11, en el periodo de llenado de grano el tallo continuo con una alta demanda por asimilados a pesar de la demanda generada por el crecimiento de la panícula y el llenado de grano.

Figura 2-10. Distribución fotoasimilados (g planta⁻¹) en tallo, hojas, vaina y panícula de los genotipos de sorgo dulce HT7, HT46 y JJT18 en las condiciones ambientales de Palmira.



En los genotipos HT7, HT46 y JJT18 el tallo se constituyó en el vertedero con mayor demanda de los fotoasimilados producidos por las hojas bajo las condiciones ambientales de Palmira (Figura 2-10) y Villavicencio (Figura 2-11).

Figura 2-11. Distribución de fotoasimilados (g planta^{-1}) en tallo, hojas, vaina y panícula de los genotipos de sorgo dulce HT7, HT46 y JJT18 en las condiciones ambientales de Villavicencio.



En Villavicencio, las condiciones de baja fertilidad de los suelos, el estrés hídrico por exceso de precipitación y la baja radiación solar, ocasionaron una reducción en la cantidad de asimilados asignados por la planta en los diferentes vertederos, pero no afectaron la dirección en la asignación de la distribución de asimilados. El tallo de la planta de sorgo fue el órgano más sensible a las condiciones de estrés ambiental reportadas en Villavicencio.

Los resultados del análisis de distribución de los asimilados en los genotipos HT7, HT46 y JJT18 indicaron que la demanda por fotoasimilados en los diferentes órganos de la planta fue: Tallo > Panícula > Hojas > Vainas.

2.3.3 Efecto de las condiciones ambientales sobre la dinámica de expansión foliar.

En las localidades de Palmira y Villavicencio, se encontraron diferencias significativas ($P < 0,01$) en el área foliar (cm^2) entre los periodos de muestreo ($^{\circ}\text{Cd}$) y en la interacción. Área foliar periodos por genotipo, solo en Villavicencio (Anexo 2-1).

El análisis estadístico arrojó cinco modelos con ajuste significativo a los valores observados en los genotipos HT7, HT46 y JJT18 y los coeficientes presentaron significancia ($P < 0,01$) en Palmira (Tabla 2-9) y Villavicencio (Tabla 2-10). Los modelos Beta y Gausiano fueron los que mejor representaron la dinámica de incremento en el área foliar de los genotipos HT7, HT46 y JJT18 en Palmira y Villavicencio, de acuerdo al criterio de información de Akaike (AIC).

En la Figura 2-12 se observa el grado de ajuste de los modelos Beta y Gausiano, comparados con el Logístico, sobre los datos observados de área foliar en los genotipos HT7, HT46 y JJT18 en las condiciones ambientales de Palmira. La representación gráfica mostró, que los modelos Beta y Gausiano, ajustaron mejor cuando se evaluó la dinámica de expansión del área foliar registrada en los tres genotipos, mientras que el modelo Logístico, no representó adecuadamente, el periodo de crecimiento declinante del área foliar.

Tabla 2-9. Coeficientes estimados de los modelos ajustados a los datos de área foliar (cm²) en tres genotipos de sorgo dulce y el criterio de información Akaike (AIC) para Palmira en 2010.

Genotipo	Modelo	A	β	K	δ	AIC ¹
HT46	Logístico	4782 **	0,01 **	725 **		1021,9
	Gompertz	4799 **	0,007 **	659 **		1026,0
	Weibull	4325 **	0,002 ns	782 **		1073,8
	Beta	5427 **	1328 **	828 **		1019,1
	Gausiano	5523 **	1260 **	399 **		1007,2
	MMF	-1387 ns	5039 ns	214843 **	0,69 **	1089,8
HT7	Logístico	4532 **	0,01 **	721 **		1040,8
	Gompertz	4529 **	0,008 *	652 **		1044,0
	Weibull	3863 **	0,002 ns	342 ns		1445,0
	Beta	5257 **	1298 **	814 **		1016,8
	Gausiano	5425 **	1221 **	373 **		995,6
	MMF	-1445 ns	5041 **	218696 **	0,68 **	1096,5
JJT18	Logístico	4683 **	0,01 **	703 **		1025,9
	Gompertz	4699 **	0,007 **	630 **		1029,6
	Weibull	4043 **	0,002 ns	648 ns		1089,5
	Beta	5284 **	1316 **	791 **		1024,0
	Gausiano	5407 **	1248 **	408 **		1013,0
	MMF	-1368 ns	5039 **	219616 **	0,68 **	1089,4

¹ A menor valor de AIC mejor es el ajuste.

En Palmira los genotipos de sorgo presentaron un incremento progresivo del área foliar con el tiempo térmico (Figura 2-12). El análisis de la dinámica de incremento del área foliar realizada con el modelo Gausiano indicó que los genotipos HT7, HT46 y JJT18 presentaron una acumulación de grados días similar para lograr su máxima expansión foliar, 1221°Cd, 1260°Cd y 1248°Cd, respectivamente. El área foliar máxima desplegada fue de 5425 cm² planta⁻¹ para HT7, 5523 cm² planta⁻¹ para HT46 y 5407 cm² planta⁻¹ para JJT18 (Tabla 2-9). El tiempo térmico requerido por los genotipos HT7 y JJT18 para alcanzar la máxima expansión foliar coincidió con el periodo de la tasa máxima de crecimiento, mientras que en HT46 la expansión foliar ocurrió antes de la tasa máxima de crecimiento.

Tabla 2-10. Coeficientes estimados de los modelos ajustados a los datos de área foliar (cm²) en tres genotipos de sorgo dulce y el criterio de información Akaike (AIC) para Villavicencio en 2010.

Genotipo	Modelo	α	β	κ	δ	AICC ¹
HT46	Logístico	3959 **	0,005 **	767 **		1053,1
	Gompertz	4077 **	0,004 **	652 **		1048,6
	Weibull	3978 **	0,001 **	2,7 **		1049,9
	Beta	4191 **	1465 **	863 **		1032,3
	Gausiano	4158 **	1446 **	526 **		1042,6
	MMF	-528 ns	4017 *	139298 **	0,66 **	1098,7
HT7	Logístico	3547 **	0,009 **	703 **		1106,3
	Gompertz	3409 **	1,1 **	765 **		1101,6
	Weibull	3534 **	0,001 **	4,0 **		1044,2
	Beta	3961 **	1376 **	778 **		1037,0
	Gausiano	4040 **	1309 **	456 **		1031,3
	MMF	-661 ns	4022 ns	176881 **	0,63 **	1111,6
JJT18	Logístico	3245 **	0,01 **	670 **		1061,6
	Gompertz	3296 **	1,01 *	803 **		2257,6
	Weibull	3239 **	0,001 **	4,9 **		1063,2
	Beta	4191 **	1465 **	863 **		1032,3
	Gausiano	3867 **	1230 **	427 **		1039,0
	MMF	-811 ns	4025 **	211559 **	0,60 **	1125,8

¹ A menor valor de AIC mejor es el ajuste.

En Villavicencio, al igual que en Palmira, los modelos Beta y Gausiano presentaron un mejor ajuste de los datos observados de área foliar de los genotipos HT7, HT46 y JJT18 comparado con los resultados del modelo logístico (Figura 2-13).

Figura 2-12. Valores observados y modelados del área foliar ($\text{cm}^2 \text{ planta}^{-1}$) en los genotipos de sorgo dulce HT7, HT46 y JJT18 en Palmira en 2010.

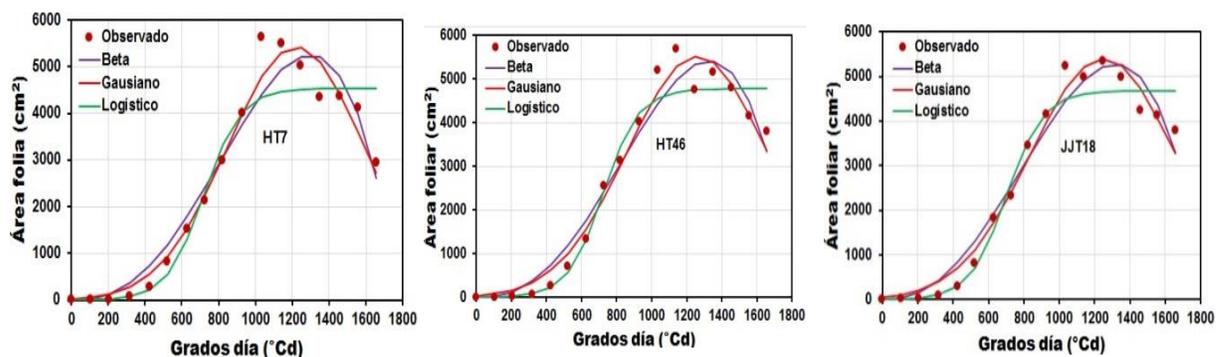
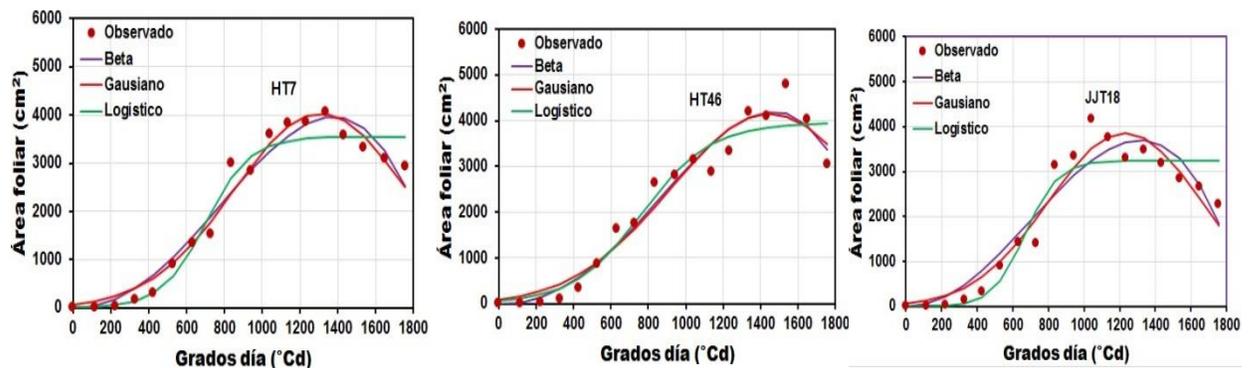


Figura 2-13. Valores observados y modelados del área foliar ($\text{cm}^2 \text{ planta}^{-1}$) en los genotipos de sorgo dulce HT7, HT46 y JJT18 para Villavicencio en 2010.



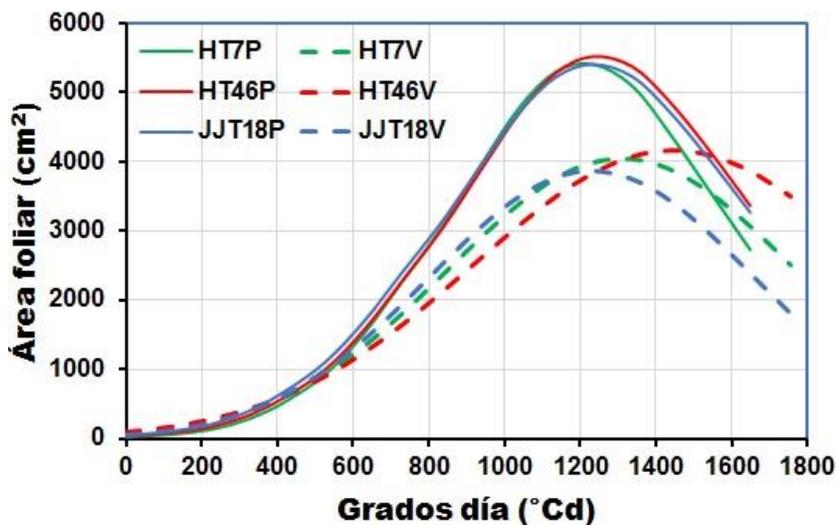
El análisis de la dinámica de expansión foliar realizada con el modelo Gausiano indicó que los genotipos HT7, HT46 y JJT18 en Villavicencio presentaron diferencias en el tiempo térmico requerido para alcanzar la máxima expansión foliar, 1309°Cd , 1446°Cd y 1230°Cd , respectivamente (Tabla 2-10). La duración prolongada del periodo de expansión foliar permitió a los genotipos HT7 y HT46 lograr valores altos de área foliar, $4040 \text{ cm}^2 \text{ planta}^{-1}$ y $4158 \text{ cm}^2 \text{ planta}^{-1}$, respectivamente, comparado con el valor registrado por

JJT18 ($3867 \text{ cm}^2 \text{ planta}^{-1}$). Bajo las condiciones ambientales de Villavicencio HT46 logró la máxima expansión foliar después de alcanzar el tiempo de tasa máxima de crecimiento.

El periodo de máxima expansión foliar coincidió con la floración en los genotipos de sorgo y el tiempo térmico donde se alcanzó el área foliar máximo fue cercano al tiempo de la tasa máxima de acumulación de materia seca total en los genotipos HT7 y JJT18.

Diferencias significativas en la expansión foliar en los genotipos de sorgo fueron encontradas entre los genotipos y entre los ambientes. Las condiciones ambientales en Palmira, permitieron a los genotipos de sorgo dulce HT7, HT46 y JJT18 expandir un área foliar mayor en un tiempo térmico menor, sin presentarse diferencias en la dinámica de expansión foliar (Figura 2-14). En Villavicencio los genotipos presentaron diferencias en la dinámica de expansión foliar en la fase lineal y en la duración del área foliar fotosintéticamente activa. HT46 fue el genotipo que requirió mayor tiempo térmico (1446°Cd) para lograr la máxima expansión foliar.

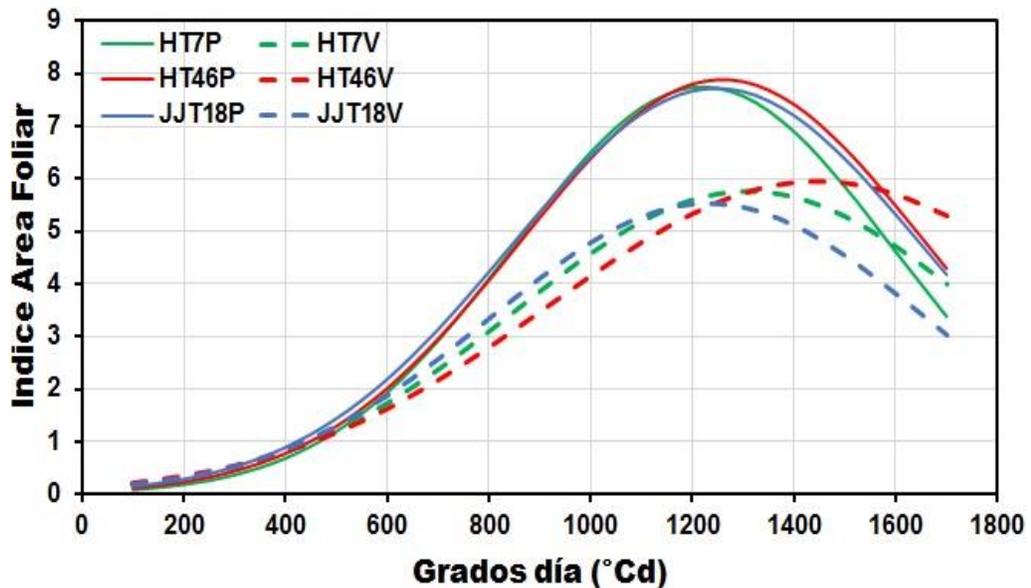
Figura 2-14. Efecto de las variaciones ambientales sobre el área foliar ($\text{cm}^2 \text{ planta}^{-1}$) en los genotipos de sorgo dulce HT7, HT46 y JJT18 en las localidades de Palmira (P) y Villavicencio (V).



2.3.4 Efecto de las condiciones ambientales sobre los índices de crecimiento.

- Índice de área foliar (IAF).** Se observaron diferencias estadísticas ($P < 0,01$) en el IAF entre los periodos de muestreo (Anexo 2-1). No se encontraron diferencias en el IAF entre los genotipos de sorgo dulce. En Palmira los genotipos HT7 (7,7), HT46 (7,9) y JYT18 (7,7) lograron los mayores valores de IAF cuando alcanzaron un tiempo térmico de 1221°Cd, 1260°Cd y 1248°Cd, respectivamente (Figura 2-15). En Villavicencio las condiciones ambientales acortaron el IAF de los genotipos HT7 (5,8), HT46 (5,9) y JYT18 (5,5). El genotipo HT46 requirió de un tiempo térmico mayor (1446°Cd) para lograr el valor más alto de IAF. El valor máximo IAF coincidió con el periodo de antesis e inicios de llenado de grano en los genotipos de sorgo dulce.
- Tasa relativa de crecimiento (TRC).** Las mayores TRC de los genotipos HT7, HT46 y JYT18 fueron registradas durante el periodo de crecimiento exponencial e inicios de la fase lineal en los ambientes de Palmira y Villavicencio.

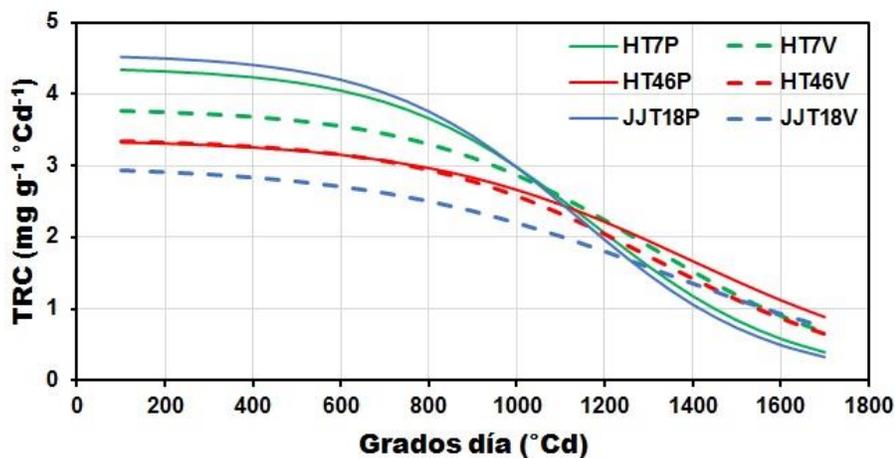
Figura 2-15. Efecto de las variaciones ambientales sobre el índice de área foliar (IAF) en los genotipos de sorgo dulce HT7, HT46 y JYT18 en las localidades de Palmira (P) y Villavicencio (V).



Se observaron diferencias en las TRC entre los genotipos y entre los ambientes. En el periodo de crecimiento exponencial las hojas y las raíces fueron los órganos que presentan la mayor demanda por asimilados. En Palmira, la mayor inversión en asimilados para el crecimiento y expansión del área foliar serían las responsables de las mayores TRC presentadas por los genotipos HT7 ($4,3 \text{ mg g}^{-1} \text{ °Cd}^{-1}$) y JJT18 ($4,5 \text{ mg g}^{-1} \text{ °Cd}^{-1}$), mientras que en HT46 ($3,5 \text{ mg g}^{-1} \text{ °Cd}^{-1}$) las raíces y hojas fueron vertederos activos de los fotoasimilados producidos por las hojas, lo que ocasionó una menor eficiencia en la producción de biomasa aérea (Figura 2-16). En Villavicencio, las condiciones ambientales desfavorables para el crecimiento durante el periodo exponencial de los genotipos HT7 y JJT18 ocasionaron la reducción en el tamaño de los vertederos lo que resultó en menores tasas de crecimiento relativo en los genotipos HT7 ($3,8 \text{ mg g}^{-1} \text{ °Cd}^{-1}$) y JJT18 ($2,8 \text{ mg g}^{-1} \text{ °Cd}^{-1}$). La TRC en HT46 no fue afectada por las condiciones ambientales en Palmira y Villavicencio.

- **Tasa de asimilación neta (TAN).** La tasa de asimilación neta fue en general más alta en los estados iniciales de crecimiento exponencial con fuertes reducciones a medida que avanzaba la fase de crecimiento exponencial (Figura 2-17). En Palmira los genotipos HT7, HT46 y JJT18 registraron tasas altas durante la fase de crecimiento exponencial al compararla con los valores de la tasa de asimilación neta reportados por los genotipos en Villavicencio.

Figura 2-16. Efecto de las variaciones ambientales sobre la Tasa de Crecimiento Relativo (TCR) en los genotipos de sorgo dulce HT7, HT46 y JJT18 en las localidades de Palmira (P) y Villavicencio (V).



- Tasa de crecimiento del cultivo (TCC).** Se encontraron diferencias en la TCC entre los genotipos y entre los ambientes (Figura 2-18). La tasa de crecimiento del cultivo se incrementó progresivamente en los genotipos HT7, HT46 y JJT18, en Palmira y Villavicencio, hasta alcanzar un valor máximo que coincidió con el periodo de máxima expansión foliar (IAF). En Palmira los genotipos de sorgo dulce HT7, HT46 y JJT18 presentaron diferencias en el tiempo térmico requerido para lograr valores altos de TCC.

La TCC más alta fue reportada en Palmira por el genotipo HT46 ($4,9 \text{ g m}^{-2} \text{ °Cd}^{-1}$) con un acumulado en grados día de 1400 °Cd , mientras que HT7 requirió un tiempo térmico de 1200 °Cd para alcanzar una TCC de $4,3 \text{ g m}^{-2} \text{ °Cd}^{-1}$ y JJT18 con 1100 °Cd logro una TCC de $4,7 \text{ g m}^{-2} \text{ °Cd}^{-1}$ (Figura 2-18). Bajo las condiciones ambientales de Villavicencio los genotipos presentaron valores de TCC menores durante el periodo de crecimiento lineal lo que generó tasa de crecimiento más bajas en HT7 ($3,2 \text{ g m}^{-2} \text{ °Cd}^{-1}$), HT46 ($2,6 \text{ g m}^{-2} \text{ °Cd}^{-1}$) y JJT18 ($2,06 \text{ g m}^{-2} \text{ °Cd}^{-1}$), en un tiempo térmico de 1300 °Cd .

Figura 2-17. Efecto de las variaciones ambientales sobre la Tasa de Asimilación Neta (TAN) en los genotipos de sorgo dulce HT7, HT46 y JJT18 en las localidades de Palmira (P) y Villavicencio (V).

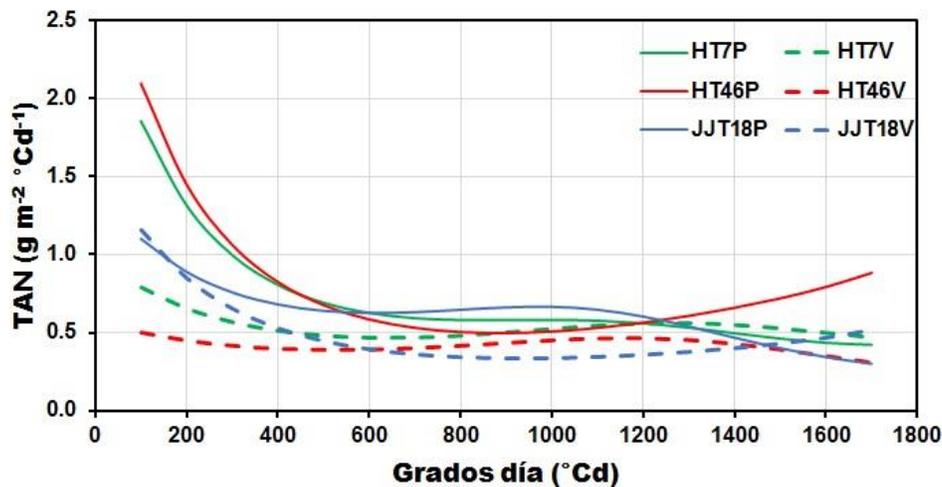
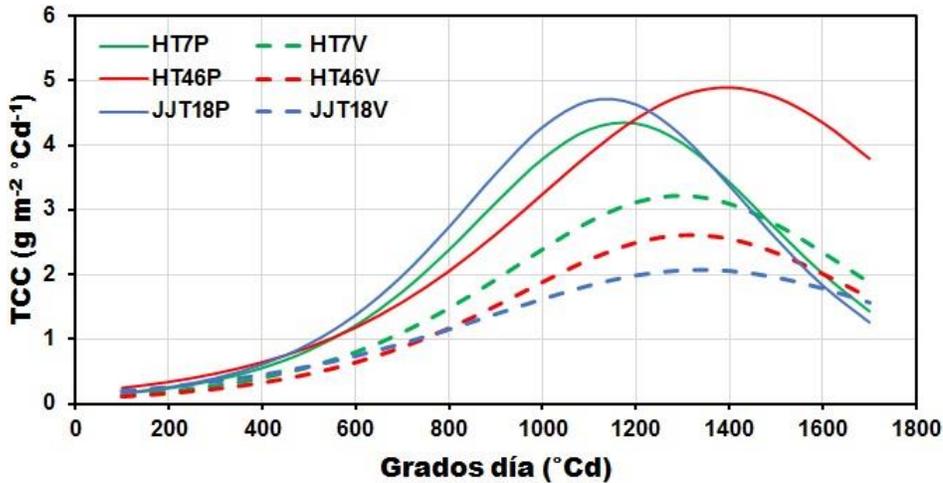


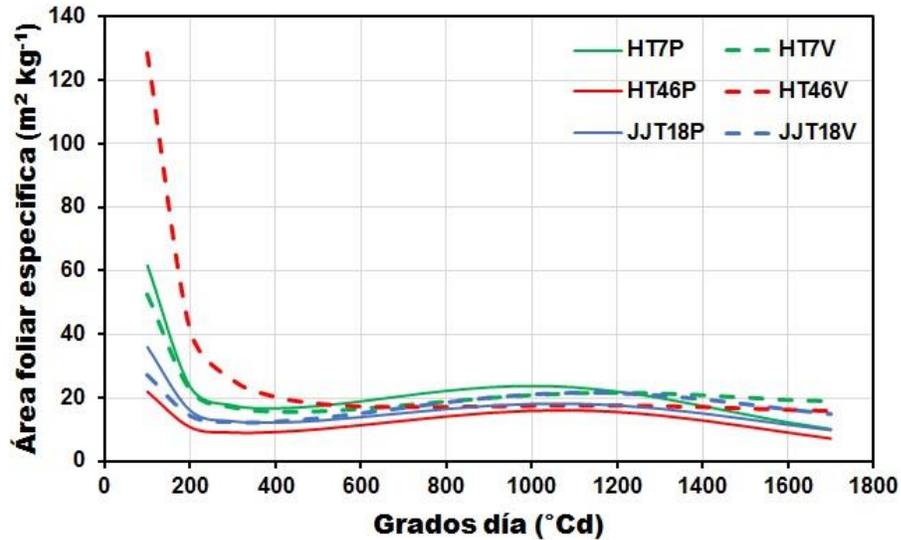
Figura 2-18. Efecto de las variaciones ambientales sobre la Tasa de Crecimiento del Cultivo (TCC) en los genotipos de sorgo dulce HT7, HT46 y JJT18 en las localidades de Palmira (P) y Villavicencio (V).



Durante el período de crecimiento lineal, las condiciones de suelos fértiles, temperaturas óptimas y adecuada disponibilidad de agua en Palmira favorecieron la expansión del área foliar, una mayor intercepción de la radiación solar y el crecimiento activo de los órganos vertedero en HT7, HT46 y JJT18 lo que generó una alta demanda por asimilados de los vertederos, tallo y hojas en crecimiento, los cuales fueron producidos y suministrados por las hojas fotosintéticamente activas (fuente).

- **Área foliar específica (AFE).** El área foliar específica presentó una disminución progresiva a través del tiempo térmico. El valor más alto de AFE fue obtenido por el genotipo HT46 ($128.6 \text{ m}^2 \text{ kg}^{-1}$) en Villavicencio (Figura 2-19). HT46 presentó igualmente el menor valor de AFE ($21.9 \text{ m}^2 \text{ kg}^{-1}$) en Palmira. En los genotipos HT7 y JJT18 el ambiente no ocasionó cambios significativos en el AFE.

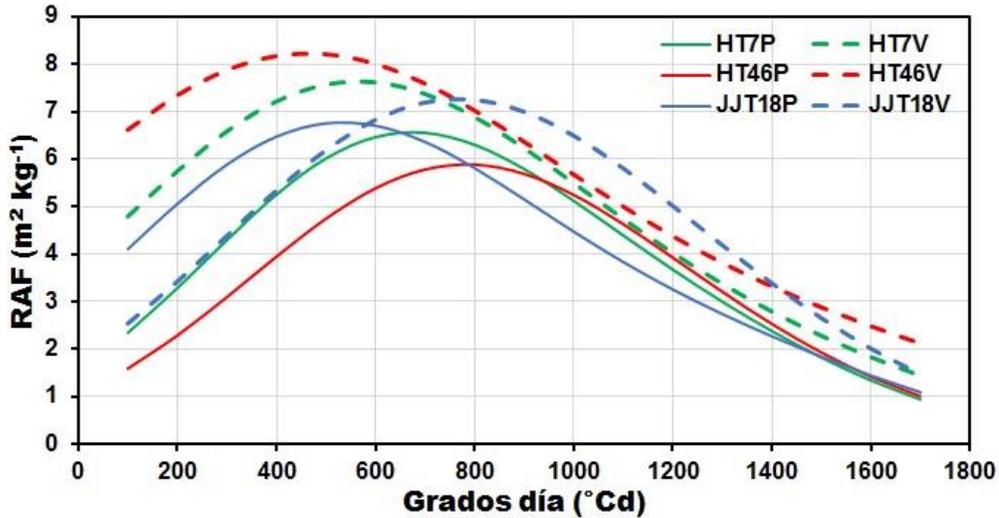
Figura 2-19. Efecto de las variaciones ambientales sobre el Área Foliar Específica (AFE) en los genotipos de sorgo dulce HT7, HT46 y JJT18 en las localidades de Palmira (P) y Villavicencio (V).



- **Relación área foliar (RAF).** La relación área foliar se incrementó progresivamente en los genotipos de sorgo dulce en las dos localidades alcanzando un valor máximo hacia el final de la fase de crecimiento exponencial (Figura 2-20). Durante la fase de crecimiento exponencial, la planta de sorgo dulce utiliza una gran parte de los asimilados en el crecimiento y expansión de la superficie foliar y en el crecimiento radical.

La relación área foliar fue superior en los genotipos que crecieron en el ambiente de Villavicencio en donde se reportaron valores de RAF de $7,6 \text{ m}^2 \text{ kg}^{-1}$ en HT7 con 600°Cd , $8,2 \text{ m}^2 \text{ kg}^{-1}$ en HT46 con 500°Cd y $7,3 \text{ m}^2 \text{ kg}^{-1}$ en JJT18 con 800°Cd (Figura 2-20). Los resultados indicaron que durante la fase de crecimiento exponencial los genotipos HT7, HT46 y JJT18 redujeron el tamaño de los vertederos más que la expansión foliar como consecuencia del estrés ocasionado por las condiciones de mayor precipitación, menor radiación solar y suelos de baja fertilidad prevalentes en Villavicencio.

Figura 2-20. Efecto de las variaciones ambientales sobre la Relación Área Foliar (RAF) en los genotipos de sorgo dulce HT7, HT46 y JJT18 en las localidades de Palmira (P) y Villavicencio (V).

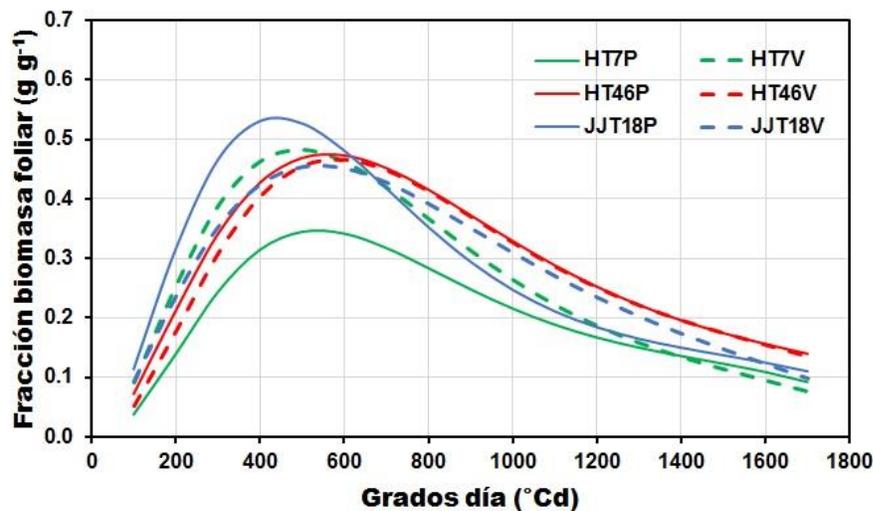


Durante la fase de crecimiento lineal la disminución observada en la RAF fue ocasionada por la demanda de asimilados para el crecimiento activo del tallo en los genotipos de sorgo dulce.

- **Fracción biomasa foliar (FBF).** La FBF en los genotipos HT7, HT46 y JJT18 se incrementó durante el periodo de crecimiento exponencial hasta alcanzar su valor más alto al inicio de periodo de crecimiento lineal (Figura 2-21). Las condiciones ambientales no afectaron significativamente el comportamiento de la distribución de asimilados a las hojas en los genotipos HT46 y JJT18, mientras que HT7 asignó más asimilados al crecimiento radical en Palmira.
- **Fracción biomasa tallo (FBT).** Incrementos significativos en la fracción de biomasa asignada a los tallos de los genotipos HT7, HT46 y JJT18 se registraron durante la fase de crecimiento exponencial y lineal en los ambientes de Palmira y Villavicencio (Figura 2-22). En Palmira HT7 y JJT18 presentaron los mayores incrementos en la fracción de biomasa del tallo durante la fase de crecimiento exponencial para luego mantener constante este índice, mientras que en Villavicencio los genotipos mantuvieron

incrementos de FBT hasta el final del periodo de crecimiento lineal. El Genotipo HT46 presentó en Palmira incrementos en la FBT hasta los inicios del periodo de crecimiento lineal.

Figura 2-21. Efecto de las variaciones ambientales sobre la Fracción Biomasa Foliar (FBF) en los genotipos de sorgo dulce HT7, HT46 y JJT18 en las localidades de Palmira (P) y Villavicencio (V).



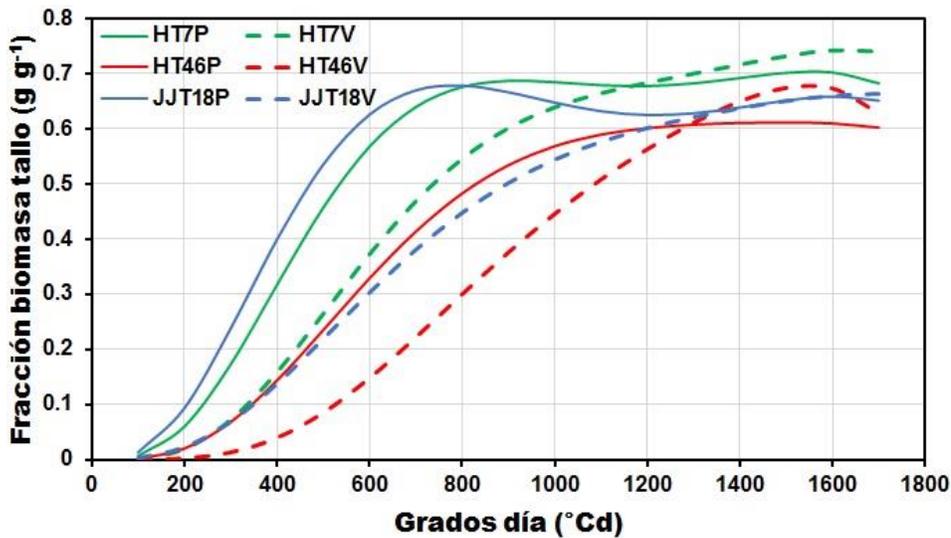
El genotipo HT7 asignó una mayor cantidad de materia seca al tallo con valores de 0,70 g g⁻¹ en Palmira y 0,74 g g⁻¹ en Villavicencio, lo que explicaría en parte los mayores pesos secos de tallo registrados para este genotipo en las dos localidades.

Aunque las condiciones ambientales presentes en Villavicencio ocasionaron reducciones en los pesos secos de hojas y tallos en los genotipos de sorgo dulce, el patrón de la asignación final de asimilados no fue alterado.

- **Relación entre acumulación de materia seca con los índices de crecimiento y las condiciones climáticas.** El análisis de correlación de Pearson muestra correlaciones positivas entre la biomasa total de la planta de los genotipos HT7, HT46 y JJT18 con el peso seco de tallos (0,99**), peso seco de hojas (0,87**), FBT (0,71**), TCC (0,71**), IAF (0,76**), ETc (0,28**), radiación fotosintéticamente activa interceptada-RFAi (0,89**). Correlaciones negativas se encontraron entre el peso seco total con las

variables FBF (-0,63**), TAN (-0,28**), TRC (-0,87**), AFE (-0,24*), RAF (-0,76), PRETO (-0,28**)y HR (-0,41**).

Figura 2-22. Efecto de las variaciones ambientales sobre sobre la Fracción Biomasa Tallo (FBT) en los genotipos de sorgo dulce HT7, HT46 y JJT18 en las localidades de Palmira (P) y Villavicencio (V).



Los resultados indican que el índice de área foliar (IAF), la tasa de crecimiento del cultivo (TCC) y la fracción de masa seca del tallo (FBT) fueron los índices con mayor contribución en la acumulación de materia seca total obtenida por los genotipos de sorgo HT7, HT46 y JJT18 en los ambientes de Palmira y Villavicencio. Se encontró además, que las condiciones ambientales de Palmira con suelos fértiles, mayor disponibilidad de agua para permitirle a los genotipos HT7, HT46 y JJT18 el intercambio de CO₂ por vapor de agua, expresado en altas tasas de evapotranspiración del cultivo (ET_c) y menor humedad relativa (HR, %), la formación y expansión de un área foliar fotosintéticamente activa (IAF) con altos niveles de radiación fotosintéticamente activa interceptada (RAFi) y menores cantidades de precipitación (PRETO) favorecieron la formación de tallos con alta actividad por asimilados y rendimientos altos de biomasa en el cultivo.

La tasa de crecimiento relativo (TRC) presentó correlaciones positivas con TAN (0,43**), AFE (0,21*), RAF (0,70**) y FBF (0,60**), los cuales presentaron sus máximos valores

durante el periodo de crecimiento exponencial de los genotipos de sorgo dulce. Los resultados corroboran los planteamientos de Evans (1972) quien indicó que la tasa de crecimiento relativo de las plantas estaba estrechamente relacionado con la tasa de asimilación neta, el área foliar específica y la fracción de masa foliar. Sin embargo estos parámetros de crecimiento al no contribuir con el peso seco total obtenido por los genotipos, no serían buenos indicadores, cuando se quiere comparar genotipos de sorgo dulce por su potencial para producir alta biomasa total y tallos.

2.3.5 Efecto de las condiciones ambientales sobre la tasa fotosintética y uso eficiente de la radiación.

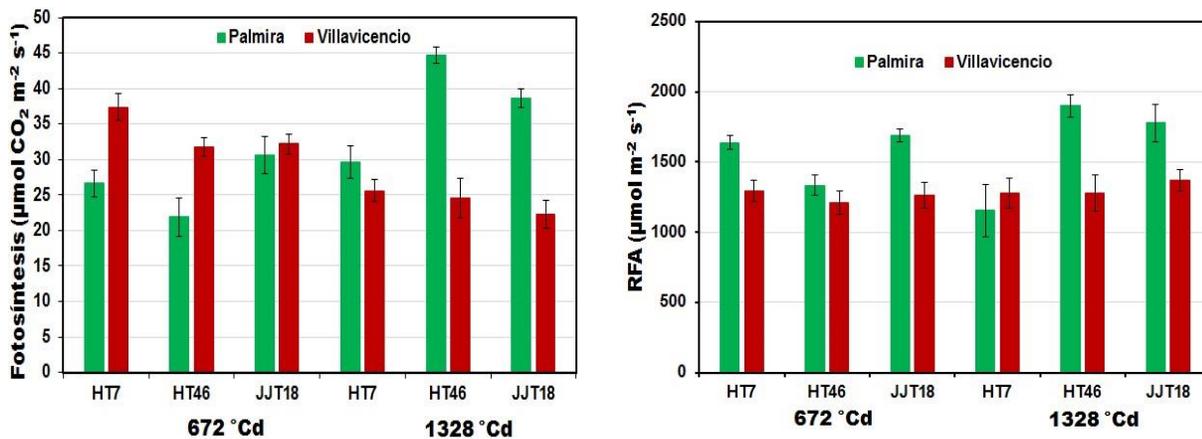
▪ **Tasa fotosintética y radiación fotosintéticamente activa.** Se observaron diferencias estadísticas ($P < 0,01$) en la tasa fotosintética en las interacciones ambiente por periodo, ambiente por genotipo, periodo por genotipo y en la interacción ambiente por periodo por genotipo (Anexo 2-2). Se presentaron diferencias estadísticas ($P < 0,01$) en la radiación fotosintéticamente activa (RAF) entre los genotipos y en las interacciones ambiente por genotipo, periodo por genotipo y ambiente por periodo por genotipo (Anexo 2-2).

Los genotipos de sorgo HT7, HT46 y JJT18 presentaron diferencias en las tasas fotosintéticas entre las fases de crecimiento y entre los ambientes. En Villavicencio los genotipos presentaron las tasas fotosintéticas más altas durante el periodo de crecimiento exponencial, mientras que en Palmira, las tasas fotosintéticas de los genotipos fueron superiores hacia finales del crecimiento lineal. El genotipo HT7 presentó la tasa fotosintética más alta ($37,4 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) en Villavicencio hacia finales del periodo exponencial, en contraste, HT46 ($44,7 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) y JJT18 ($38,7 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) registraron tasas de fotosíntesis mayores a finales de la fase de crecimiento lineal bajo las condiciones ambientales de Palmira (Figura 2-23).

Las altas tasas de fotosíntesis presentadas por los genotipos de sorgo a finales del periodo de crecimiento lineal en Palmira, serían el resultado de una alta demanda por asimilados para el crecimiento de tallos, hojas, vainas y panículas que sucedieron

durante el periodo de crecimiento lineal. En Villavicencio, la reducción en tamaño de los diferentes vertederos de la planta de sorgo ocasionadas por las condiciones de estrés, generaron una menor demanda por asimilados y una regulación en la actividad fotosintética en los genotipos. La mayor relación de área foliar (RAF) registrada por los genotipos durante el crecimiento exponencial en Villavicencio apoyarían el comportamiento de las tasas de fotosíntesis en esta localidad.

Figura 2-23. Tasa fotosintética y radiación fotosintéticamente activa (RFA) en los genotipos de sorgo dulce HT7, HT46 y JJT18 en dos condiciones ambientales.

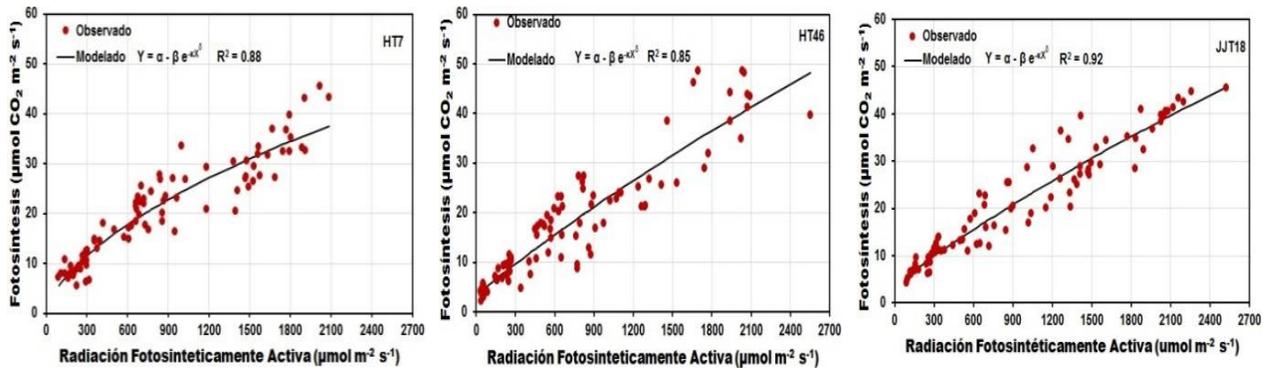


Las mayores tasas fotosintéticas presentadas en Palmira por los genotipos HT7, HT46 y JJT18 en la fase de lineal de crecimiento explicarían las mayores tasas de acumulación de materia seca que estos genotipos alcanzaron en las condiciones ambientales de Palmira. Durante la época de análisis de la tasa fotosintética los genotipos de sorgo estuvieron expuestos a mayores valores de radiación fotosintéticamente activa (rango entre 1115 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ a 1899 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$), que en Villavicencio (1207 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ a 1367 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$).

La tasa fotosintética en los genotipos de sorgo dulce HT7, HT46 y JJT18 respondió significativamente a los incrementos en la radiación fotosintéticamente activa (Figura 2-24). Sin embargo, el patrón de respuesta fue diferente, ya que mientras los genotipos HT46 y JJT18 mostraron una respuesta lineal al cuanta de luz, HT7 presentó una respuesta con saturación de luz superior a 2100 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$.

- **Uso eficiente de la radiación (RUE).** Se encontraron diferencias estadísticas ($P < 0,01$) en el uso eficiente de la radiación entre los genotipos, ambientes y en la interacción genotipo por ambiente (Anexo 2-3).

Figura 2-24. Respuesta de la tasa fotosintética neta a la Radiación Fotosintéticamente Activa en los genotipos de sorgo dulce HT7, HT46 y JJT18 en dos condiciones ambientales.



Valores altos de uso eficiente de la radiación en los genotipos de sorgo dulce HT7, HT46 y JJT18 fueron observados en las condiciones ambientales de Palmira (Tabla 2-11). El uso eficiente de radiación obtenido por el genotipo HT7 durante el ciclo de crecimiento en Palmira fue de 2,94 g m⁻² de materia seca por MJ⁻¹ de radiación fotosintéticamente activa interceptada (RAFi), mientras que en Villavicencio se redujo a 1,84 g m⁻² MJ⁻¹. El RUE logrado por los genotipos de sorgo dulce HT46 y JJT18 en Palmira fue de 2,56 g m⁻² MJ⁻¹ y 2,15 g m⁻² MJ⁻¹, respectivamente.

Tabla 2-11. Efecto de las variaciones ambientales sobre el Uso eficiente de radiación (RUE) en tres genotipos de sorgo dulce en dos ambientes, 2010.

Genotipo	Uso Eficiente Radiación (g MJ ⁻¹)		
	Palmira	Villavicencio	Media
HT7	2.94	1.84	2.39 A
HT46	2.56	1.94	2.26 A
JJT18	2.15	1.98	2.07 B
Media	2.6 A	1.92 B	
Mínimo	1.99	1.72	
Máximo	3.22	2.20	
STD	0.37	0.14	

En Villavicencio, los genotipos presentaron una reducción en la expansión foliar y en el crecimiento y actividad de los órganos vertederos, producto de las condiciones de estrés por nutrientes, excesos de precipitación y menor radiación solar. Estas condiciones ocasionaron una reducción en la tasa fotosintética de los genotipos durante el periodo de crecimiento lineal que conllevó a menores registros de RUE. Lo anterior fue evidente en los valores bajos de RUE registrados en los genotipos de sorgo dulce HT7 (1,84 g MJ⁻¹), HT46 (1,94 g MJ⁻¹) y JJT18 (1,98 g MJ⁻¹), los cuales se encontraron por debajo de lo reportado en otros estudios (Mastrorilli *et al.*, 1995; Narayanann *et al.*, 2013).

2.3.6 Efecto de las condiciones ambientales sobre la producción de biomasa y acumulación azúcares.

Se encontraron diferencias estadísticas ($P < 0,01$) en la producción de biomasa total y biomasa de tallos y hojas entre ambientes y en la interacción genotipo por ambiente (Anexo 2-4). Solo se encontraron diferencias significativas ($P < 0,01$) en la concentración de azúcares (Brix) y contenido de azúcares entre ambientes.

En Palmira se alcanzaron rendimientos altos de biomasa total, de tallos, de hojas y de panículas en los genotipos de sorgo dulce HT7, HT46 y JJT18 (Figura 2-25). HT7, HT46 y JJT118 presentaron en esta localidad producciones de biomasa total de 14,5 t ha⁻¹, 19,1 t ha⁻¹ y 18,5 t ha⁻¹, respectivamente. Las condiciones ambientales menos favorables para el crecimiento de los genotipos de sorgo en Villavicencio, ocasionaron reducciones en la biomasa de los genotipos HT7 (33%), HT46 (49%) y JJT18 (59%) comparado con los valores registrados en Palmira.

La reducción en el peso seco de tallos observada en los genotipos en Villavicencio fue menor en HT7 (12%) comparada con lo registrado en HT46 (40%) y JJT18 (44%). El peso seco de las hojas fue el componente de producción de biomasa más afectado en los genotipos en Villavicencio con reducciones del 70% en HT7, 67% en HT46 y 77% en JJT18. La acumulación de materia seca en las panículas fue menos afectada por las condiciones ambientales (Figura 2-25).

Las concentración de azúcares (Brix) en los genotipos de sorgo HT7, HT46 y JJT18 fue mayor en las condiciones ambientales de Villavicencio, sin diferencias significativas entre los genotipos (Figura 2-26). Por otra parte, en Palmira los contenidos de azúcares en el tallo fueron más altos en los genotipos HT7 (40,5 g planta⁻¹), HT46 (34,7 g planta⁻¹) y JJT18 (44,4 g planta⁻¹) al compararlos con los valores reportado en Villavicencio (Figura 2-26).

Figura 2-25. Producción de biomasa total, tallos, hojas y panículas en los genotipos de sorgo dulce HT7, HT46 y JJT18 en dos condiciones ambientales.

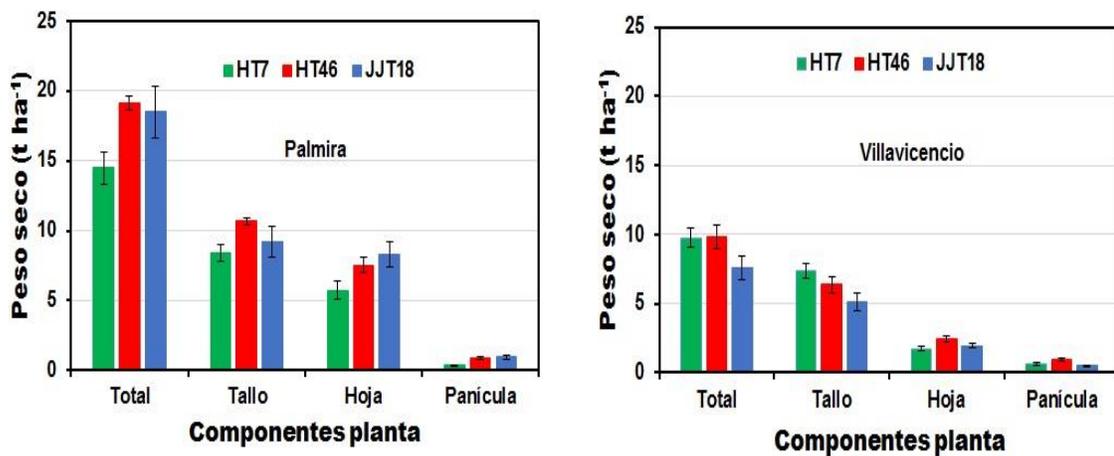
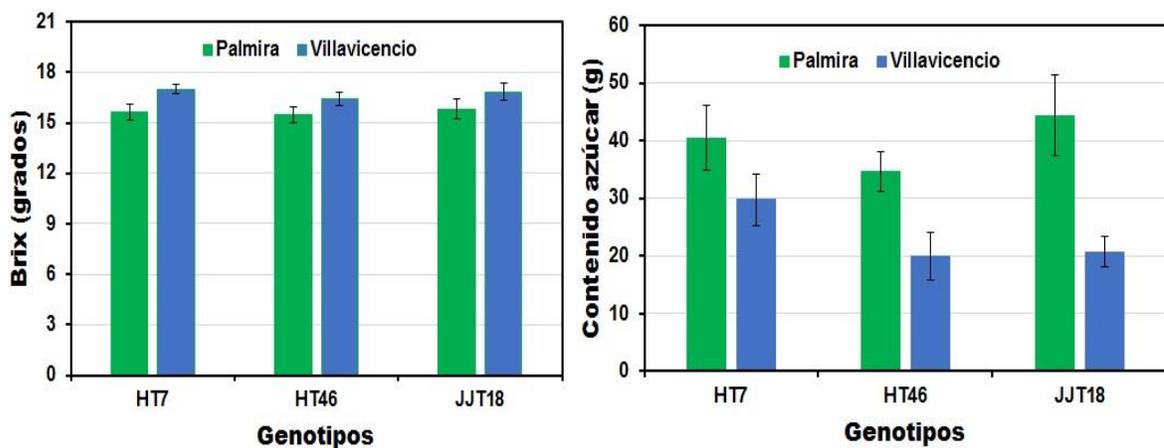


Figura 2-26. Grados Brix y contenido de azúcares (g planta⁻¹) en los genotipos de sorgo dulce HT7, HT46 y JJT18 en dos condiciones ambientales.



Las temperaturas mínimas más bajas registradas en Villavicencio junto con la reducción en el tamaño del vertedero principal (tallos) de los azúcares, probablemente, contribuyeron a la mayor concentración de azúcares registrada en los genotipos de sorgo dulce. Sin embargo, las condiciones ambientales que favorecieron un mayor crecimiento de los tallos (mayor acumulación de materia seca) en Palmira permitieron a los genotipos HT7, HT46 y JYT18 acumular más azúcares en el tallo.

2.4 Discusión

Oferta ambiental. Las localidades fueron seleccionadas por ser contrastantes en cuanto al grado de fertilidad del suelo, su disponibilidad hídrica, la radiación solar acumulada y las temperaturas mínimas. En la localidad de Palmira el experimento se estableció en un suelo arcilloso de alta fertilidad, mientras que en Villavicencio el suelo fue de textura franca con drenaje imperfecto y grado de fertilidad bajo. Durante el ciclo de crecimiento de los genotipos de sorgo HT7, HT46 y JYT18 se observó en Villavicencio una mayor oferta hídrica con una precipitación total de 1414 mm y una evapotranspiración del cultivo de 336 mm, comparada con Palmira en donde se presentó una precipitación total de 273 mm y una evapotranspiración del cultivo de 370 mm. La radiación total acumulada fue de 1626 MJ m⁻² en Palmira y 1492 MJ m⁻² en Villavicencio. En Villavicencio se presentaron los menores valores de temperatura mínima, 21.8°C.

Acumulación y distribución de la materia seca. En las dos localidades la curva que describió el crecimiento de los genotipos de sorgo HT7, HT46 y JYT18, en términos del incremento en la materia seca total de la planta a través del tiempo térmico, siguió un modelo sigmoideal, el cual presentó una etapa inicial de crecimiento exponencial o lento, seguido de una etapa de crecimiento lineal (o acelerado) y por último, una etapa de senescencia o asíntota, donde se alcanzaron los valores máximos de acumulación de materia seca. Para el análisis funcional del crecimiento, se seleccionó la función Beta, la cual permitió una representación más aproximada del crecimiento sigmoideal. De acuerdo con Yin *et al* (2003) Beta es una función sigmoidea asimétrica flexible, con parámetros biológicamente

interpretables, que puede representar con un margen menor de error la longitud del periodo de crecimiento y predecir acertadamente el valor máximo de crecimiento.

En la etapa inicial de crecimiento se observaron diferencias en el tiempo térmico acumulado entre genotipos y entre ambientes. En Palmira los genotipos HT7 y JJT18 presentaron un crecimiento inicial más rápido alcanzando un tiempo térmico de 610°Cd y 598°Cd, respectivamente, mientras que HT46 (758°Cd) presentó un crecimiento más lento. El análisis de la tasa relativa de crecimiento-TRC en los genotipos confirmó estos resultados. En Palmira se registraron tasas relativas de crecimiento altas para HT7 (4,3 mg g⁻¹ °Cd⁻¹) y JJT18 (4,5 mg g⁻¹ °Cd⁻¹) comparada con HT46 (3,5 mg g⁻¹ °Cd⁻¹). Por otra parte, en Villavicencio los genotipos HT7 (3,8 mg g⁻¹ °Cd⁻¹) y JJT18 (2,8 mg g⁻¹ °Cd⁻¹) presentaron valores más bajos de la TRC. Los resultados indicaron que en la etapa inicial de crecimiento de los genotipos de sorgo, las condiciones ambientales y la constitución genética presentaban un peso grande en la dinámica de la acumulación total de materia seca. Durante la etapa inicial de crecimiento exponencial los fotoasimilados fueron asignados principalmente al crecimiento de nuevo tejido foliar, vainas y crecimiento radical con menores aportes hacia el tallo.

Paine *et al.* (2012) señalaron que durante la etapa de crecimiento exponencial la TRC se relacionaba estrechamente con el área foliar y la actividad fotosintética y que esta se disminuía a medida que la planta incrementaba su biomasa. La disminución de la TRC puede ser el resultado de la acumulación de biomasa no fotosintética en la forma de tallos y raíces, autosombreamiento de las hojas y disminución en la disponibilidad de nutrientes.

En el periodo de crecimiento lineal se observaron cambios importantes en el punto de inflexión para el inicio de la etapa de máxima acumulación. El punto en el cual cambia la velocidad de crecimiento es alcanzado primero por HT7 (1219°Cd) y JJT18 (1196°Cd) en Palmira. El genotipo HT46 (1515°Cd) fue el más tardío en alcanzar la etapa de máxima acumulación en Palmira. Al finalizar el periodo de crecimiento lineal los genotipos de sorgo HT7 (7,7), HT46 (7,9) y JJT18 (7,7) alcanzaron en Palmira su máxima expansión foliar (índice de área foliar-IAF) y tasa de crecimiento del cultivo-TCC. En el periodo de crecimiento lineal los fotoasimilados producidos por las hojas fueron transportados como sacarosa a los órganos en crecimiento de la planta, tallos, hojas, vainas y raíces. En esta

etapa el tallo de los genotipos HT7, HT46 y JJT18 se convirtió en el vertedero de mayor demanda por asimilados con menores demandas por las hojas, vainas y raíces.

Djanaguiraman *et al.* (2005) indicaron que en el sorgo dulce el tallo era el vertedero principal de los fotoasimilados producidos en las hojas durante la fase reproductiva, mientras que las hojas y la panícula eran vertederos secundarios.

Las condiciones de alta precipitación y suelos de baja fertilidad y drenaje imperfecto en Villavicencio ocasionaron en los genotipos de sorgo una reducción en la expansión foliar (valores menores de IAF) y la formación de vertederos (tallos, hojas y raíces) de menor tamaño. Al reducirse la demanda de los vertederos por asimilados la planta ajusta todo el proceso de fijación y asimilación de carbono para suplir una menor demanda. La reducción en la producción de asimilados ocasionó una disminución en los valores de la TCC logrados por los genotipos HT7 ($3,2 \text{ g m}^{-2} \text{ }^{\circ}\text{Cd}^{-1}$), HT46 ($2,6 \text{ g m}^{-2} \text{ }^{\circ}\text{Cd}^{-1}$) y JJT18 ($2,06 \text{ g m}^{-2} \text{ }^{\circ}\text{Cd}^{-1}$) en Villavicencio.

La actividad de los vertederos en la planta dependen de la disponibilidad de recurso de suelo (agua y nutrientes), de la temperatura y del estado de desarrollo de la planta. Diferentes estudios han demostrado que la actividad del vertedero responde primero (a excepción de la luz) a los efectos ambientales que la fotosíntesis (Luque *et al.*, 2006; Fourcaud *et al.*, 2008; Körner, 2013).

Con cobertura completa, el cultivo entra en un periodo en el cual la intercepción de la radiación y la fotosíntesis son máximas. En este estado, la TCC varia, fundamentalmente con los cambios en la radiación solar y el estrés abiótico (Hunt, 1982; Poorter, 1989). Poorter (1989) también, indico que la acumulación de materia seca durante este periodo estaba estrechamente relacionada con la duración del periodo de crecimiento. La máxima cobertura del dosel en cultivares forrajeros de sorgo en el trópico se alcanzó con un IAF 7,0 o superior, con manejo óptimo de la densidad de población y manejo eficiente de insumos (Wani *et al.*, 2012).

Promkhambut *et al.* (2011) reportaron reducciones en el crecimiento, área foliar y acumulación de materia seca en variedades de sorgo dulce sometidas a condiciones de anegamiento temporal durante el inicio del estado vegetativo y el estado reproductivo.

Después de la floración, y aunque cesa la elongación del tallo (datos no presentados), el tallo continuó siendo un vertedero activo por fotoasimilados junto con la panícula lo que obligó al dosel a mantener altas tasas de fotosíntesis para suplir la demanda. En Palmira los genotipos HT7 (244,5 g planta⁻¹), HT46 (403,6 g planta⁻¹) y JJT18 (259,9 g planta⁻¹) alcanzaron los valores máximos de acumulación de materia seca con un tiempo térmico acumulado de 1662°Cd, 2233°Cd y 1628°Cd, respectivamente.

Nan *et al.* (1994) encontraron que durante la fase de llenado de grano en las variedades de sorgo dulce Wray y Dale, el tallo y la panícula eran vertederos activos que competían por asimilados alcanzando la máxima acumulación de biomasa en madurez fisiológica.

Los resultados del análisis de distribución de los asimilados en los genotipos HT7, HT46 y JJT18 indicaron que la demanda por fotoasimilados en los diferentes órganos de la planta fue: Tallo > Panícula > Hojas > Vainas. Resultados similares fueron reportados por Nan *et al.* (1994) para la variedad de sorgo Rio.

Las mayores tasas fotosintéticas presentadas en Palmira por los genotipos HT7 (37,4 $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$), HT46 (44,7 $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) y JJT18 (38,7 $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) hacia finales de la fase lineal de crecimiento (1328°Cd) ayudarían a explicar las mayores tasas de acumulación de materia seca que estos genotipos alcanzaron en las condiciones ambientales de Palmira. Los resultados, estarían sugiriendo una regulación de la actividad fotosintética por parte de la demanda de los vertederos.

Körner (2013) ha indicado que los procesos del crecimiento responden al estrés hídrico y a bajas temperaturas mucho antes que se vea afectada la fotosíntesis. Por lo que afirma que, en la mayoría de los casos el crecimiento ejerce un papel regulatorio a la fotosíntesis.

La acumulación de materia seca total en los genotipos GT7, HT46 y JJT18 presentó correlaciones positivas y altamente significativas con el peso seco de tallos (0,99**), peso

seco de las hojas (0,87**), fracción de biomasa de tallos-FBT (0,71**), la tasa de crecimiento del cultivo-TCC (0,71**), el IAF (0,76**), la ETc (0.28**) y la radiación fotosintéticamente activa interceptada-RFAi (0.89**), y correlaciones negativas con la precipitación (-0.28**) y la humedad relativa-HR (-0.41**).

Los resultados indicaron que, en los genotipos de sorgo HT7, HT47 y JJT18 la dinámica de acumulación de materia seca y la asignación de los asimilados a los diferentes órganos vertederos era regulada por el estado de crecimiento y las condiciones ambientales prevalentes durante el ciclo de crecimiento del cultivo.

Rendimientos de biomasa y acumulación de azúcares. El comportamiento de la dinámica de la acumulación y distribución de la materia seca en los genotipos de sorgo se reflejó en los rendimientos finales de biomasa entre las localidades. En Palmira, localidad con mejor oferta ambiental, los genotipos de sorgo HT7 (14,5 t ha⁻¹), HT46 (19,1 t ha⁻¹) y JJT18 (18,5 t ha⁻¹) alcanzaron altos rendimientos de biomasa. Igualmente la producción de biomasa se asoció con la duración del crecimiento del cultivo. Los genotipos más tardíos HT46 y HT7 fueron los de mayor rendimiento de biomasa.

La acumulación de biomasa foliar fue el componente de la biomasa total más sensible a condiciones ambientales desfavorables para el crecimiento. En Villavicencio las condiciones de baja fertilidad y estrés hídrico ocasionaron reducciones de la biomasa foliar del 70%, 67% y 77% en los genotipos HT7, HT46 y JJT18, respectivamente.

La formación de vertederos activos (tallos) de mayor tamaño de los genotipos en Palmira junto con mayores tasas fotosintéticas durante el periodo de estabilización permitió la producción de azúcares para el crecimiento de la panícula y acumulación en el tallo. El contenido de azúcares en el tallo fue de 40,5 g planta⁻¹ en HT7, 34,7 g planta⁻¹ en HT46 y 44,4 g planta⁻¹ en JJT18.

2.5 Conclusiones

- Las condiciones de fertilidad del suelo, estrés hídrico y radiación solar fueron las variables ambientales que modularon la dinámica del crecimiento y acumulación de biomasa en los genotipos de sorgo dulce HT7, HT46 y JJT18.
- La dinámica de crecimiento y acumulación de materia seca de los genotipos HT7, HT46 y JJT18 fue más sensible a las condiciones ambientales de alta precipitación y suelos de baja fertilidad de Villavicencio, debido a que el sorgo dulce por ser una planta C_4 se adaptada mejor a condiciones de menor oferta hídrica.
- La dinámica de la interacción fuente vertedero y vertedero-vertedero en los genotipos de sorgo fue regulada por el estado de crecimiento del cultivo. Durante la fase de crecimiento exponencial las hojas fueron la fuente y el vertedero principal de los asimilados en los genotipos de sorgo, al iniciarse el periodo de crecimiento lineal el tallo se convirtió en demandante principal de fotoasimilados y en el periodo de senescencia el tallo y la panícula fueron los vertederos con mayor actividad en la planta. En los genotipos HT7, HT46 y JJT18 no fue visible una competencia entre la demanda de asimilados del tallo (para el crecimiento y acumulación de azúcares) con el crecimiento de la panícula.
- En Palmira los genotipos HT7 ($244,5 \text{ g planta}^{-1}$), HT46 ($403,6 \text{ g planta}^{-1}$) y JJT18 ($259,9 \text{ g planta}^{-1}$) alcanzaron los valores máximos de acumulación de materia seca con un tiempo térmico acumulado de 1662°Cd , 2233°Cd y 1628°Cd , respectivamente.
- En Palmira la gran actividad de los vertederos del tallo y la panícula fueron las responsables de la alta tasa fotosintética que se registró en la hoja de los genotipos HT7, HT46 y JJT18 a finales del periodo de crecimiento lineal.
- En los genotipos de sorgo dulce la demanda por asimilados en los diferentes órganos vertederos de la planta siguió este orden: Tallo > Panícula > Hojas > Vainas.

- En Palmira las condiciones ambientales favorables para el crecimiento y acumulación de materia seca en la planta fueron las responsables de los altos rendimientos de biomasa en HT7 (14,5 t ha⁻¹), HT46 (19,1 t ha⁻¹) y JJT18 (18,5 t ha⁻¹).

3. Bibliografía

Alagarswamy, G., J.T. Ritchie, and B. Flint. 1986. Effect of high temperature on leaf appearance rates in maize, rice, sorghum, and pearl millet. In: 1986 Agronomy abstracts. ASA, Madison, WI. p. 10.

Alagarswamy, G., Reddy, D.M., Swaminathan, G. 1998. Durations of photoperiod sensitive and insensitive phases of time to panicle initiation in sorghum. *Field Crops Research*, 55, 1–10.

Ali, M.L., Rajewski, J.F., Baenziger, P.S., Gill, K.S., Eskridge, K.M., & Dweikat, L. 2007. Assessment of genetic diversity and relationship among a collection of US sweet sorghum germplasm by SSR markers. *Mol Breeding*, 21(4), 497-509.

Allard, R. W. 1960. Principles of plant breeding. Wiley, New York, Ny, USA. A85 p (SB 123. A5).

Alhajturki, D., M. Aljamali, Kamar, A. 2012. Potential of Some Sweet Sorghum (*Sorghum bicolor* L.) Genotypes Under Two Water Regimes for Sugar and Bio-ethanol Production. *Sugar Tech* 14(4): 376-382.

Almodares, A., & M.R. Hadi. 2009. Production of bioethanol from sweet sorghum. A review. *African Journal of Agricultural Research* 4(9), 772–780.

Almodares, A., & Mostafafi, D.S.M. 2006. Effects of planting date and time of nitrogen application on yield and sugar content of sweet sorghum. *J. Environ. Biol.* 27, 601–605

Almodares, A., R. Taheri, Adeli, S. 2008. Stalk yield and carbohydrate composition of sweet sorghum (*Sorghum bicolor* (L.) Moench) cultivars and lines at different growth stages. *Malays. Apply. Biol.* 37(1): 31-36.

Anglani, C. 1998. Sorghum carbohydrates. A review. *Plant food for human nutrition*. 52: 77–83

Antonopoulou, G., Gavala, H.N., Skiadas, I.V., Angelopoulos, K., Lyberatos, G. 2008. Biofuels generation from sweet sorghum. fermentative hydrogen production and anaerobic digestion of the remaining biomass. *Bioresour Technol.*, 99, 110-119.

Audilakshmi, S., Mall, A.K., Swarnalatha, M., & Seetharama, N. 2010. Inheritance of sugar concentration in stalk (brix), sucrose content, stalk and juice yield in sorghum. *Biomass Bioenerg.* 34, 813–820.

Azam-Ali, S.N., Squire, G.R., 2002. Principles of Tropical Agronomy. CABI Publishing, Wallingford, UK.

Bernal, J.H., Hernández, R.S., Salamanca, Guevara, J., Caicedo, S., Almansa, E., Arguello, J., Martínez, J., Romero, J., Vanegas, M. 2009. Obtención de variedades mejoradas de sorgo dulce con adaptación al trópico bajo para la producción de alcohol

carburante en tres regiones de Colombia. (Informe técnico final, pp. 1-8). Villavicencio. Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria-Corpoica.

Billa, E., Koullas, DP., Monties, B., Koukios, EG. 1997. Structure and composition of sweet sorghum stalk components. *Ind Crops Prod.*, 6, 297-302.

Bonnett, G.D., Hewitt, M.L., & Glassop, D. 2006. Effects of high temperature on the growth and composition of sugarcane internodes. *Aust. J. Agric. Res.* 57, 1087-1095.

Broadhead, D.M.1972. Effect of stalk chopping on leaf removal and juice, quality of Rio sweet sorghum. *Agron. J.* 64: 306–308.

Clavijo, J. 1989. Análisis de crecimiento en malezas. *Revista Comalfi.* 15: 12-16.

Calvino, M., & Messing, J. 2011. Sweet sorghum as a model system for bioenergy crops. *Curr. Opin Biotech.* 23: 1–7.

Coleman, O.H., & Stokes, I.E.1964.The inheritance of weak stalk in sorghum.*Agron. J.* 50,119–120.

Crossa, J. Wescott, B. Gonzales, C. 1988. Analysing yield stability of maize genotypes using a spatial model. *Theor. Appl Genet.* 75: 863-868.

Curt, M.D., Fernandez, J., & Martinez, M. 1998. Productivity and radiation use efficiency of sweet sorghum (*Sorghum bicolor* (L.) Moench) cv. KELLER in Central Spain. *Biomass Bioenergy*, 14, 169-178.

DAMON, E. G. 1962. The cultivated sorghums of Ethiopia. Experiment Station Bulletin No. 6, Imperial Ethiopian College of Agriculture and Mechanical Arts.

De Vries, S.C., De Giller, K.E., Ittersum, M.K., & Ven, G.W.J. 2010. Resource use efficiency and environmental performance of nine major biofuel crops, processed by first-generation conversion techniques. *Biomass and Bioenergy.* 34, 588-601.

De Wet, J.M.J. & Harlan, J.R. 1971. The origin and domestication of *Sorghum bicolor*.*Econ. Bot.*, 25, 128-135.

Deu M, Sagnard F, Chantereau J, Calatayud C, Hérault D. 2008. Niger-wide assessment of in situ sorghum genetic diversity with microsatellite markers. *Theoretical and Applied Genetics* 116. 903–913.

Doggett, H. 1988. Sorghum, second edition. Longman Scientific & Technical, New York, NY.

Donatelli, M., G.L. Hammer, R.L. Vanderlip. 1992. Genotype and water limitation effects on phenology, growth, and transpiration efficiency in grain sorghum. *Crop Sci.* 32:781-786.

Eastin, J.D. 1971. Photosynthesis and translocation in relation to plant development. In Sorghum in the seventies. N.G.P. Rao and L.R. House (eds). Bombay, India. Oxford and IBH.

Elangovan, M., Babu, P. K., Seetharama, N., Patil, J.V. 2013. Genetic Diversity and Heritability Characters Associated in Sweet Sorghum [*Sorghum bicolor* (L.) Moench]. Sugar Tech: 8: 1-11.

European Parliament. 2003. Directive 2003/30/EC of the European Parliament and of the Council of 8 May 2003 on the Promotion of the Use of Biofuels or Other Renewable Fuels for Transport, Official Journal of the European Union. pp. 46.

Evans, J.M., & Cohen, M.J. 2009. Regional water resource implications of bioethanol production in the Southeastern United States. Glob Change Biol. 5: 2261-2273.

FAOSTAT. (2011) (FAOSTAT. Rome) Available at. <http://faostat.fao.org>. [Verified 1 April 2012].

Fedoroff, N.V., Cohen, J.E. 1999. Plants and populations. is there time Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America 96, 5903–5907.

Ferraris, R.1981. Early assessment of sweet sorghum as an agro-industrial crop. I. Varietal evaluation. Aust. J. Exp. Agric. Anim. Husb. 21, 75–82.

Gardner, F.P., R.B. Pearce and R.L. Mitchell. 1985. Physiology of crop plants. Iowa State University Press, USA. 325 p.

Gauch, H.G. 1992. Statistical analysis of regional yield trials. AMMI analysis of factorial designs. Elsevier. New York. 278 pp.

Geng, S., Hills, F.J., Johanson, S.S., & Sah, R.N. 1989. Potential yields and on-farm ethanol production cost of corn, sweet sorghum, fodderbeet and sugarbeet. J. Agron. CropSci., Vol. 162, No. 1, (Jan. 1989), pp. 21-29.

Gnansounou, E., Dauriat, A., & Wyman, C.E. 2005. Refining sweet sorghum to ethanol and sugar. Economic tradesoff in the context of North China. Bioresource Technol. 96, 985–1002.

Gutjahr, S., M. Vaksman, M., Dingkuhn, K., Thera, G., Trouche, S., Braconnier, D. Luquet. 2013. Grain, sugar and biomass accumulation in tropical sorghums. I. Trade-offs and effects of phenological plasticity. Functional Plant Biology. 40 (4): 342-354.

Hammer, G.L., Carberry, P.S., Muchow, R.C. 1993. Modelling genotypic and environmental control of leaf area dynamics in grain sorghum I. Whole plant level. Field Crops Research 33, 293–310.

Hammer, G.L., Vanderlip, R.L., Gibson, G., Wade, L.J., Henzell, R.G., Younger, D.R., Warren, J., Dale, A.B. 1989. Genotype by environment interaction in grain sorghum II. Effects of temperature and photoperiod on ontogeny. Crop Science 29, 376–384.

Hipp Billy, W., Cowely, W.R., Gerard, C.J., & Smith, B.A. 1970. Influence of solar radiation and Date of planting on yield of sweet sorghum. *Crop Science*, 10, 91-92.

Hoffman-Thoma, G., Hinkel, K., Nicolay, P., & Willenbrink, J. 1996. Sucrose accumulation in sweet sorghum stem internodes in relation to growth. *Physiol. Plant.* 97, 277–284.

House, H.R., Gomez, M., Murty, O.S., Sun, Y., Verma, B.N. 2000. Development of some agricultural industries in several African and Asian countries. In: Wayne Smith, C., and A.

Huda, A.K.S. 1987. Simulating yields of sorghum and Pearl millet in the semi-arid tropics. *Field Crop Res.* 15: 309-325.

Huda, A.K.S., Sivakumar, M.V.K., Virmani, S.M., Seetharama, N., Singh, S. and Sekaran, J.G. 1984. Modeling the effect of environment factors on development in S.W. Virmani and M.V.K. Sivakumar (edn.). *Agrometeorology of sorghum and millet in the semi-arid tropics*. ICRISAT, Patancheru, India. pp. 277-287.

Hunt, R. 1978. *Plant growth analysis*. Edward Arnold Publishers, London. 67 p.

Hunt R. 1982. *Plant growth curves: the functional approach to plant growth analysis*. London: Edward Arnold.

Hunter, E. L. & Anderson, I. C. 1997. "Sweet Sorghum." *Horticultural Reviews* 21, 73-104.

IEA. 2011. *Key World Energy Statistics*, International Energy Agency (IEA), Paris. pp. 80.
Jackson, D.R., Arthur, M.F., Davis, M., Kresovich, S., Lawhon, W.T., Lipinsky, E.S., Price,

Kru, G.H. 1997. Environmental Influences on Development Growth and Yield. pp. 101-180. In: Wien, H.C. (ed.). *The physiology of vegetable crops*. CABI Publishing, London.

Jasberg, B.K., Montgomery, R.R. Anderson, R.A. 1983. Preservation of sweet sorghum biomass. *Biotechnol. Bioengng Symp.* 13:113–120

Kawahigashi, H., Kasuga, S., Okuizumi, H., Hiradare, S., Yonemaru, J. 2013. Evaluation of Brix and sugar content in stem juice from sorghum varieties. *Grassland Science.* 59: 11-19.

Keatly, M. 2003. Australia in Phenology. *An Integrative Environmental Science*. (chapter 2.2), edited by M.D. Schwartz, Kluwer Academic press, 27-44.

Koch, E., Scheifinger, H. 2004. Phenology as a biological indicator for a warming Europe. *World Resource Review*, 16, (2).

Lafarge, T., Tardieu, F. 2002. A model co-ordinating the elongation of all leaves of a sorghum cultivar was applied to both Mediterranean and Sahelian conditions. *Journal of Experimental Botany*, 53, 715–725.

Li Dajue. 1997. Developing sweet sorghum to accept the challenge problems on food, energy and environment in 21st Century. *Proceedings of the first international sweet*

sorghum conference on sweet sorghum a multipurpose crop with great potential for exploitation next Century. September 14–19 at Beijing, China.

Lin. C. S., & Binns, M. R. 1986. A method of analysis cultivar x location x year experiments. A new stability parameter. *Theor appl genetic*. 76: 425-430.

Lingle, S.E. 1987. Sucrose metabolism in the primary culm of sweet sorghum during development. *Crop Sci*. 27:1214–1219.

McMaster, G.S., Wilhelm, W.W., Frank, A.B., 2005. Developmental sequences for simulating crop phenology for water-limiting conditions. *Aust. J. Agric. Res.* 56, 1277–1288.

Major, D.J., Rood, S.B. and Miller, F.R. 1990. Temperature and photoperiod effects mediated by the sorghum maturity genes. *Crop Sci*. 30: 305-310.

Makanda, I., Derera, J., Tongoona, P., Sibiya, J. 2012. Genetic and GGE biplot analyses of sorghum germplasm for stem sugar traits in Southern Africa. *African Journal of Agricultural Research*. 7 (2): 212-223.

Makanda, I., Tongoona, P., & Derera, J. 2009. Combining ability and heterosis of sorghum germplasm for stem sugar traits under off-season conditions in tropical lowland environments. *Field Crop Res*. 114, 272–279.

Mamma, D., Christakopoulos, P., Koullas, D., Kekos, D., Macris, B.J., Koukios, E. 1995. An alternative approach to the bioconversion of sweet sorghum carbohydrates to ethanol. *Biomass Bioenergy*. 8:99-103.

Mamma, D., Koullas, D., Fountoukidis, G., Kekos, D., Macris, B.J. & Koukios, E. 1996. Bioethanol from sweet sorghum. simultaneous saccharification and fermentation of carbohydrates by a mixed microbial culture, *Process Biochemistry*, Vol. 31, No.4, (May 1996), pp. 377-381, ISSN 1359-5113.

Marquez, F. 1991. *Genotecnia vegetal. Métodos, teoría, resultados*. Tomo III. AGT editor S. A. México.

Martin, J.H. 1970. History and classification of sorghum, *Sorghum bicolor* (Linn.), Moench. In Wall J.S. and Ross W.M. (eds.). *Sorghum production and utilization*. The AVI Publishing Company, Westport, CT, USA. Pp. 1.27.

Massacci, A., A. Battistelli and F. Loreto, 1996. Effect of drought stress on photosynthetic characteristics, growth and sugar accumulation of field grown sweet sorghum. *Australian J. Pl. Physiol.*, 23: 331–40.

Mastrorilli, M., Katerji, N., & Rana, G. 1999. Productivity and water use efficiency of sweet sorghum as affected by soil water deficit occurring at different vegetative growth stages. *Eur. J. Agron.*, 11, 207–215.

Mayers, R.J.M., Foale, M.A. and Keefer, G.D. 1989. Growth and development range of grain sorghum in three tropical and sub-tropical environments. *Field Crop Res*. 22: 267-287.

Mcbee, G.G., & Miller, F.R. 1982. Carbohydrates in sorghum culms as influenced by cultivars, spacing, and maturity over a diurnal period. *Crop Sci.* 22: 381–385.

Miller, F. R., & McBee, G. G. 1993. Genetics and management of physiologic systems of sorghum for biomass production. *Biomass Bioenergy.* 5: 41-49.

Miller, F. R., Creelman, R.A. 1980. 35th Annual corn and sorghum research conference, 19–232.

Miller, F.R., Barnes, D.K. and Cruzado, H.J. 1968. Effect of tropical photoperiods on the growth of sorghum when grown in 12 monthly plantings. *Crop Sci.* 8: 499-502.

Morellato, L.P.C., & Haddad, F.B. 2000. The Brazilian Atlantic Rain Forest. *Biotipica* especial issue, 32, No. 4b.

Morgan, P. W., Williams Guy, L., & Pao, C.I. 1987. Genetic regulation of development in sorghum bicolor. III. Asynchrony of thermoperiods with photoperiods promotes floral initiation. *Plant Physiology* 83, 448-450.

Muchow, R.C., Carberry, P.S. 1990. Phenology and leaf area development in a tropical grain sorghum. *Field Crops Research* 23, 221–237.

Murray, S.C., Rooney, W.L., Hamblin, M.T., Mitchell, S.E., & Kresovich, S., 2009 Sweet sorghum genetic diversity and association mapping for Brix and height. *Plant Gen.*, 2, 48–62.

Murray, S.C., Sharma, A., Rooney, W.L., Klein, P.E., Mullet J.E., Mitchell, S.E., Kresovich, S. 2008. Genetic improvement of sorghum as a biofuel feedstock I: QTL for stem sugar and grain nonstructural carbohydrates. *Crop Science.* 48:2165–2179.

Mussatto, S.I., Dragone, G., Guimaraes, P.M.R., Silva, J.P.A., Carneiro, L.M., Roberto, I.C., Vicente, A., Domingues, L., & Teixeira, J.A., 2010. Technological trends, global market, and challenges of bio-ethanol production. *Biotechnol. Adv.*, 28, 817–830.

Nasidi, M., Akunna, J., Deeni, Y., Blackwood, D., Walker, G. 2010. Bioethanol in Nigeria. comparative analysis of sugarcane and sweet sorghum as feedstock sources. *Energy & Environmental Science* 3, 1447–1457.

Olweny, C., Abayo, G., et al. 2013. "Screening of Sweet Sorghum (*Sorghum bicolor* (L.) Moench) Varieties for Sugar and Biomass Production." *Sugar Tech* 15(3), 258-262.

Pandey, S. Vargas, J.E. 1985. La interacción fenotipo-medio ambiente y su importancia en el mejoramiento intrapoblacional en las plantas cultivadas. Trabajo presentado en el VII Congreso Latinoamericano de Genética- I Congreso Colombiano de Genética. Mimeografiado. 38p.

Peacock, J. M. 1982. Response and tolerance of sorghum to temperature stress. Pages 143-160. In. *Sorghum in the eighties. Proceedings of the International symposium on sorghum.* ICRISAT, 2-7 November 1981. Patancheru, A.P., India.

Pfeiffer, T.W., Bitzer, M.J., Toy, J.J., Pedersen, J.F. 2010. Heterosis in sweet sorghum and selection of a new sweet sorghum hybrid for use in syrup production in Appalachia. *Crop Sci.* 50: 1788–1794.

Poornima, S., Geethalakshmi, V., Kokilavani, S. 2010. Thermal Indices for Suitable Sowing Window of Sweet Sorghum in Coimbatore District of Tamil Nadu. *Madras Agric. J.* 97 (1-3): 49-50.

Prasad, S., Anoop Singh, N. Jain., & Joshi, H.C. 2007. Ethanol production from sweet sorghum syrup for utilization as automotive fuels in India. *Energ. Fuel* 21, 2415–2420.

Proexport Colombia. 2011. Biofuels Industry in Colombia. Extraído, 3 septiembre 2012 desde <http://www.proexport.com.co/vbecontent/library/documents>.

Quinby, J. R., Hesketh, J. D. & Voigt, R. L., (1973). Influence of temperature and photoperiod on floral initiation and leaf number in sorghum. *Crop Science* 13, 243-246.

Rakshit, Sujay Ganapathy, K. N., Gomashe, S. S., Ghorade, R. B., Kumar, M. V. Nagesh, Ganesmurthy, K., Jain, S. K., Kamtar, M. Y., Sachan, J. S., Ambekar, S. S., Ranwa, B. R., Kanawade, D. G., Balusamy, M., Kadam, D., Sarkar, A. Tonapi, V. A. 2012. "GGE biplot analysis to evaluate genotype, environment and their interactions in sorghum multi-location data." *Euphytica* 185, 465-479.

Rao, P. S., Reddy, P. S., Rathore, A., Reddy, B.V.S, Panwar, S. 2011. Application GGE biplot and AMMI model to evaluate sweet sorghum (*Sorghum bicolor*) hybrids for Genotype \times Environment interaction and seasonal adaptation. *Indian Journal of Agricultural Sciences.* 81(5): 438-444.

Rao, S. P., Rao, S. S., Seetharama, N., Umakanth, A. V., Sanjana Reddy, P., Reddy, B. V. S., & Gowda, C. L. L., 2009. Sweet sorghum for biofuel and strategies for its improvement. Information Bulletin No. 77, International Crops Research Institute for Semi-Arid Tropics, Patancheru 502324, Andhra Pradesh, India, pp. 80.

Rattunde, HFW., Zerbini, E., Chandra, S., Flower, D.J. 2001. Stover quality of dual-purpose sorghums. Genetic and environmental sources of variation. *Field Crops Res.* 71: 1-8.

Reddy, B. V., Ramaiah, B., Ashok Kumar, A., Sanjana Reddy, P. 2007. "Selection of restorers and varieties for stalk sugar traits in sorghum." *SAT eJournal*, 5(1), 1-3.

Reddy, B.V.S., Ramesh, Sanjana.S., Reddy, P., Ramaih, B., Salimath. P.M., Rajashekar Kachapur. 2005. Sweet sorghum-A potential alternative raw material for bioethanol and bioenergy. *International Sorghum and Millets Newsletter* 46, 79-86.

Ricaud, R. & Arceneaux, A. 1990. Sweet sorghum research on biomass and sugar production in 1990. Manuscript report from the St. Gabriel Experiment Station.

Richard Frederiksen. (Eds) *Sorghum. Origin, history, technology, and production.* John Wiley & Sons, New York, pp 131–190.

Ritchie, J.T. and Alagarswamy, S. 1988. Documentation of CERES-sorghum model, growth and development. Simulation modeling workshop, ICRISAT, Patancheru, A.P. (India), Oct. 12-21. pp.1-23.

Rooney, W. L., Blumenthal, J., Bean, B., Mullet, J.E. 2007. Designing sorghum as a dedicated bioenergy feedstock. *Biofuel Bioprod Bior*, 1, 147-157.

Rubin, E. M. 2008. Genomics of cellulosic biofuels. *Nature* 454, 841–845.

Rudolph M.A. 1980. Research report on development of sweet sorghum as an energy crop volume 1: Agricultural task. USDOE, Battelle, Columbus. U.S. Department of Commerce.

Saballos, A. 2008. Development and Utilization of Sorghum as a Bioenergy Crop. Genetic Improvement of Bioenergy Crops. W. Vermerris. Gainesville, FL., Springer Science. 211-248.

Sadras, V.O., Monzon, J.P., (2006). Modelled wheat phenology captures rising temperature trends. Shortened time to flowering and maturity in Australia and Argentina. *Field Crops Res.* 99, 136–146.

Sarvas, R., (1972). Investigations on the annual cycle of development of forest trees I. Autumn dormancy and winter dormancy. *Communicationes Instituti Forestalis Fenniae.* 76.

Seetharama N, Rao K, Subramanian V, Murty D., 1987. Screening for sweet stalk sorghums, and environmental effect on stalk sugar concentrations. In 'Technology and applications for alternative uses of sorghum. proceedings of the national seminar'. Parbhani, India, pp 169–179.

Shinde, M. S., Repe, S. S., Gaikwad, A.R., Dalvi, U.S. & Gadakhhet, S.R., 2013. "Physio-biochemical assessment of sweet sorghum genotypes during post rainy season." *J. Acad. Indus. Res.* 1(8), 501-507.

Snedecor, G. N & Cochocran, W. G. 1980. *Statistical methods.* 7th ed. IOWA, State University Press. Ames, I.A.

Soileau, J. M., & Bradford, B. N. 1985. Biomass and sugar yield response of sweet sorghum to lime and fertilizer. *Agronomy Journal* 77 (3), 471–475.

Sruthi Narayanan, Robert M. Aiken, P. V. Vara Prasad, Zhanguo Xin, and Jianming Yu. 2013. Water and Radiation Use Efficiencies in Sorghum. *Agronomy Journal.* 105, 649-656.

Steduto, P., N. Katerji, H. Puertos-Molina, M. Unlu, M. Mastrorilli, & G. Rana. 1997. Water-use efficiency of sweet sorghum under water stress conditions. Gas exchange investigations at leaf and canopy scales. *Field Crop Res.* 54, 221–234.

Subramanian, S. K. 2013. Agronomical, physiological and biochemical approaches to characterize sweet sorghum genotypes for biofuel production. Agronomy. Manhattan, Kansas State University. Doctor of Philosophy. 186.

Sun, V.G., & Chow, N.P. 1949. The effect of climatic factors on the yield of sugar cane in Tainan, Taiwan. Part 1. Single factor investigation. Report of Taiwan Sugar Experiment Station 2, 44-98.

Swanson, A., & Laude, H. 1934. Varieties of Sorghum in Kansas. Kansas Bulletin. 266: 2-50.

Tari, I., Laskay, G., Takás, Z., Poór, P. 2012. "Response of Sorghum to Abiotic Stresses. A Review." J. Agro. Crop Sci. 199(4), 264-274.

Tarpley, L., Lingle, S., Victor, D., Andrews, D and Miller, F. 1994. "Enzymatic Control of Nonstructural Carbohydrate Concentrations in Stems and Panicles of Sorghum." Crop science 34, 446-452.

Tekalign, T. and P.S. Hammes. 2005. Growth and productivity of potato as influenced by cultivar and reproductive growth II. Growth analysis, tuber yield and quality. Scientia Horticulturae 105 (1): 29-44.

Tingting, X., Peixi, S.U., & Lishan, S. 2010. Photosynthetic characteristics and water use efficiency of sweet sorghum under different watering regimes. Pak J. Bot. 42, 3981-3994.

Tsuchihashi N, Goto Y. 2004. Cultivation of sweet sorghum (*Sorghum bicolor* (L.) Moench) and determination of its harvest time to make use as the raw material for fermentation, practiced during rainy season in dry land Indonesia. Plant Prod. Sci., 7, 442-448.

Uehara, N., Sasaki, H., et al. 2009. "Effects of the Temperature Lowered in the Daytime and Night-time on Sugar Accumulation in Sugarcane." Plant Prod. Sci. 12(4), 420-427.

Vanderlip, R. L. & Reeves, H. E. 1972. Growth stages of sorghum [*Sorghum bicolor*, (L.) Moench.]. Agronomy Journal 64, 13-17.

Vietor, D.M., & Miller, F.R. 1990. Assimilation, partitioning, and nonstructural carbohydrate in sweet compared with grain sorghum. Crop Sci. 30, 1109-1115.

Wani, S. P., Albrizio, R. Vajja, N.R. 2012. Sorghum. En Steduto et al (Eds), Crop yield response to water (pp 142-151). Roma, Italia. FAO Irrigation and Drainage Paper 66.

Woods, J. 2001. The potential for energy production using sweet sorghum in Southern Africa. Energy for Sustainable Development. 5: 31-38.

Yan, W., Kang, M.S. 2002. GGE biplot analysis. A graphical tool for breeders, geneticists, and agronomists. CRC Press, Boca Raton, FL. USA. 271 pp.

Yan, W., & Wallace, D. H. 1998. "Simulation and Prediction of Plant Phenology for Five Crops Based on Photoperiod x Temperature Interaction." Annals of Botany, 81, 705-716.

Yu, J., Zhang, X., Tan, T. 2008. Ethanol production by solid state fermentation of sweet sorghum using thermotolerant yeast strain. *Fuel Process Technol.* 89: 1056-1059.

Zhao XN, Li GY, Liu Y, Lu P, Dun BQ, Yue MQ. 2008 Genetic diversity and correlation analysis of main agronomic characters in domestic and foreign sweet sorghum germplasm. *J Plant Gene Resos* 9(3), 302-307.

Zhao, Y.L., Dolat, A., Steinberger, Y., Wang, X., Osman, A., Xie, G.H. 2009. Biomass yield and changes in chemical composition of sweet sorghum cultivars grown for biofuel. *Field Crop Res.* 111: 55–64.

Zou, G., Yan, S. Zhai, G., Zhang, Z., Zou, J., Tao, Y. 2011. Genetic variability and correlation of stalk yield-related traits and sugar concentration of stalk juice in a sweet sorghum (*Sorghum bicolor* L. Moench) population. *Australian Journal of Crop Science*, 5(10): 1232-1238.

A. ANEXOS

Anexo 1-1. Análisis de varianza AMMI grados día (°Cd) de la evaluación de 10 genotipos de sorgo dulce en 6 ambientes de 4 subregiones naturales, 2009-2010.

FV	GL	Fase vegetativa (°Cd)		Fase reproductiva (°Cd)		Llenado grano (°Cd)	
		CM	%	CM	%	CM	%
Modelo	62	106.1 ** ¹	96.8	424.3 **	96.8	318.8 **	95.8
Repetición	3	0.2 ns	0.01	0.97 ns	0.01	7.0 ns	0.1
Ambientes (A)	5	441.2 **	32.5	1764.7 **	32.5	1012.8 **	24.5
Genotipos (G)	9	393.4 **	52.1	1573.6 **	52.1	1266.0 **	55.2
GA	45	18.4 **	12.2	73.8 **	12.2	73.1 **	15.9
Error	177	1.20	3.2	4.9	3.2	4.9 **	4.2
Total	239		100		100		100
CV (%)		2.8		2.8		2.2	
Términos AMMI							
GA	45	18.4 **	100	73.8 **	100.0	73.1 **	100
CP1	13	28.8 **	42.2	115.0 **	45.1	132.1 **	52.2
CP2	11	22.3 **	34.5	89.3 **	29.6	63.2 **	21.1
CP3	9	11.7 **	10.5	46.6 **	12.6	47.9 **	13.1
CP4	7	10.5 **	9.4	41.9 **	8.8	43.0 **	9.2
CP5	5	6.4 **	3.4	25.7 **	3.9	28.6 **	4.3

¹** Altamente significativo (P<0.01); * Significativo (P<0.05); ns= No significativo; FV= Fuente variación; GL= Grado Libertad; CM= Cuadrado media; CV=Coeficiente Variación.

Anexo 1-2. Análisis de varianza AMMI altura de planta(cm), diámetro basal (mm), diámetro 5to entrenudo (mm) de la evaluación de 10 genotipos de sorgo dulce en 6 ambientes de 4 subregiones naturales, 2009-2010.

FV	GL	Altura planta (cm)		Diámetro basal (mm)		Diámetro 5 ^{to} entrenudo (mm)	
		CM	%	CM	%	CM	%
Modelo	62	24049.7 ** ¹	95.2	24.8 **	76.1	22.6 **	71.2
Repetición	3	2156.9 **	0.41	4.5 ns	0.7	5.9 ns	0.9
Ambientes (A)	5	45039.9 **	14.4	121.0 **	30.0	113.1 **	28.8
Genotipos (G)	9	125134.8 **	71.9	54.7 **	24.4	39.6**	18.1
GA	45	2959.8 **	8.5	9.5 **	21.1	10.2	23.4
Error	177	429.25	4.8	2.7	23.9	3.2	28.8
Total	239		100				100
CV		7.3		10.1		12.0	
Términos AMMI							
GA	45	2959.8 **	100	9.5 **	100	10.2 **	100.0
CP1	13	4618.4 **	45.6	17.7 **	54.0	14.2 **	40.2
CP2	11	3187.8 **	28.7	8.4 **	21.6	15.8 **	37.7
CP3	9	3217.2 **	14.2	6.7 **	14.2	6.4 *	12.6
CP4	7	1103.9 *	8.2	4.0 ns	6.5	4.5 ns	6.9
CP5	5	281.5 ns	3.4	3.2 ns	3.8	2.4 ns	2.6

¹** Altamente significativo (P<0.01); * Significativo (P<0.05); ns= No significativo; FV= Fuente variación; GL= Grado Libertad; CM= Cuadrado media; CV=Coeficiente Variación.

Anexo 1-3. Análisis de varianza AMMI peso seco tallo ($t\ ha^{-1}$), peso seco hoja ($t\ ha^{-1}$), y peso seco panoja ($t\ ha^{-1}$) de la evaluación de 10 genotipos de sorgo dulce en 6 ambientes de 4 subregiones naturales, 2009-2010.

FV	GL	Peso seco tallo ($t\ ha^{-1}$)		Peso seco hoja ($t\ ha^{-1}$)		Peso seco panícula ($t\ ha^{-1}$)	
		CM	%	CM	%	CM	%
Modelo	62	327.8 ** ¹	97.2	27.0 **	85.1	2.6 **	79.9
Repetición	3	3.5 ns	0.1	2.2 ns	0.3	0.4 ns	0.5
Ambientes (A)	5	2245.8 **	53.7	247.5 **	62.8	21.4 **	53.4
Genotipos (G)	9	584.0 **	25.1	15.1 **	6.9	1.4 **	6.5
GA	45	85.0 **	18.3	6.6 **	15.1	0.9 **	19.4
Error	177	3.4	2.8	1.7	14.9	0.2	20.1
Total	239		100		100		100
CV (%)		14.1		26.8		25.0	
Términos AMMI							
GA	45	584.0 **	100	6.6 **	100	0.9 **	100.0
CP1	13	216.2 **	73.5	16.9 **	74.0	1.2 **	40.8
CP2	11	56.1 **	16.1	5.0 **	18.7	1.3 **	36.8
CP3	9	40.1 **	9.4	1.4 ns	4.2	0.6 **	13.9
CP4	7	3.8 ns	0.7	1.2 ns	2.8	0.4 ns	6.9
CP5	5	2.5 ns	0.3	0.2 ns	0.3	0.1 ns	1.7

¹** Altamente significativo ($P < 0.01$); * Significativo ($P < 0.05$); ns= No significativo; FV= Fuente variación; GL= Grado Libertad; CM= Cuadrado media; CV=Coeficiente Variación.

Anexo 1-4. Análisis de varianza AMMI valores Brix en jugo, contenido de azúcares (g) en tallo y volumen de jugo en tallo (ml) de la evaluación de 10 genotipos de sorgo dulce en 6 ambientes de 4 subregiones naturales, 2009-2010.

FV	GL	Brix		Contenido azúcar (g)		Volumen jugo (ml)	
		CM	%	CM	%	CM	%
Modelo	62	44.8 ** ¹	90.9	1489.8 **	85.5	96204.5 **	81.9
Repetición	3	2.3 ns	0.2	40.0 ns	0.1	2920.9 ns	0.1
Ambientes (A)	5	239.7 **	39.2	4488.8 **	20.8	434638.8 **	29.9
Genotipos (G)	9	72.9 **	21.5	4685.4 **	39.0	241738.7 **	29.9
GA	45	20.4 **	30.0	614.1 **	25.6	35712.8 **	22.1
Error	177	1.6	9.1	88.7	14.5	7424.8	18.1
Total	239		100		100		100
CV (%)		8.7		12.5		28.8	8.7
Términos AMMI							
GA	45	20.4 **	100	614.1 **	100	7424.8 **	100.0
CP1	13	33.7 **	47.7	1193.8 **	56.2	63170.2 **	47.7
CP2	11	22.2 **	26.6	785.5 **	31.3	49577.3 **	26.6
CP3	9	15.9 **	15.6	220.5 **	7.2	16377.6 **	15.6
CP4	7	11.3 **	8.6	175.6 ns	4.4	11319.1 ns	8.6
CP5	5	2.6 ns	1.4	52.1 ns	0.9	2775.9 ns	1.4

¹** Altamente significativo (P<0.01); * Significativo (P<0.05); ns= No significativo; FV= Fuente variación; GL= Grado Libertad; CM= Cuadrado media; CV=Coeficiente Variación.

Anexo 1-5. Análisis de varianza composición tallo (humedad, materia seca), sólidos solubles (Brix) y contenido de sacarosa (%), glucosa (%) y fructosa (%) en jugo del tallo de la evaluación de 6 genotipos de sorgo dulce en el ambiente de Palmira, 2009.

FV	GL	Humedad	Materia seca	Fibra	Brix	Sacarosa	Glucosa	Fructosa
		Cuadrado Media						
Modelo	8	19.4 * ¹	19.4 *	20.5 **	1.8 *	3.3 **	0.11 *	0.10**
Repetición	3	0.6 ns	0.6 ns	0.8 ns	0.5 ns	0.3 ns	0.004 ns	0.003 ns
Genotipos	5	30.6 **	30.6 **	32.3 **	2.5 **	5.1 **	0.17 **	0.16 **
Error	15	5.1	5.1	3	0.5	0.7	0.03	0.03
CV (%)		3.4	6.8	9.4	4.7	9.6	0.1	9.3
R ²		0.7	0.7	0.8	0.7	0.7	0.6	0.7

¹** Altamente significativo (P<0.01); * Significativo (P<0.05); ns= No significativo; FV= Fuente variación; GL= Grado Libertad; CV=Coeficiente Variación.

Anexo 1-6. Coeficiente de correlación de Pearson de las variables edafoclimáticas, 2009-2010.

Variable	Coeficiente de Correlación (valor de r)
pH	M.O.(-0.30**), P(0.81**), S(0.78**), Ca(0.80**), Mg(0.57**), K(0.66**), Na(0.60**), Fe(-0.33**), Cu(0.61**), Mn(0.52**), Zn(0.61**), B(0.84**), Tmax1(0.51**), Tmin1(0.08), AT1(0.64**), Rad1(0.35**), Preto1(-0.83**), ETo1(0.49**), NDLL1(-0.83), NDS1(0.84**), HR1(-0.79**), Tmax2(0.83**), Tmin2(0.16*), AT2(0.78**), Rad2(0.65**), Preto2(-0.74**), ETo2(0.67**), NDLL2(-0.78), NDS1(0.80**), HR1(-0.89**), Tmax3(0.75**), Tmin3(0.18*), AT3(0.66**), Rad3(0.46**), Preto3(-0.79**), ETo3(0.58**), NDLL3(-0.74), NDS3(0.71**), HR3(-0.73**)
TMAX1	Tmin1(0.85**), AT1(-0.03), Rad1(0.61**), Preto1(-0.46**), ETo1(0.73**), NDLL1(-0.41**), NSD1(0.59**), HR1(-0.56**)
Tmin1	AT1(-0.56**), Rad1(0.25**), Preto1(-0.07), ETO1(0.46**), NDLL1(0.008), NDS1(0.14*), HR1(-0.24**)
Preto1	ETo1(-0.32**), NDLL1(0.95**), NDS1(-0.76), HR1(0.87**)
Tmax2	Tmin2(0.57**), AT2(0.56**), Rad2(0.87**), Preto2(-0.55**), ETo2(0.88**), NDLL2(-0.65**), NSD2(0.79**), HR2(-0.77**)
Tmin2	AT2(-0.37**), Rad2(0.36**), Preto2(0.23**), ETO2(0.50**), NDLL2(0.14*), NDS2(0.02), HR2(-0.20**)
Preto2	ETo2(-0.35**), NDLL2(0.94**), NDS2(-0.78**), HR2(0.73**)
Tmax3	Tmin3(0.51**), AT3(0.63**), Rad3(0.78**), Preto3(-0.75**), ETo3(0.63**), NDLL3(-0.71**), NSD3(0.60**), HR3(-0.71**)
Tmin3	AT3(-0.34**), Rad3(0.30**), Preto3(0.08), ETO3(0.16**), NDLL3(0.16*), NDS3(-0.20**), HR3(0.05)
Preto3	ETo2(-0.67**), NDLL2(0.91**), NDS2(-0.89**), HR2(0.91**)

Anexo 1-7. Matriz de factores de preponderancia, valores propios y proporción de la varianza de las variables edafoclimáticas explicada en seis localidades, 2009-2010.

Variables	Factores de preponderancia				
	CP1	CP2	CP3	CP4	CP5
pH	0.93	-0.10	-0.08	-0.32	-0.12
MO	-0.41	-0.46	0.70	-0.33	0.07
P	0.82	-0.25	0.46	-0.17	-0.07
S	0.75	-0.24	0.48	-0.36	0.12
Al	-0.88	0.12	0.45	0.03	-0.02
Ca	0.64	-0.61	0.14	-0.37	-0.23
Mg	0.37	-0.81	-0.03	-0.36	-0.25
K	0.79	0.10	-0.51	0.01	0.33
Na	0.65	0.63	0.30	-0.28	0.03
Fe	-0.32	0.84	0.00	-0.01	-0.40
Cu	0.60	0.69	-0.21	-0.34	0.04
Mn	0.33	-0.70	-0.52	-0.27	-0.16
Zn	0.51	-0.72	-0.43	-0.06	-0.14
B	0.70	0.20	0.07	-0.64	-0.21
A	0.28	-0.11	0.27	0.29	0.75
Ar	0.04	-0.28	0.21	-0.70	-0.19
TMAX1	0.60	0.74	-0.18	-0.12	0.19
TMAX2	0.87	0.40	0.11	-0.25	0.02
TMAX3	0.87	0.44	-0.05	0.10	-0.14
TMIN1	0.11	0.88	-0.29	-0.25	0.24
TMIN2	0.17	0.90	-0.21	-0.31	0.11
TMIN3	0.16	0.88	-0.25	-0.34	0.02
AT1	0.70	-0.40	0.45	0.19	-0.21
AT2	0.83	-0.44	0.29	0.05	-0.10
AT3	0.77	-0.32	0.21	0.43	-0.19
RAD1	0.62	0.46	0.34	0.46	0.00
RAD2	0.76	0.29	0.46	-0.12	0.25
RAD3	0.64	0.44	0.43	0.24	-0.24
RADS1	0.46	0.56	0.35	0.36	-0.28
RADS2	0.62	0.41	0.24	0.04	-0.26
RADS3	0.55	0.08	-0.38	0.16	-0.67
PRETO1	-0.84	0.24	0.23	0.15	-0.38
PRETO2	-0.81	0.40	0.01	-0.12	-0.09
PRETO3	-0.88	0.18	0.14	-0.26	0.15
NDLL1	-0.83	0.28	0.03	0.22	-0.36
NDLL2	-0.84	0.34	-0.14	0.05	-0.29
NDLL3	-0.90	0.19	-0.08	-0.32	-0.11

Anexo A

NDS1	0.93	0.09	0.18	-0.02	0.05
NDS2	0.93	-0.04	0.29	0.09	0.05
NDS3	0.83	-0.31	-0.21	0.32	0.11
ETO1	0.66	0.57	0.13	0.21	-0.11
ETO2	0.79	0.48	0.24	-0.01	-0.07
ETO3	0.65	0.02	-0.50	0.22	-0.16
HR1	-0.80	0.05	0.57	0.02	-0.13
HR2	-0.92	0.02	0.25	0.05	0.02
HR3	-0.83	0.19	0.37	-0.31	0.05
Valores propios	22.4	10.0	4.6	3.8	2.7
Variabilidad (%)	48.8	21.7	10.1	8.3	5.9
Acumulado (%)	48.8	70.5	80.6	88.8	94.7

Anexo 2-1. Análisis de varianza acumulación de materia seca total (PSTP), en tallos (PSTA), en hojas (PSH), en Vainas (PSV) y en panículas (PSP) y área foliar en tres genotipos de sorgo dulce en dos ambientes. 2010.

Palmira, Valor-F								
F.V.	G.L.	PSTP	PSTA	PSHP	PSVP	PSP	ARFP	IAF
Repetición	3	2.06 ns	1.59 ns	2.92 ns	3.54 ns	0.75 ns	0.13 ns	0.13 ns
GDD	15	311.65 **	367.07 **	65.85 **	105.95 **	473.24 **	104.65 **	104.65 **
Genotipo (Gen)	2	2.93 ns	6.06 *	16.24 **	12.08 **	16.37 **	0.12 ns	0.12 ns
GDD*Gen	30	2.27 **	1.65 *	2.71 **	2.21 **	7.85 **	1.05 ns	1.05 ns
AICC		1337.2	1219.3	914.7	757.1	927.8	-326.1	423.8
Villavicencio, Valor-F								
F.V.	G.L.	PSTP	PSTA	PSHP	PSVP	PSP	ARFP	IAF
Repetición	3	3.41 ns	3.41 ns	17.91 **	3.98 ns	0.91 ns	3.84 ns	3.84 ns
GDD	16	293.82 **	385.7 **	113.7 **	96.42 **	110.69 **	56.71 **	56.71 **
Genotipo (Gen)	2	33.65 **	129.72 **	18.28 **	25.4 **	0.8 ns	1.69 ns	1.69 ns
GDD*Gen	32	5.14 **	8.56 **	3.8 **	3.95 **	6.45 **	91.45 **	91.45 **
AICC		1244.2	1109.5	776.6	654.5	724.0	-513.2	284.6

Anexo 2-3. Análisis de varianza tasa fotosintética neta de genotipos de sorgo dulce en dos ambientes. 2010.

FV	GL	Fotosíntesis
Modelo	17	529.8 **
Ambientes (A)	1	343.1 ns
Repetición (A)	6	510.1 **
Periodos (Per)	1	21.0 ns
A*PER	1	3485.5 **
Genotipos (G)	2	16.3 ns
GA	2	355.3 **
PER*G	2	402.1 **
A*PER*G	2	137.6 **
Error	124	20.3
Total	141	
CV (%)		14.6

Anexo 2-4. Análisis de varianza peso seco total, tallos, hojas y panículas y grados Brix y contenido de azúcares en genotipos de sorgo dulce en dos ambientes. 2010.

FV	Peso seco (t ha ⁻¹)						BRIX	Contenido azúcar
	GL	Total	Tallo	Hoja	Panícula			
Modelo	11	99.1 **	17.52 **	35.81 **	0.33 **	1.13 ns	285.99 **	
Ambientes (A)	1	847.99 **	24.57 **	326.23 **	0.01 ns	7.63 *	1607.73 *	
Rep (A)	6	18.85 *	4.90 ns	6.10 **	0.14 ns	0.65 ns	184.81 *	
Genotipos (G)	2	22.67 *	7.48 ns	9.88 **	0.78 **	0.35 ns	127.06 ns	
GA	2	41.99 **	14.03 *	5.67 **	0.59 **	0.09 ns	87.59 ns	
Error	12	4.80	2.98	0.48	0.06	0.98		
Total	23							
CV (%)		11.6	15.4	10.5	23.2	6.1	21.6	

Anexo 2-5. Análisis de varianza composición entrenudos del tallo en genotipos de sorgo dulce en dos ambientes. 2010.

FV	GL	Materia seca	Fibra	Brix	Saca	Azúcares reductores
		%				
Modelo	14	19.9 **	34.6 **	4.2 **	4.2 **	0.09 **
Repetición	3	9.9 ns	14.6 *	1.4 ns	0.25 ns	0.10 ns
Genotipo (G)	2	17.5 **	184.3 **	54.3 **	37.8 **	0.23 **
Tercio (T)	3	2.9 *	8.3 ns	4.2 *	4.7 **	0.02 ns
GxT	6	2.1 ns	7.8 ns	1.0 ns	0.4 ns	0.09 ns
Error	33	4.3	4	0.44	0.61	0.02
CV (%)		6.7	11.6	4.8	8.3	13
R ²		0.66	0.79	0.8	0.75	0.65

