

**DETERMINACIÓN Y EFECTO DEL TIEMPO TÉRMICO SOBRE EL  
COMPORTAMIENTO FISIOLÓGICO DE LA REMOLACHA AZUCARERA (*Beta vulgaris*  
*L. spp. vulgaris*) EN LA REGIÓN DEL ALTO CHICAMOCHA**

**PEDRO ALEXANDER INFANTE POSADA**

Ingeniero Agrónomo

Tesis presentada como requisito para optar al título de  
**Magíster en Ciencias Agrarias con énfasis en Fisiología de Cultivos**



**UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA  
FACULTAD DE AGRONOMÍA  
ESCUELA DE POSGRADOS  
MAESTRÍA EN CIENCIAS AGRARIAS  
BOGOTÁ  
2010**

**DETERMINACIÓN Y EFECTO DEL TIEMPO TÉRMICO SOBRE EL  
COMPORTAMIENTO FISIOLÓGICO DE LA REMOLACHA AZUCARERA (*Beta vulgaris*  
*L. spp. vulgaris*) EN LA REGIÓN DEL ALTO CHICAMOCHA**

**PEDRO ALEXANDER INFANTE POSADA**

Ingeniero Agrónomo

Código 790668

Trabajo de grado para optar al título de  
**Magíster en Ciencias Agrarias con énfasis en Fisiología de Cultivos**

**DIRIGIDO POR:**

**JAIRO FARID CLAVIJO PORRAS**

**Co-director: JAIRO CUERVO**



**UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA  
FACULTAD DE AGRONOMÍA  
ESCUELA DE POSGRADOS  
MAESTRÍA EN CIENCIAS AGRARIAS  
BOGOTÁ, 2010**

“Este trabajo hace parte de las investigaciones realizadas por la Facultad de Agronomía de la Universidad Nacional de Colombia. Sin embargo, las ideas emitidas por los autores son de su exclusiva responsabilidad y no expresan necesariamente opiniones de la Universidad”

(Resolución No. 0047 de 1981 Art. 14. Consejo directivo Facultad de Agronomía. Bogotá, D. C.).

Noviembre de 2001.

## **NOTA DE ACEPTACIÓN**

---

**JAIRO F. CLAVIJO**

DIRECTOR. Profesor Emérito Facultad de Agronomía Universidad Nacional de Colombia

---

**JAIRO L. CUERVO**

CO-DIRECTOR. Profesor Asociado Facultad de Agronomía Universidad Nacional de Colombia

Bogotá, Mayo de 2010

*“It is better to ask some of the questions than to know all of the answers”*  
*James Thurber.*  
*Es mejor hacer algunas preguntas que tener todas las respuestas*

*“scientia dependit in mores”*  
*El conocimiento se transforma en hábitos*

## AGRADECIMIENTOS

El autor desea, mediante estas líneas, agradecer profundamente a quienes de una u otra manera hicieron posible este trabajo:

Doctor JAIRO FARID CLAVIJO PORRAS por ofrecerme su amistad y apoyo para el desarrollo de este trabajo, verdadero filósofo del conocimiento, que continua produciendo las emociones más intensas de la entelequia intelectual.

Doctor JAIRO LEONARDO CUERVO por ofrecer su apoyo oportuno e incondicional en todo lo relacionado con esta investigación.

A la célebre UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA por acogerme en sus claustros y darme la posibilidad de no solo recibir conocimientos académicos, sino también humanos con los cuales desarrollar la integridad de mi ser social y nacional. Por dejar expresar mis opiniones con la debida corrección, pero sin censura y sin atavismos de ninguna clase. Cuyos conocimientos me hicieron alcanzar la beca de posgrado, ser profesor asistente de maestría en su escuela de posgrados, y el grado de honor como ingeniero agrónomo que disfruté en el desarrollo de mi maestría, cuyo regocijo prevalece hasta hoy. Por incitarme a ser de los mejores con el acervo de reconocimientos que me dedicaron. Finalmente, agradezco por el apoyo económico que impulsó el desarrollo de la presente tesis y su divulgación.

A SYNGENTA S.A. por darme la oportunidad de profundizar en mi carrera investigativa, prestigiosa empresa que me permitió avanzar dentro del área agronómica en el tema de cultivos biocombustibles, haciendo asequible sus cultivos y espacios físicos para esta investigación.

A HARVEY ARJONA, ENRIQUE TORRES, DIANA GALVEZ, RICARDO MARTÍNEZ, CARLOS GOMEZ y CRISTIAN FERNANDEZ por su amable, cordial, profesional y oportuna revisión técnica y de estilo de este documento.

A mi equipo fraterno que tras el escenario soporta mi sistema. Quienes acarician anónimamente el sabor de mis logros y para quienes comparto mis alegrías.

## Tabla de contenido

Introducción .....	3
Marco Teórico .....	5
Ecofisiología .....	8
Morfoanatomía de la Remolacha Azucarera .....	10
Desarrollo de la Remolacha Azucarera.....	18
Tiempo térmico y Temperatura Base (Tb).....	20
Materiales y Métodos .....	26
Materiales para la determinación de Tb.....	26
Procedimiento para la determinación de Tb .....	26
Materiales para el análisis de Desarrollo, Crecimiento y Calidad .....	29
Procedimiento para el análisis de Desarrollo.....	31
Procedimiento para el análisis de Crecimiento.....	35
Índices de crecimiento.....	35
Modelo simple de simulación del crecimiento y distribución de peso seco.....	37
Procedimiento para el análisis de Calidad .....	39
Procedimiento matemático-estadístico .....	42
Resultados y Discusión .....	43
Cultivo .....	43
Temperatura base (Tb).....	44
Crecimiento.....	45
Índices de Crecimiento.....	45
Distribución del peso seco.....	53
Desarrollo.....	64
Modelo de desarrollo en STELLA .....	80
Calidad y Rendimiento .....	83
Conclusiones .....	93
Referencias.....	95

## LISTA DE FIGURAS

<i>FIGURA 1. MORFOANATOMÍA Y PROFUNDIDAD DE LA RAÍZ DE REMOLACHA AZUCARERA: (A) DEFINICIÓN DE SECCIONES DE LA REMOLACHA, (B Y C) ESQUEMA Y FOTO DE LA EXPLORACIÓN RADICAL DE REMOLACHA (1,5 Y 2 M), Y (D) ESQUEMA DE CORTE TRANSVERSAL DE LA RAÍZ DE REMOLACHA EN EL PUNTO DE DIÁMETRO MÁXIMO. ADAPTADO DE BELL ET AL. (1996), MAHN ET AL. (2002), Y TAIZ Y ZEIGER (2006).</i>	12
<i>FIGURA 2. VISTA TRANSVERSAL DE LA RAÍZ DE REMOLACHA AZUCARERA</i>	13
<i>FIGURA 3. DIAGRAMA DEL GRADIENTE DE ACUMULACIÓN DE SACAROSA. A) ALTA CONCENTRACIÓN DE AZÚCAR. B) ALTO RENDIMIENTO. ADAPTADO DE BELL ET AL. (1996) Y MILFORD, (2006).</i>	14
<i>FIGURA 4. HOJAS Y PECÍOLOS DE UNA PLANTA DE REMOLACHA AZUCARERA A LOS 3300°Cd (GRADOS DÍA). ABAJO LAS HOJAS Y PECÍOLOS 1-22, Y ARRIBA LAS HOJAS 23-44.</i>	16
<i>FIGURA 5. DOSEL DE REMOLACHA AZUCARERA: ESQUEMA DE HOJAS DE TERCIO INFERIOR (HOJAS CON FONDO VERDE), HOJAS DEL TERCIO MEDIO (HOJAS CON FONDO AZUL) Y HOJAS DEL TERCIO SUPERIOR (HOJAS CON FONDO AMARILLO). ADAPTADO DE TAIZ Y ZEIGER (2006).</i>	17
<i>FIGURA 6. ETAPAS DE DESARROLLO DE REMOLACHA AZUCARERA DE ACUERDO A LA ESCALA GENERAL BBCH. ADAPTADO DE MEIER, 2001.</i>	20
<i>FIGURA 7. A. EMERGENCIA DE REMOLACHA AZUCARERA EN CUARTO OSCURO; B. PLANTULACIÓN; C. PLÁNTULAS INGRESADAS EN FITOTRÓN DE LABORATORIO DE FISIOLOGÍA DE CULTIVOS; D. MUESTRA DE PLÁNTULAS ISOMORFAS.</i>	27
<i>FIGURA 8. PROCESAMIENTO DE MUESTRAS DE TEJIDO RADICAL PARA DETERMINACIÓN DE AZÚCAR. A. CORTE DE MUESTRAS ENTRE EL PRIMER Y SEGUNDO ANILLO CAMBIAL SECUNDARIO AL NIVEL DEL ANCHO MÁXIMO RADICAL; B. TOMA DE MUESTRAS ISOMORFAS PARA LA DETERMINACIÓN DE °BRIX; C. LECTURA DE °BRIX SOBRE EL JUGO EXTRAÍDO DE LA MUESTRA; D. CORTE DE 3 PLANTAS POR VARIEDAD PARA CADA FECHA; E. MACERADO EN FRESCO A BAJA TEMPERATURA; F. MACERADO CON NITRÓGENO LÍQUIDO; G. MUESTRA TRITURADA Y CONGELADA; H. MUESTRA ALMACENADA; I. POS-REACCIÓN EN TUBOS DE ENSAYO, EN ETAPA DE ENFRIAMIENTO; Y J. EXTRACCIÓN CON MICROPIPETA HACIA LA CELDA DE CUARZO QUE SE UBICÓ EN EL ESPECTROFOTÓMETRO.</i>	41
<i>FIGURA 9. HOJAS EN UNA PLANTA DE REMOLACHA AZUCARERA, EN LA PARTE SUPERIOR SE SEPARA LAS HOJAS 1-45, EN LA PARTE INFERIOR 4 AGRUPACIONES DE HOJAS QUE SE ENCONTRARON INSERTADAS A LA CORONA.</i>	46
<i>FIGURA 10. IAF EN REMOLACHA VARIEDADES 0505 Y 0615.</i>	47
<i>FIGURA 11. TAN EN REMOLACHA VARIEDADES 0505 Y 0615</i>	47
<i>FIGURA 12. RAF EN REMOLACHA VARIEDADES 0505 Y 0615</i>	50
<i>FIGURA 13. AFE EN REMOLACHA VARIEDADES 0505 Y 0615</i>	51
<i>FIGURA 14. RAF EN REMOLACHA VARIEDADES 0505 Y 0615</i>	51
<i>FIGURA 15. TASA DE CRECIMIENTO DEL CULTIVO DE REMOLACHA AZUCARERA VARIEDADES 0505 Y 0615, SEMBRADAS EN EL ICA-SURBATÁ (DUITAMA).</i>	53
<i>FIGURA 16. ALOMETRÍA VARIEDAD 0505 DE REMOLACHA.</i>	54
<i>FIGURA 17. ALOMETRÍA VARIEDAD 0615 DE REMOLACHA.</i>	54
<i>FIGURA 18. DISTRIBUCIÓN DE PESO SECO DE LA VARIEDAD 0505</i>	55
<i>FIGURA 19. DISTRIBUCIÓN DE PESO SECO EN LA VARIEDAD 0615</i>	55

FIGURA 20. PATRÓN DE DISTRIBUCIÓN DE PESO SECO DURANTE EL CICLO DE LA VARIEDAD 0505.....	56
FIGURA 21. PATRÓN DE DISTRIBUCIÓN DE PESO SECO DURANTE EL CICLO DE LA VARIEDAD 0615.....	57
FIGURA 22. POTENCIAL ENTRE FUENTE Y VERTEDERO EN LA VARIEDAD 0505 .....	58
FIGURA 23. POTENCIAL ENTRE FUENTE Y VERTEDERO EN LA VARIEDAD 0615 .....	58
FIGURA 24. TIEMPO CRONOLÓGICO Y TIEMPO TÉRMICO PARA EL ICA-SURBATÁ (DUITAMA).....	64
FIGURA 25. TIEMPO CRONOLÓGICO Y TIEMPO TÉRMICO PARA LA REGIÓN DEL VALLE DEL RÍO CHICAMOCHA; AZUL, EN EL ICA-SURBATÁ (DUITAMA); ROJO, SORACÁ; Y VERDE, TOCA. ....	65
FIGURA 26. ETAPAS DE DESARROLLO DE REMOLACHA AZUCARERA HASTA LA FASE VEGETATIVA DE ACUERDO A LA ESCALA BBCH. ADAPTADO DE MEIER 2001. ....	66
FIGURA 27. DESARROLLO VS RENDIMIENTO EN VARIEDAD 0505. FIGURA 28. DESARROLLO VS RENDIMIENTO EN VARIEDAD 0615. ....	67
FIGURA 29. DISTRIBUCIÓN DEL PESO SECO DE LA PLANTA DE REMOLACHA AZUCARERA VARIEDAD 0505 Y SUS ETAPAS DE DESARROLLO CARACTERÍSTICAS EN FASE VEGETATIVA. ....	70
FIGURA 30. DISTRIBUCIÓN DEL PESO SECO DE LA PLANTA DE REMOLACHA AZUCARERA VARIEDAD 0615 Y SUS ETAPAS DE DESARROLLO CARACTERÍSTICAS EN FASE VEGETATIVA. ....	70
FIGURA 31. CORTE TRANSVERSAL DE RAÍCES DE REMOLACHA AZUCARERA PREVIO A LA ETAPA.....	71
FIGURA 32. DIÁMETRO RADICAL VS RENDIMIENTO EN 0505.      FIGURA 33. DIÁMETRO RADICAL VS RENDIMIENTO EN 0615. ....	73
FIGURA 34. FIGURA DE LA ESCALA DE DESARROLLO PARA LAS ETAPAS DE LA FASE VEGETATIVA DE REMOLACHA AZUCARERA. EN EL GRÁFICO DE ANILLO, DESDE EL INTERIOR HACIA LA PERIFERIA SE PRESENTAN LAS ETAPAS PRINCIPALES DE DESARROLLO PARA EL CULTIVO. ....	78
FIGURA 35. ESQUEMA DEL MODELO DE TIEMPO TÉRMICO PARA REMOLACHA AZUCARERA REPRESENTADO CON SIMBOLOGÍA DE FLUJOS DEL LENGUAJE STELLA .....	81
FIGURA 36. SUBMODELO PARA EL CRECIMIENTO DEL CULTIVO DE REMOLACHA DE APOYO PARA EL DE TIEMPO TÉRMICO REPRESENTADO CON SIMBOLOGÍA DE FLUJOS DEL LENGUAJE STELLA .....	82
FIGURA 37. ACUMULACIÓN DE SACAROSA ENTRE PRIMER Y SEGUNDO ANILLO CAMBIAL DE REMOLACHA AZUCARERA VARIEDADES 0615 Y 0505 .....	84
FIGURA 38. GRADOS BRIX EN RAÍZ DE REMOLACHA AZUCARERA VARIEDADES 0615 Y 0505 A LO LARGO DEL EXPERIMENTO. ....	85
FIGURA 39. RENDIMIENTO DE LA VARIEDAD 0615 DE REMOLACHA AZUCARERA A LOS 180 DÍAS EN TRES LOCALIDADES DE LA REGIÓN DEL VALLE DEL RÍO CHICAMOCHA. ....	88
FIGURA 40. RENDIMIENTO PARCIAL DE REMOLACHA AZUCARERA VARIEDAD 0615 A LOS 3000°C D EN DOS LOCALIDADES DE LA REGIÓN DEL VALLE DEL RÍO CHICAMOCHA. ....	90
FIGURA 41. RENDIMIENTOS PARCIALES DE REMOLACHA AZUCARERA VARIEDAD 0615 EN TRES LOCALIDADES DE LA REGIÓN DEL VALLE DE CHICAMOCHA. *ÚNICO VALOR REPORTADO PARA LA LOCALIDAD DE TOCA. ....	91
FIGURA 42. TEMPERATURA MÍNIMA, PROMEDIO Y MÁXIMA DIARIA EN EL ICA-SURBATÁ (DUITAMA)..	100
FIGURA 43. PERFIL DE COMPACTACIÓN EN EL LOTE DEL ICA-SURBATÁ (DUITAMA) ASIGNADO PARA LA SIEMBRA DE LAS VARIEDADES 0505 Y 0615 DE REMOLACHA AZUCARERA. ....	107
FIGURA 44. CALIBRACIÓN DE REFRACTOMETRÍA POR °BRIX Y EL CONTENIDO DE SACAROSA.....	112
FIGURA 45. RELACIÓN DE TIPO DE VARIABLES MEDIDAS DURANTE EL CICLO DE REMOLACHA AZUCARERA CON RESPECTO A LOS FACTORES DE ORDEN DE COMPONENTES PRINCIPALES EN SPAD 3.5. ....	125

*FIGURA 46. CÍRCULO UNITARIO PARA LAS VARIABLES MEDIDAS DURANTE EL CICLO DE REMOLACHA AZUCARERA CON RESPECTO A LOS FACTORES DE ORDEN DE COMPONENTES PRINCIPALES EN SPAD 3.5. .... 126*

*FIGURA 47. REPRESENTACIÓN DE LAS VARIABLES MEDIDAS DURANTE EL CICLO DE REMOLACHA AZUCARERA CON RESPECTO A LOS TRES PRINCIPALES FACTORES DE ORDEN DE COMPONENTES PRINCIPALES EN SPAD 3.5. .... 127*

## LISTA DE TABLAS

TABLA 1. COMPARACIÓN DE CULTIVOS AGRÍCOLAS DESTINADOS A LA PRODUCCIÓN DE ETANOL. ADAPTADO DE SMITH, <i>ET AL.</i> , 2005 Y ROSILLO-CALLE Y WALTER, 2006. ....	5
TABLA 2. ESCALA BBCH PARA LA FASE VEGETATIVA DE LA REMOLACHA AZUCARERA. TOMADA DE MEIER (2001). ....	18
TABLA 3. VARIABLES TOMADAS POR ÓRGANO DE REMOLACHA AZUCARERA.....	33
TABLA 4. PARÁMETROS $K_b$ , RUE, $A_H$ , $A_p$ , $A_p$ Y $A_R$ DEL MODELO DE CRECIMIENTO PARA LAS VARIETADES 0505 Y 0615 DE REMOLACHA. ....	61
TABLA 5. ETAPAS DE DESARROLLO Y CLAVE DE IDENTIFICACIÓN EXTENDIDA BBCH PARA EL CULTIVO DE REMOLACHA AZUCARERA. PROPUESTA ADAPTADA DE MEIER 2001. ....	75
TABLA 6. NÚMERO DE UNIDADES DE CALOR ( $^{\circ}$ CD) PARA EL CULTIVO DE REMOLACHA AZUCARERA VARIETADES 0615 Y 0505. ....	79
TABLA 7. HORAS DE BRILLO SOLAR Y RFA EN EL ICA-SURBATÁ (DUITAMA) DURANTE EL EXPERIMENTO .....	101
TABLA 8. TEMPERATURAS MEDIAS DE DOSEL Y EDÁFICA EN EL ICA-SURBATÁ (DUITAMA) DURANTE EL EXPERIMENTO.....	103
TABLA 9. FORMATO DE REGISTRO DE MEDICIONES PARA CADA PLANTA .....	106
TABLA 10. ESCALA DE DESARROLLO ELABORADA POR HOLEN Y DEXTER PARA EL CULTIVO DE REMOLACHA AZUCARERA, EN VARIETADES SEMBRADAS EN MINNESOTA. ADAPTADA CON INFORMACIÓN DE MEIER, 2001 Y KENTER <i>ET AL.</i> , 2006.....	108
TABLA 11. MODELOS MATEMÁTICOS DE ESTIMACIÓN DEL MOMENTO OPORTUNO DE COSECHA, CALIDAD Y ANCHO MÁXIMO DE HOJA. LAS TENDENCIAS GRÁFICAS FUERON TOMADAS DE CURVEEXPERT 1.4 .....	109
TABLA 12. COEFICIENTES DE DISTRIBUCIÓN DE PESO SECO POR ÓRGANO DE REMOLACHA AZUCARERA .....	114
TABLA 13. PARÁMETROS DE AJUSTE DEL MODELO LOGÍSTICO Y GAUSSIANO DEL DESARROLLO VS RENDIMIENTOS PARCIALES DEL CULTIVO DE REMOLACHA AZUCARERA .....	120
TABLA 14. PARÁMETROS DE AJUSTE DEL MODELO RICHARDS PARA EL CONTENIDO DE SACAROSA DEL CULTIVO DE REMOLACHA AZUCARERA RESPECTO A LA ACUMULACIÓN DE UNIDADES DE CALOR	121
TABLA 15. PARÁMETROS DE AJUSTE DEL MODELO LOGÍSTICO Y RICHARDS PARA EL ANCHO MÁXIMO DE LA HOJA 11 DE REMOLACHA AZUCARERA Y SU LONGITUD DE LA VENA MEDIA .....	122
TABLA 16. PARÁMETROS DE AJUSTE DEL MODELO RICHARDS PARA EL RENDIMIENTO DEL CULTIVO DE REMOLACHA AZUCARERA RESPECTO A LA ACUMULACIÓN DE UNIDADES DE CALOR .....	123

## LISTA DE ANEXOS

ANEXO A. INFORMACIÓN EDAFOCLIMÁTICA Y LIBRO DE CAMPO DEL CULTIVO EN EL CENTRO DE INVESTIGACIÓN ICA-SURBATÁ (DUITAMA) Y DE DOS LOCALIDADES DE LA REGIÓN DEL VALLE DEL RÍO CHICAMOCHA.....	99
ANEXO B. RECOLECCIÓN DE INFORMACIÓN POR UNIDAD EXPERIMENTAL PARA EL EXPERIMENTO EN EL CENTRO DE INVESTIGACIÓN ICA-SURBATÁ (DUITAMA) .....	106
ANEXO C. INFORMACIÓN DE COMPACTACIÓN DEL LOTE DEL ENSAYO EN EL CENTRO DE INVESTIGACIÓN ICA-SURBATÁ (DUITAMA) .....	107
ANEXO D. INFORMACIÓN DE NÚMERO DE UNIDADES DE CALOR (°Cd) PARA EL CICLO PRODUCTIVO (VEGETATIVO) DE LA REMOLACHA AZUCARERA DE VARIEDADES TEMPLADAS ESTABLECIDAS EN MINNESOTA, US. ADAPTADO DE HOLEN Y DEXTER, 1996; MEIER, 2001; Y KENTER <i>ET AL.</i> , 2006 .....	108
ANEXO E. MODELOS MATEMÁTICOS DE VARIABLES MORFOFISIOLÓGICAS, CALIDAD Y RENDIMIENTO DEL CULTIVO DE REMOLACHA AZUCARERA, RESPECTO AL TIEMPO TÉRMICO Y ENTRE VARIABLES .....	109
ANEXO F. CALIBRACIÓN DEL MÉTODO DE REFRACTOMETRÍA PARA LOS CONTENIDOS DE SACAROSA .....	112
ANEXO G. MODELO DE CRECIMIENTO SIMPLE PARA REMOLACHA AZUCARERA .....	113
ANEXO H. MODELO DE TIEMPO TÉRMICO EN STELLA PARA REMOLACHA AZUCARERA.....	115
ANEXO I. MODELO MATEMÁTICO ENTRE DESARROLLO Y RENDIMIENTO EN REMOLACHA AZUCARERA .....	120
ANEXO J. MODELO MATEMÁTICO DE CONTENIDO DE SACAROSA ENTRE EL PRIMER Y SEGUNDO ANILLO CAMBIAL SECUNDARIO EN REMOLACHA AZUCARERA.....	121
ANEXO K. MODELO MATEMÁTICO ENTRE EL ANCHO MÁXIMO DE LA HOJA DE REMOLACHA AZUCARERA Y SU LONGITUD DE LA VENA MEDIA.....	122
ANEXO L. MODELO MATEMÁTICO PARA EL RENDIMIENTO DE REMOLACHA AZUCARERA (TON/HA) RESPECTO A LAS UNIDADES DE CALOR (°Cd).....	123
ANEXO M. ANÁLISIS DE VARIABLES CON RESPECTO AL CRECIMIENTO, DESARROLLO Y RENDIMIENTO DE LAS VARIEDADES DE REMOLACHA AZUCARERA Y ANÁLISIS DE VARIANZA .....	124

## Resumen

El objetivo de esta investigación fue determinar y estudiar el efecto del tiempo térmico sobre el comportamiento de la remolacha azucarera (*Beta vulgaris* L. spp. *vulgaris*) variedades Hillesehög 0615 y 0505 en la región del valle del río Chicamocha (Boyacá). La investigación se desarrolló en cuatro partes: la determinación analítica de la temperatura base (*T<sub>b</sub>*), crecimiento, desarrollo y calidad del cultivo de remolacha azucarera en fase vegetativa de las variedades 0615 y 0505.

En la primera parte (componente de laboratorio), las plantas de remolacha se expusieron a temperaturas consecutivas decrecientes, en un fitotrón Biotronette modelo “845-2 Lab-Line” partiendo del valor de referencia de  $18\pm 0,5^{\circ}\text{C}$ , que es la temperatura indicada por la literatura para que la remolacha azucarera se exprese fisiológicamente de forma óptima (Kenter *et al.*, 2006). Se encontró el valor de  $1,8^{\circ}\text{C}$  para la *T<sub>b</sub>* a través del registro de Tasas Relativas de Crecimiento (TRC) para diferentes temperaturas (*i.d.* 1,6; 1,8; 2; 4; 5 y  $12\pm 0,3^{\circ}\text{C}$ ).

La determinación del crecimiento, desarrollo y calidad del cultivo (componente de campo) inició con la siembra de dos variedades de remolacha azucarera Hillesehög: la 0505 y la 0615. El experimento se ubicó en campo en las coordenadas  $5^{\circ}47'38,62''\text{N}$  y  $73^{\circ}4'28,95''\text{O}$ , en inmediaciones del Centro de Investigación ICA-Surbatá (Duitama). Se hicieron muestreos programados del experimento en los que se midieron variables relacionadas con el desarrollo, determinantes fisiológicos, crecimiento, calidad y rendimientos; los cuales se compararon con información existente sobre rendimiento y temperatura del cultivo para los municipios de Soracá (*i.d.*  $14,2^{\circ}\text{C}$  de temperatura promedio) y Toca (*i.d.*  $13^{\circ}\text{C}$  de temperatura promedio).

Adicionalmente, con datos de la investigación y literatura científica actual de remolacha azucarera, se desarrollaron dos modelos: un modelo de acumulación de unidades de calor con el Software *Structured Thinking Environment Learning Language with Animation* (STELLA), y un modelo simple para el crecimiento y la distribución del peso seco. El modelo de acumulación de unidades de calor permite estimar el desarrollo y la cosecha del cultivo de remolacha azucarera para las variedades Hillesehög 0615 y 0505.

## Abstract

The objective of this research was to determine the effect of thermal time in the behavior of the Hilleshög sugar beet (*Beta vulgaris* L. spp. *vulgaris*) varieties 0615 and 0505 in the region of Chicamocha river valley (Boyacá). The research was conducted in four parts: the analytical determination of the base temperature ( $T_b$ ), growth, development and quality of the sugar beet crop in the vegetative phase of the varieties 0615 and 0505.

In the first part (laboratory component) the beet plants were exposed to successively decreasing temperatures, in a phytotron Biotronette model “845-2 Lab-Line” starting from the reference value of  $18 \pm 0.5^\circ\text{C}$ , which is the temperature indicated by the literature for the sugar beet to express itself physiologically in an optimal way (Kenter *et al.*, 2006). We found the value of  $1.8^\circ\text{C}$  for the  $T_b$  through the registration of relative rates of growth [TRC] for different temperatures (i.e. 1.8, 2, 4, 5 and  $12 \pm 0.5^\circ\text{C}$ ).

The determination of the growth, development and quality of the crop (field component) began with the planting of two Hilleshög sugar beet varieties: the 0505 and 0615. The experiment was located at the coordinates  $5^\circ 47' 38.62''\text{N}$  and  $73^\circ 4' 28.95''\text{W}$ , in the vicinity of the research center ICA-Surbatá (Duitama). Programmed samplings of the experiment were carried out in which variables related to the development, physiological determinants, growth, quality and yields. These variables were compared with the existing information about the temperature and crop yield for the municipalities of Soracá (i.e.  $14.2^\circ\text{C}$  mean temperature) and Toca (i.e.  $13^\circ\text{C}$  mean temperature).

Additionally, with the data from the field stage and present scientific literature in sugar beet, two models were developed: One model of thermal time with the Structured Thinking Software Language Learning Environment with Animation [STELLA], and another simple model for the growth and dry weight partition. The model of thermal time allows estimating the development and the crop harvesting of the sugar beet for the Hilleshög varieties 0615 and 0505.

## Introducción

La remolacha azucarera (*Beta vulgaris* L. *spp. vulgaris*) es originaria del mediterráneo. Es una planta halófila de la familia *Chenopodiaceae*, cuya importancia agronómica se confina al órgano radical, debido a que en éste se encuentran altas concentraciones de sacarosa (Milford, 2006).

El cultivo de remolacha azucarera tiene importancia económica por la producción de azúcar blanco y la obtención de energía en forma de etanol ( $\text{CH}_3\text{-CH}_2\text{-OH}$ ) a partir de sus raíces (Bell *et al.*, 1996; Milford, 2006; Rosillo-Calle y Walter, 2006).

En la zona templada norte del mundo, en países como Francia, Alemania, Italia y Estados Unidos, la remolacha azucarera destinada a la producción de azúcar blanco es un cultivo tradicional, mientras que países como Sudán, India, República Dominicana y México apenas comienzan a cultivarlo (Rosillo-Calle y Walter, 2006).

Actualmente, la utilización de remolacha azucarera para la obtención de alcohol carburante es una opción económica atractiva, ya que el 60% de la producción mundial de etanol proviene de cultivos que producen azúcar (Rosillo-Calle y Walter, 2006).

En Colombia, la remolacha azucarera es un cultivo de reciente introducción y tiene una potencial importancia económica por su uso como materia prima en la obtención de etanol (Rosillo-Calle y Walter, 2006). El cultivo se encuentra establecido en la Guajira, Antioquia, norte del Valle del Cauca y Boyacá; en este último departamento se presentan altos rendimientos y se adelantan investigaciones para la selección de semillas; como producto de ello se encuentran materiales promisorios para esta zona, dentro de los que sobresalen las variedades Hilleshög 0615 y 0505 por sus rendimientos.

El estudio del cultivo en condiciones ecofisiológicas colombianas data de la última década, y en el país se reportan rendimientos de 80 a 90 toneladas por hectárea. Estos valores están por debajo de los rendimientos esperados de 100 toneladas por hectárea, y es necesario comprender la fisiología del cultivo para optimizar su rendimiento y exponerlo a la condición ambiental más apropiada (Milford, 2006).

Para optimizar el rendimiento del cultivo de remolacha azucarera en las condiciones ecofisiológicas de Colombia, es necesario preliminarmente establecer las relaciones existentes entre rendimiento, calidad y características morfo-fisiológicas con respecto a la acumulación de unidades de calor ( $^{\circ}\text{Cd}$ ).

Bajo las condiciones ecofisiológicas que brinda la planicie aluvial de clima frío-seco ubicada en la región del valle del río Chicamocha (Boyacá) en donde se encuentra Duitama, el cultivo de remolacha azucarera podría alcanzar los rendimientos techo, y cabría considerar su oportunidad como alternativa de producción para la región.

El objetivo de esta investigación fue determinar y estudiar el efecto del tiempo térmico sobre el comportamiento de la remolacha azucarera (Hilleshög 0615 y 0505), en la región del valle del río Chicamocha (Boyacá), y establecer una temperatura base ( $T_b$ ) para la remolacha azucarera.

Para determinar si el régimen térmico de Duitama es favorable para establecer el cultivo de remolacha azucarera, se realizó un experimento en condiciones de campo en el ICA Surbatá (Duitama) que, apoyado con información previa de otras localidades de Boyacá contribuyó a la elaboración del modelo de acumulación de unidades de calor; trabajando en condiciones controladas en fitotrón para hallar la temperatura base.

Para representar el desarrollo del cultivo en diferentes condiciones ecofisiológicas se elaboró un modelo de tiempo térmico para la remolacha azucarera en lenguaje STELLA, a partir de la información recolectada en campo y de literatura científica actual; este modelo posibilita diversas simulaciones del desarrollo del cultivo, de acuerdo a variaciones ecofisiológicas pre-definidas, e involucra como factor principal la temperatura sin limitantes de nutrición, plagas y enfermedades. El modelo aborda tanto el desarrollo como el rendimiento del cultivo de remolacha azucarera para las variedades Hilleshög 0615 y 0505. También se elaboró un modelo simple para el crecimiento y los coeficientes de distribución del peso seco, que fue utilizado para comparar las variedades en el análisis de crecimiento.

## Marco Teórico

La remolacha azucarera (*Beta vulgaris* L. *spp. vulgaris*) es originaria del mediterráneo, y se deriva de la remolacha silvestre (*Beta vulgaris* L. *spp. marítima*), una planta de uso alimenticio y con las hojas más desarrolladas que la raíz, de acuerdo a escritos de la antigüedad griega (Getz, 2000; Milford, 2006).

Es una planta halófito de la familia *Chenopodiaceae*. Su primera descripción la hizo el científico naturalista y filósofo griego Teofrasto (372-286 a.c.) en su “*Historia Plantarum*” en donde describió otras 500 especies; mientras que Andreas Sigismund Marggraf (1709-1782) hizo la recopilación histórica de la remolacha y demostró que del 3 al 4% del azúcar extraído era completamente idéntico al obtenido de la caña de azúcar (Getz, 2000).

Franz Carl Achard (1753-1821) domesticó la remolacha azucarera enfocándose en el cultivo del órgano radical, incrementando su rendimiento hasta un 8% y fundó la primera planta de extracción de azúcar de remolacha en el mundo cerca de Cunern (baja Silesia, hoy Polonia) en 1801. A partir de ese momento, a través del mejoramiento clásico y la implementación de métodos eficientes de cultivo se han alcanzado variedades de aproximadamente 15-20% de sacarosa respecto al peso fresco radical (Getz, 2000).

Actualmente, gran parte del cultivo de remolacha azucarera se destina a la producción de etanol debido al alto contenido de azúcar en la raíz. En la tabla 1 se comparan los cultivos agrícolas destinados a la producción de etanol.

**Tabla 1. Comparación de cultivos agrícolas destinados a la producción de etanol. Adaptado de Smith, *et al.*, 2005 y Rosillo-Calle y Walter, 2006.**

<b>Cultivo/Metabolismo</b>	<b>Ventajas</b>	<b>Desventajas</b>
<b>Caña de Azúcar</b> Planta C4	Alta productividad o potencial, flexibilidad del sistema agroindustrial y versatilidad para desplazarse entre productos en función de precios.	Oferta inestable de etanol, con ciclo productivo costoso, ecología exigente, alto impacto ambiental y elevado consumo de agua (Smith <i>et al.</i> , 2005).
<b>Maíz</b> Planta C4	Alta productividad y favorable por el manejo del	Alta demanda para otros

	cultivo.	productos como dulcificantes y presenta competencia potencial con usos alimenticios.
<b>Remolacha Azucarera</b> Planta C3	Altas productividades, comparativamente bajos costos, ciclo productivo relativamente corto y empleo potencial de tierras marginales por la adaptabilidad del cultivo (v.gr. <i>suelos salinos o alcalinos</i> ).	Demanda grandes áreas agrícolas debido a que suele emplearse en rotación.
<b>Sorgo dulce</b> Planta C4	El cultivo produce tres cosechas al año, puede intercalarse con caña de azúcar, los residuos pueden aprovecharse como fuente energética y posee menor contenido de lignocelulosa.	Problemas de fermentación, el procesamiento requiere de un estudio energético, hay poca experiencia de su sistema productivo a gran escala y presenta competencia potencial con usos alimenticios.
<b>Yuca</b> Planta Intermedia	Altas productividades, y empleo potencial en tierras marginales por la adaptabilidad del cultivo.	El procesamiento requiere de alto aporte energético ya que el tubérculo debe hidrolizarse a azúcares fermentables, falta experiencia para cultivos comerciales y presenta competencia potencial con su uso alimenticio.

En Colombia, la remolacha azucarera es un cultivo de reciente introducción y tiene importancia económica por su uso como materia prima en la obtención de alcohol carburante (Rosillo-Calle y Walter, 2006). El cultivo se encuentra establecido en la Guajira, Antioquia, norte del Valle del Cauca y Boyacá; en este último departamento se presentan altos rendimientos y se adelantan investigaciones para la selección de semillas.

La remolacha azucarera es un cultivo anual en sus etapas de desarrollo, pero semestral en su más alta reserva de sacarosa, la cual se alcanza durante la fase vegetativa; puede adaptarse a gran diversidad de zonas climáticas, posee un mecanismo fotosintético C3, y de acuerdo a lo reportado por la literatura cumple su ciclo productivo entre los 110 y los 210 días después de la siembra (Barbanti *et al.*, 2007; Bell *et al.*, 1996; Getz, 2000; Holen y Dexter 1996; Kenter *et al.*, 2006), este rango de cien días no es conveniente por su escasa precisión, y revela la necesidad de criterios fisiológicos para establecer el momento de la cosecha. Su tasa de producción de biomasa diaria hacia el final del ciclo del cultivo se ha estimado en alrededor de  $800 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{día}^{-1}$ ; presenta un índice de área foliar óptimo ( $\text{IAF}_{\text{óptimo}}$ ) de 3 a 4, un índice de área foliar máximo ( $\text{IAF}_{\text{máximo}}$ ) de 6,4 y un uso eficiente de la luz entre  $0,90 \text{ g}\cdot\text{MJ}^{-1}$  y  $1,76 \text{ g}\cdot\text{MJ}^{-1}$  (Richter *et al.*, 2001); es un cultivo catalogado como “inhibidor de malezas” cuyo principal atributo radica en que presenta una temprana emisión de cobertura aérea (Kropff *et al.*, 1997).

Teniendo en cuenta la participación directa de la temperatura sobre el desarrollo (Baker y Reddy, 2001; Holen y Dexter 1996), esta investigación usó la acumulación de unidades de calor para caracterizar el cultivo fisiológicamente.

La remolacha azucarera se cataloga como una planta ahorradora de energía, debido a que busca agua explorando el perfil del suelo hasta que la localice, bajo condiciones favorables su raíz puede profundizar de 1 a 1,5 m (Milford, 2006); es muy eficiente ya que se caracteriza por tener raíces delgadas de exploración con una anatomía en la zona de penetración muy pequeña; adicionalmente, maneja su ortosticidad para responder a daños mecánicos; por estas razones se considera que el cultivo presenta una anatomía y fisiología que le permiten tolerar condiciones ambientales desfavorables, como el estrés hídrico (Monreal *et al.*, 2007; Taiz y Zeiger 2006).

La planta presenta una fase reproductiva en la que utiliza la energía que –durante la fase vegetativa previa– ha sido almacenada como sacarosa en las células de parénquima radicales para la formación de órganos reproductivos, como flores hermafroditas, aunque es una planta normalmente alógama que posteriormente produce semillas perispérmicas (Getz, 2000). La etapas de desarrollo de la fase reproductiva se encuentran fuera del marco

de referencia de esta investigación, debido a que el rendimiento económico se confina a la fase vegetativa (Hermann *et al.*, 2007).

### ***Ecofisiología***

Los rendimientos y la calidad de la remolacha azucarera se pueden medir a través de la relación del peso radical del cultivo por unidad de área (*i.d.* toneladas de raíces de remolacha por hectárea) y el contenido de sacarosa o concentración de grados *brix*. Su análisis debe abarcar diferentes factores ambientales tales como la humedad relativa, el fotoperiodo, el viento, la concentración de CO<sub>2</sub>, las plagas, la precipitación, el riego, la nutrición, la radiación solar y la acumulación de unidades de calor, los cuales determinan la productividad del cultivo (Barbanti *et al.*, 2007; Bruzon, 2007; Demmers-Derks *et al.*, 1998; Holen y Dexter 1996; Kenter *et al.*, 2006; Mäck y Hoffmann, 2006; Richter *et al.*, 2001).

Para cada una de las variables ambientales que interactúan se conoce su efecto sobre los cultivos agrícolas; la precipitación, además de estar involucrada en la hidratación de la planta, tiene un compromiso con la apertura estomática, el intercambio gaseoso y la nutrición; por otro lado la temperatura está asociada con el desarrollo y la tasa de crecimiento del cultivo (Bruzon 2007; Holen y Dexter 1996; Tei *et al.*, 1996).

La remolacha se adapta bien a diferentes tipos de ambientes. Sin embargo, es conveniente definir criterios de selección de zonas para su establecimiento con base en la radiación, la acumulación de unidades de calor, la calidad de suelos y la precipitación, con el objeto de ajustar el cultivo a la oferta ambiental (*i.d.* un ambiente que coincida con la demanda del genotipo y permita que fisiológicamente se exprese de forma óptima).

La oferta ambiental para un cultivo de amplia adaptación como la remolacha azucarera es diversa y de gran riqueza en Colombia. El país presenta varias regiones que ofrecen condiciones ambientales generales que coinciden con la demanda mínima del genotipo, referido a una radiación aproximada de más de 800  $\mu\text{mol}$  de fotones. $\text{m}^{-2}.\text{s}^{-1}$ , humedad relativa superior al 30% y una lámina de riego de 600 mm ciclo<sup>-1</sup>; según la literatura son

condiciones ambientales con las que la remolacha azucarera puede expresarse fisiológicamente de forma óptima (Beckers, 2007).

El principal factor ambiental asociado con el desarrollo es la temperatura, que es un determinante para el alcance de las diferentes etapas de desarrollo. En la zona templada, la temperatura media óptima reportada para el crecimiento y desarrollo es de 18°C (Werker *et al.*, 1999).

La  $T_b$ , que es la temperatura mínima requerida para que un cultivo pueda desarrollarse, o el nivel de temperatura bajo el cual el crecimiento y desarrollo del cultivo se detiene o ralentiza, se puede usar como valor mínimo de referencia de la demanda vegetal para el establecimiento del cultivo, aunque es dependiente de la variedad de remolacha azucarera (Baker y Reddy, 2001; Holen y Dexter, 1996; Yang *et al.*, 1995). Es así como para *Beta vulgaris* la literatura reporta diferentes valores de  $T_b$  de acuerdo a la variedad, tales como 1,1°C para Beta 1745, 5,6°C para Conditiva y de 3°C para variedades alemanas y las empleadas en el reino unido (Holen y Dexter, 1996; Kenter *et al.*, 2006; Milford, 2006; Tei *et al.*, 1996).

Según Barbanti *et al.* (2007) la sequía puede ser limitante tanto para el crecimiento como para el rendimiento de la remolacha azucarera, dado que el cultivo bien hidratado produce alrededor del 20% de biomasa adicional con respecto a una condición de estrés hídrico extremo; aunque la literatura no relaciona el estatus hídrico con el contenido de azúcares en la raíz, es necesario suministrar el requerimiento de riego de 600 mm ciclo<sup>-1</sup> para un óptimo rendimiento.

Los requerimientos nutricionales de elementos mayores para la producción techo de 100 toneladas de remolacha por hectárea son de 120 kg N ha<sup>-1</sup>, 150 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> ha<sup>-1</sup> y 60 kg K<sub>2</sub>O ha<sup>-1</sup>. El nitrógeno es el elemento más crítico de manejar porque aumenta la biomasa y a la vez reduce la calidad de la cosecha por acumulación de sustancias melasigénicas como nitratos, betaína y aminoácidos en la raíz, residuos no deseables en la producción de etanol (Bell *et al.*, 1996; Mäck *et al.*, 2007; Milford, 2006). Otro argumento a considerar en el balance del nitrógeno es que un abundante suministro puede conducir a un mayor tamaño

radical; sin embargo, esto está inversamente correlacionado con la concentración de azúcar, que es uno de los criterios de calidad del cultivo (Bell *et al.*, 1996; Milford, 2006).

Los transportadores de sacarosa son esenciales para la carga del floema (Getz, 2000). El cultivo puede incrementar su eficiencia en el uso del agua cuando se somete a estrés tardío, respecto al aplicado en etapas tempranas; esto puede explicarse por la existencia de vías alternas de síntesis de transportadores de manitol (*v.gr. BvMAT*), un azúcar no reductor que la remolacha azucarera transporta facultativamente en periodos de estrés (Ramsperger-Gleixner *et al.*, 2004). En estos casos, en el floema y las células acompañantes presentan genes que codifican para transportadores simporte tanto de sacarosa como de manitol, ya que los genes para el simporte protón-sacarosa se expresan en plantas de remolacha azucarera aún bajo condiciones normales.

El gen *BvMAT* de remolacha azucarera tiene parecido con el de la planta de apio *AgMAT* que codifica para transportadores simporte de manitol, y aunque se conoce que en condiciones normales del cultivo de remolacha azucarera no hay transporte de polioles, la presencia de estos genes sugiere que en algún momento se expresaron para sobrevivir a ciertas dinámicas ambientales, o que tienen un papel facultativo que aguarda por la aparición de algún cambio ambiental para expresarse, tal como un estrés (Ramsperger-Gleixner *et al.*, 2004).

### ***Morfoanatomía de la Remolacha Azucarera***

La remolacha azucarera tiene semillas no endospermicas con perispermo, las cuales presentan una relación anatómica largo:ancho de 3:1,5 mm (Hermann *et al.*, 2007). El escaso endospermo presente tiene un grosor de dos capas de células y no constituye tejido de reserva fundamental para la semilla; el endospermo está encerrado por dos capas de testa, la interna presenta un color claro y cierta dureza, mientras que la externa tiene una apariencia de costra y se cae con facilidad; el perispermo es parte del tejido materno, se encuentra anatómicamente localizado en el centro de la semilla, como tejido de reserva. El proceso de germinación ocurre cuando la radícula del embrión protrude las capas de testa.

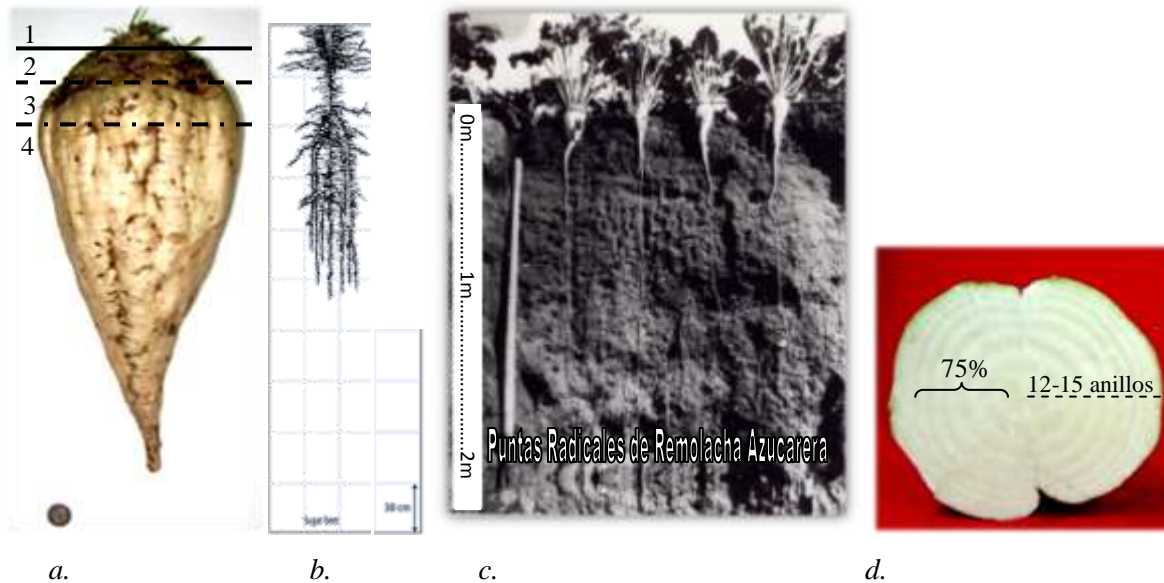
El pericarpio es una barrera que regula la germinación, ya que impide la entrada de oxígeno inhibiendo la acción del ácido 1-aminociclopropano 1-carboxílico (ACC) oxidasa, enzima responsable de la síntesis de etileno ( $C_2H_2$ ), que es la hormona promotora de la germinación en remolacha azucarera (Hermann *et al.*, 2007). Además, el pericarpio favorece la toma pasiva del precursor del etileno ACC, y permite la extrusión activa de ácido abscísico (ABA) desde el interior de la semilla, razones por las que se piensa que la germinación en remolacha azucarera, además de presentar un control hormonal, implica un control físico igualmente relevante. Cuando la semilla se encuentra encerrada por el pericarpio conforma el fruto dehiscente en aquenio (Hermann *et al.*, 2007).

La plántula no posee un tallo como eje central; las hojas están soportadas por pecíolos que a su vez están insertados en la corona de la raíz (*figura 1*), que mantiene durante su crecimiento y etapas de desarrollo de la fase vegetativa. Algunos autores sugieren una distribución del dosel de dos estratos compuestos de estructuras jóvenes y maduras, aunque en la práctica se puede dividir en tercios<sup>1</sup> lo que aporta mayor información (Hoffmann y Märlander 2005; Mäck y Hoffmann, 2006), la parte radical equivale a la remolacha subterránea común y es el órgano acumulador de sacarosa al que se le atribuye el rendimiento económico del cultivo; una raíz tuberosa puede pesar entre seiscientos gramos y cinco kilogramos y contiene alrededor de 15% a 20% de azúcar común o sacarosa (Bruzon, 2007; Getz 2000; Henke *et al.*, 2006; Holen y Dexter, 1996; Mäck y Hoffmann 2006; Mäck *et al.*, 2007; Milford, 2006).

El órgano vegetativo cosechable puede dividirse en cuatro partes (Mahn *et al.*, 2002), a saber: una zona en forma de cono o corona (*Figura 1a.4*), una zona que corresponde al hipocótilo (*Figura 1a.3*), una pequeña zona comprimida de tallo con pecíolos senescentes (*Figura 1a.2*) y la pequeña zona superior que contiene los pecíolos vivos que soportan la parte aérea de la planta (*Figura 1a.1*).

---

<sup>1</sup> El dosel de la remolacha azucarera es tipo 1, el cual es muy eficiente aunque en la práctica se pueden colocar menos plantas por unidad de superficie. Se reporta buena intercepción de la radiación por parte del tercio medio, el cual es el principal encargado de la exportación hacia las raíces.



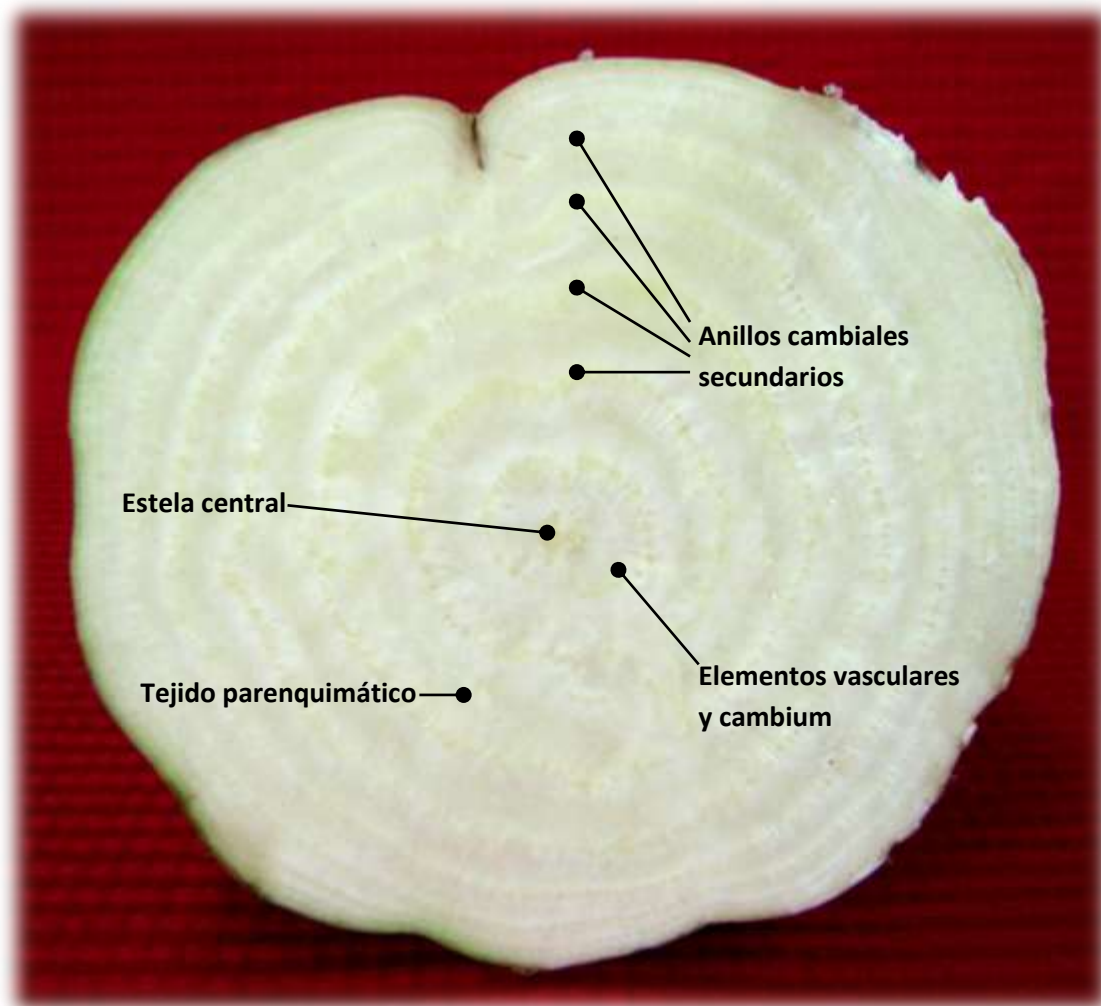
*Figura 1. Morfoanatomía y profundidad de la raíz de remolacha azucarera: (a) definición de secciones de la remolacha, (b y c) esquema y foto de la exploración radical de remolacha (1,5 y 2 m), y (d) esquema de corte transversal de la raíz de remolacha en el punto de diámetro máximo. Adaptado de Bell et al. (1996), Mahn et al. (2002), y Taiz y Zeiger (2006).*

Las plantas se pueden clasificar por el manejo del agua en dos tipos: (i) las especies gastadoras o consumidoras de energía y (ii) las especies ahorradoras de energía. La densidad y distribución de las raíces, de las especies gastadoras o consumidoras de energía, está confinada a los primeros 40 cm del perfil del suelo. Por su parte las especies ahorradoras de energía, exploran con sus raíces por el agua hasta un punto más profundo del perfil; estas plantas son muy eficientes ya que se caracterizan por tener raíces delgadas de exploración con una anatomía de la zona de penetración muy pequeña (*Figura 1*).

La remolacha azucarera presenta una mezcla de los dos tipos mencionados anteriormente, una parte del sistema es consumidor con una alta densidad y distribución en la parte superficial, y además hay desarrollo de un sistema ahorrador (*Figura 1.b y c*); las raíces ahorradoras censan y exploran en un rango fisiológico hasta donde encuentren agua, tal como ocurre en plantas de desierto antes de presentarse el estrés hídrico.

El corte transversal de la raíz muestra un número de anillos de conducción formados por series de cambium concéntrico; esa producción de anillos de cambium es la responsable del engrosamiento de la raíz (*Figura 2*); aunque se presentan anillos de cambium secundario

hacia la periferia de los anillos mencionados (para un total de 12 a 15 anillos cambiales), no son significativos para el crecimiento del órgano vegetativo cosechable (Milford, 2006). Los seis primeros anillos conforman el 75% del grosor último de la remolacha (*Figura 1d*), la acumulación de sacarosa se produce en los espacios interanulares del tejido de parénquima (Getz, 2000; Milford, 2006).



*Figura 2. Vista transversal de la raíz de remolacha azucarera*

El sexto y el séptimo anillo cambial se desarrollan simultáneamente, por la producción continua de nuevas células que rodean los tejidos vasculares adyacentes con zonas de células pequeñas de parénquima (*Figura 2*). A medida que se producen más células, las maduras se expanden, y las zonas de células del cambium vascular comienzan a ser

separadas por una amplia zona central de células grandes de parénquima (Getz 2000; Milford, 2006).

Las concentraciones de azúcar han presentado correlación inversa con el nitrógeno y el tamaño radical; por lo que salirse del momento oportuno de cosecha puede disminuir la calidad de la cosecha. De otro lado, las concentraciones de azúcar presentan una relación directamente proporcional con la densidad o número de anillos cambiales de la raíz, que es una relación entre el desarrollo de raíz con la calidad (Milford, 2006).

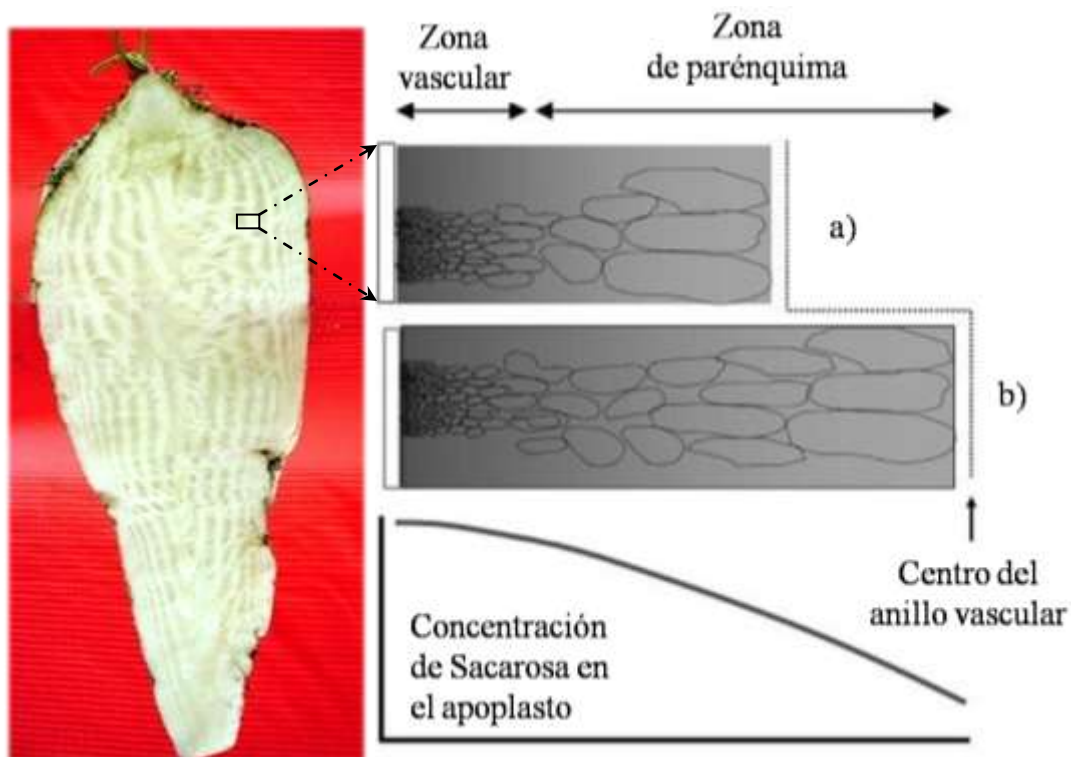


Figura 3. Diagrama del gradiente de acumulación de sacarosa. a) alta concentración de azúcar. b) alto rendimiento. Adaptado de Bell et al. (1996) y Milford, (2006).

Milford (2006) al citar los trabajos de Ulrich, menciona que la concentración de azúcar se incrementa por la presencia de factores que generalmente restringen o disminuyen el crecimiento, tales como deficiencias de nitrógeno y bajas temperaturas nocturnas (*i.d. baja respiración*). Sin embargo, es relevante notar que la concentración de azúcar en la raíz es directamente proporcional al volumen medio de las células del tejido de almacenamiento hasta un rango fisiológico, a partir del cual menos azúcar es acumulado por unidad de volumen celular y el aumento del volumen y tamaño se comienza a relacionar con el aumento del grosor de la pared celular (Milford, 2006).

La sacarosa es almacenada en las vacuolas de las células parenquimáticas sin ser hidrolizada en glucosa y fructosa antes del transporte a través de sus membranas. La toma de sacarosa por las células es directamente proporcional a la concentración externa celular (Milford, 2006); a medida que se agrandan las células de parénquima, progresivamente las vacuolas demandan la toma de más sacarosa para compensar el incremento del volumen vacuolar; sin embargo, las células presentan menor concentración relativa (*Figura 3*).

La remolacha azucarera presenta un dosel erectófilo, lo que trae ventajas en el rendimiento de los cultivos, ya que las tasas de crecimiento de cultivo (TCC) de los doseles tipo erectófilos pueden ser hasta 19-108% mayores que las de los doseles tipo planófilos (Gardner *et al.*, 1985; Milford, 2006).

La morfología de la parte aérea de la remolacha azucarera incluye estructuralmente las hojas y los pecíolos (Li *et al.*, 1992; Mäck *et al.*, 2007).



*Figura 4. Hojas y pecíolos de una planta de remolacha azucarera a los 3300°Cd (grados día). Abajo las hojas y pecíolos 1-22, y arriba las hojas 23-44.*

Existe un incremento progresivo de tamaño en hojas y pecíolos a partir de las hojas jóvenes, aunque hay un punto en el cual las hojas maduras son más pequeñas a las que les preceden (*Figura 4*). El incremento progresivo en el tamaño de las hojas más jóvenes se debe a un aumento del número de células en cada hoja, lo que va acompañado de la disminución progresiva del tamaño promedio celular (Bell *et al.*, 1996; Milford, 2006).

Según Bell *et al.* (1996), el tamaño de la parte aérea y el índice de área foliar (IAF) son máximos cuando la hoja más grande completa su expansión; cuya posición relativa en el dosel y tamaño, está afectada por factores ambientales, nutricionales y agronómicos.

Las hojas de remolacha azucarera aparecen con un ángulo de inserción aproximado de 138,5° respecto a la hoja que le precede, organizándose en una disposición filotáctica 5:13 (*Figura 5*). Durante la fase vegetativa, el cultivo puede mantener un promedio aproximado de 44 hojas con una dinámica continua de senescencia y emisión de hojas (Bell *et al.*, 1996; Bruzon, 2007; Milford, 2006).

La parte aérea se puede dividir en tercios (*Figura 5*): el tercio inferior o las hojas maduras pueden reciclar sus asimilados hacia las hojas jóvenes; el tercio superior dirige el suministro de asimilados para el crecimiento de la parte aérea como hojas y pecíolos de otros tercios; mientras que el tercio medio contribuye al llenado de la raíz (Getz, 2000).

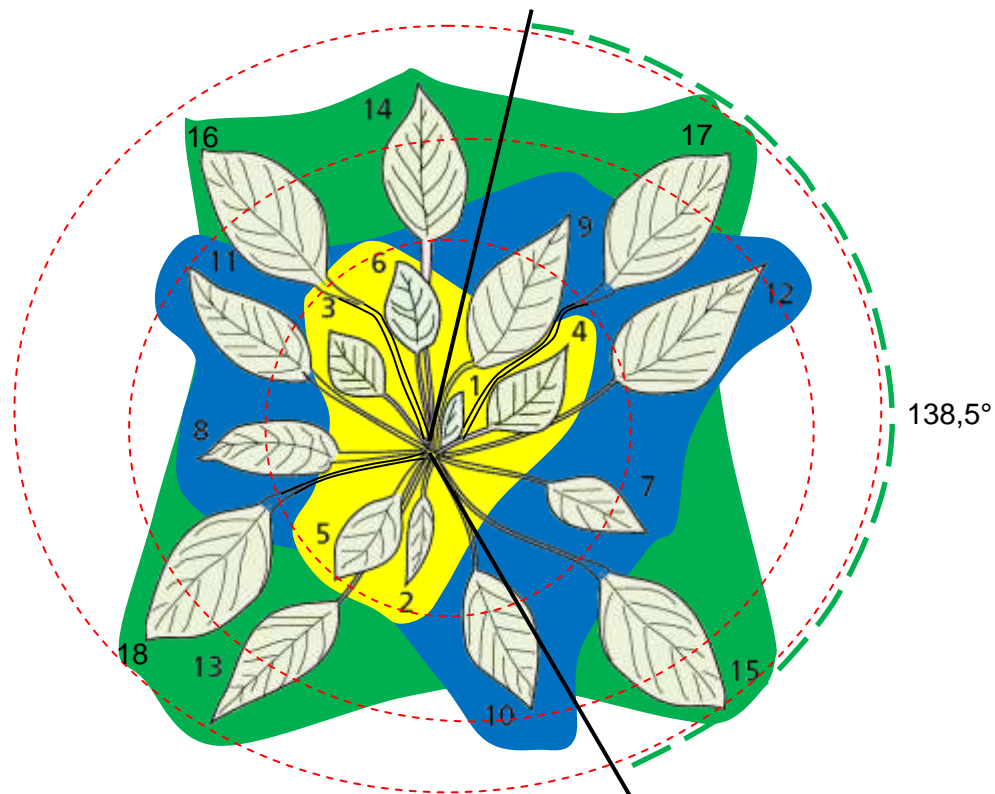


Figura 5. Dosel de remolacha azucarera: Esquema de hojas de tercio inferior (hojas con fondo verde), hojas del tercio medio (hojas con fondo azul) y hojas del tercio superior (hojas con fondo amarillo). Adaptado de Taiz y Zeiger (2006).

En la literatura disponible sobre remolacha azucarera, con frecuencia se enfatiza en la medición de diferentes variables sobre las hojas 7 y 8 en especial en etapas juveniles del cultivo, ya que además de ser hojas totalmente maduras, completamente expandidas que han alcanzado su tamaño máximo y están lo suficientemente distantes de la senescencia, son “basípetamente” las primeras hojas que componen el tercio medio de la remolacha azucarera, con alta probabilidad de lograr la mayor intercepción de luz (Li *et al.*, 1992).

La expansión del índice de área foliar se estima que ocurre en el rango de 0,5 a 1 unidad cada 100°Cd (*i.d.* grados día) de tiempo térmico en cultivos comerciales de remolacha azucarera, a la vez que cada nueva hoja aparece cada 30°Cd de tiempo térmico, siempre que el cultivo se exponga a temperaturas mayores a 3°C ( $T_b$ ), tasa que no es afectada significativamente por el suministro de agua o nutrientes. Lo anterior conduce a dos argumentos, el primero, que el desarrollo está fuertemente influenciado por la temperatura,

y el segundo, que la diferencia en tasas de crecimiento y tamaño final del dosel, se debe a las tasas de crecimiento y tamaño final de las hojas individuales, y no a diferencias en el desarrollo o número de hojas (Milford, 2006).

### ***Desarrollo de la Remolacha Azucarera***

El desarrollo de las especies vegetales tiene un patrón referente en la escala estandarizada *Biologische Bundesanstalt Bundessortenamt and Chemische Industrie*<sup>2</sup>, BBCH por sus siglas en alemán, que define las diferentes etapas de avance de los cultivos. Principalmente a través del registro de morfoanatomía de los órganos vegetativos se puede percibir el avance del cultivo; sus diferentes etapas de desarrollo se muestran en la escala relacional BBCH para la fase vegetativa (*Tabla 2*), esta clave descriptiva se distingue por hacer un seguimiento a la aparición secuencial de órganos así: 0, germinación; 1, desarrollo de hojas; 3, cobertura del cultivo; 4, desarrollo del órgano vegetativo cosechable; 5, aparición del órgano floral; 6, floración; 7, formación del fruto; 8, maduración de frutos y semillas; y 9, senescencia (Barbanti *et al.*, 2007; Meier, 2001); una etapa que no experimenta esta planta es la formación de brotes laterales o BBCH 2 (*Tabla 2, Figura 6*).

Esa aparición de órganos es fundamental para establecer las etapas de desarrollo del cultivo; en remolacha azucarera, es relevante enfatizar sobre las etapas relacionadas con la fase vegetativa, debido a que la principal acumulación de azúcares se presenta al final de esta etapa (Ozolina *et al* 2005).

*Tabla 2. Escala BBCH para la fase vegetativa de la remolacha azucarera. Tomada de Meier (2001).*

<b>Código</b>	<b>Descripción</b>
<b>Etapa principal 0.</b>	<b>Germinación</b>
<b>00</b>	Semilla seca
<b>01</b>	Comienzo de la imbibición; las semillas
<b>03</b>	Comienzan a absorber agua

<sup>2</sup> Escala del Centro Federal de Investigaciones Biológicas para Agricultura y silvicultura de Alemania.

05	Imbibición de la semilla terminada; el glomérulo Empieza a cuartearse
07	La radícula emerge (raíz embrional) de la semilla (glomérulo)
09	Brote fuera de la semilla (glomérulo) Emergencia: el brote traspasa la superficie del suelo
<hr/>	
<b>Etapa principal 1.</b>	<b>Desarrollo de las hojas (etapa juvenil)</b>
10	Etapa cotiledonar: cotiledones desplegados horizontalmente; 1ª hoja, visible, (tamaño cabeza de alfiler).
11	1 <sup>er</sup> par de hojas, visible, sin desplegar todavía; (tamaño de arvejas/guisantes)
12	2 hojas (1 <sup>er</sup> par de hojas), desplegadas
14	4 hojas (2 <sup>o</sup> par de hojas), desplegadas
15	5 hojas, desplegadas
1.	Los estadios continúan hasta
19	9 o más hojas desplegadas
<hr/>	
<b>Etapa principal 3.</b>	<b>Desarrollo de la roseta (cobertura del cultivo)</b>
	Comienza la cobertura del cultivo: 10 % de las plantas se tocan entre las hileras
31	
32	20 % de las plantas se tocan entre las hileras
33	30 % de las plantas se tocan entre las hileras
34	40 % de las plantas se tocan entre las hileras
35	50 % de las plantas se tocan entre las hileras
36	60 % de las plantas se tocan entre las hileras
37	70 % de las plantas se tocan entre las hileras
38	80 % de las plantas se tocan entre las hileras
	Cobertura del cultivo finalizada: cerca del 90 % de las plantas se tocan entre las hileras
39	
<hr/>	
<b>Etapa principal 4.</b>	<b>Desarrollo de las partes vegetativas cosechables</b>
49	La raíz ha alcanzado el tamaño de cosecha
<hr/>	

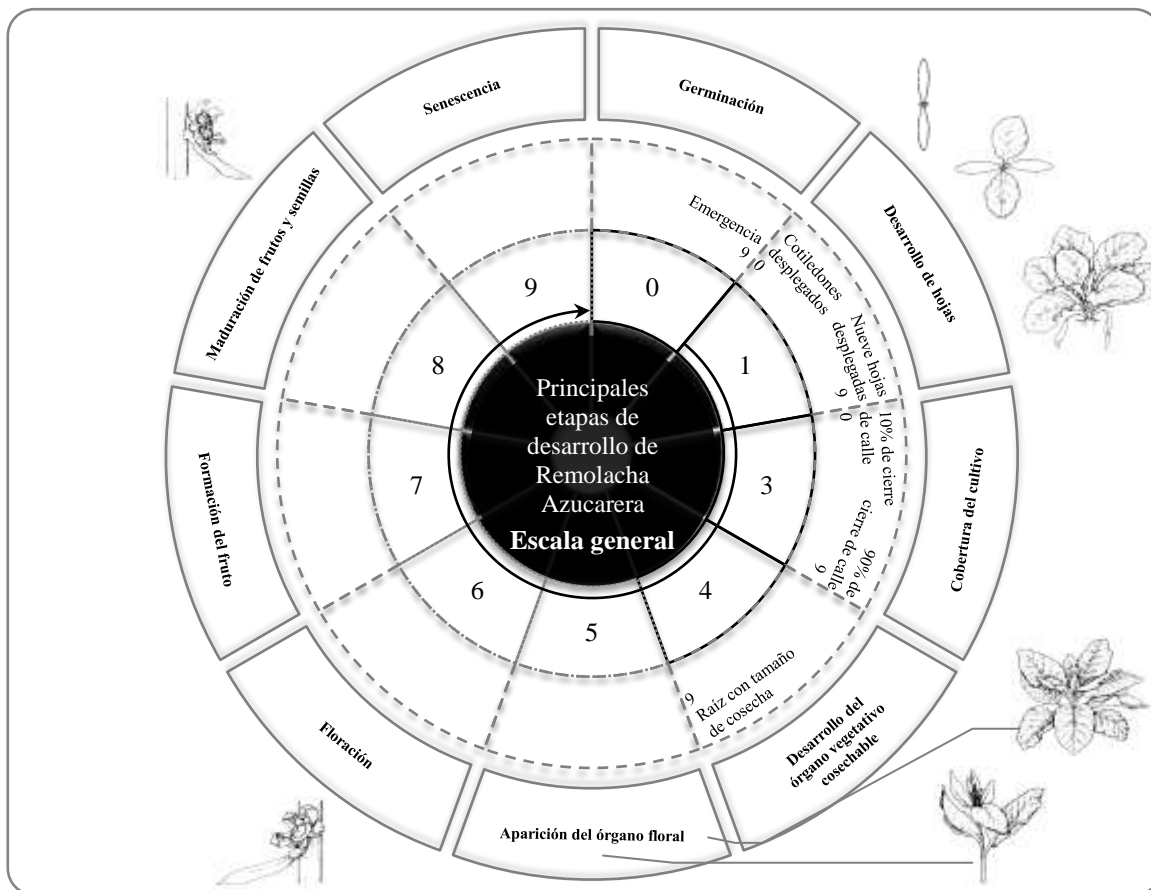


Figura 6. Etapas de desarrollo de remolacha azucarera de acuerdo a la escala general BBCH. Adaptado de Meier, 2001.

### Tiempo térmico y Temperatura Base ( $T_b$ )

Una forma de medir el desarrollo de los cultivos es a través de la temperatura, específicamente cuantificando la temperatura disponible para el cultivo a través de modelos de tiempo térmico, también conocidos como metodología de grados día ( $^{\circ}\text{Cd}$ ), acumulación de unidades de calor o edad fisiológica; que con base en temperaturas máximas y mínimas diarias da un índice del calor utilizable diario, cuyo acumulado de valores permite el desarrollo de sucesivas etapas fisiológicas del cultivo (Holen y Dexter, 1996; Milford, 2006).

Los valores de tiempo térmico, expresados en grados día ( $^{\circ}\text{Cd}$ ), o también llamados unidades de calor acumuladas diarias se calculan por medio de la siguiente ecuación:

*Ecuación 1.*

$$TT = \sum \frac{T_{m\acute{a}xima} - T_{m\acute{i}nima}}{2} - T_b \quad (^{\circ}\text{C})$$

$T_{m\acute{a}xima}$  y  $T_{m\acute{i}nima}$  corresponden a la temperatura máxima y mínima diarias que experimenta el cultivo durante el periodo diurno y nocturno, partiendo de la temperatura de medianoche hasta la de la siguiente medianoche, medida por lo regular en grados Celsius, y  $T_b$  es la temperatura base, que es la temperatura mínima para que un cultivo pueda desarrollarse, o el nivel de temperatura bajo el cual se detiene o ralentiza el crecimiento y el desarrollo del cultivo (Baker y Reddy 2001; Holen y Dexter 1996; Yang *et al.*, 1995).

Este modelo es usado comúnmente para la predicción de etapas de desarrollo, rendimientos individuales o de cultivo, y fecha de cosecha; también se han trabajado modelos de edad fisiológica de cultivos en los que se ha utilizado el clima, o la combinación de temperaturas con otros factores tales como la radiación, la densidad de siembra, el genotipo y el tipo de suelo (Everaarts, 1999; Holen y Dexter, 1996).

La metodología de tiempo térmico se emplea para predecir fases de crecimiento con alta precisión, y ha sido implementada por investigadores, agrónomos y productores para predecir la tasa de desarrollo de plantas de cultivo y su crecimiento. Esta información es usada en programación de cosechas, y para apoyar la toma de decisiones de manejo tales como el tiempo de riego y la aplicación de productos plaguicidas (Baker y Reddy, 2001; Holen y Dexter, 1996).

Los principales insumos del modelo corresponden a información climática de temperaturas diarias, que equivale a la temperatura a la cual se exponen las plantas en campo y el seguimiento de la morfología del cultivo correctamente representado (Holen y Dexter, 1996).

La calidad y las cualidades explicativas del modelo dependerán de la calidad de los insumos, por ejemplo, al presentarse imprecisiones entre las temperaturas registradas por la estación climática que se referencia y aquellas de la ubicación real del cultivo –sea por relieve o por la elevación diferencial en metros sobre el nivel del mar–, se afectará directamente la estimación adecuada del tiempo térmico (Holen y Dexter, 1996).

En remolacha la literatura reporta diferentes valores de  $T_b$  de acuerdo a la variedad (1,1°C; 3°C y 5,6°C). Sin embargo, también se plantea la existencia de  $T_b$  por fases del cultivo, etapas de desarrollo y aún más específico a nivel de aire y de suelo<sup>3</sup>, lo cual amplía la complejidad en los criterios para determinarla de forma conveniente (Holen y Dexter 1996; Kenter *et al.*, 2006; Tei *et al.*, 1996).

La determinación de la temperatura base para modelos de tiempo térmico desde un enfoque matemático presenta varios métodos, entre los que se encuentra: la mínima desviación estándar en el método de grados día, la mínima desviación estándar en el método de días, el coeficiente de variación en días y el coeficiente  $b$  de regresión lineal (Baker y Reddy, 2001; Bonhomme, 2000; Yang *et al.*, 1995).

La **mínima desviación estándar en el método de grados día**, es un primer procedimiento en el que la  $T_b$  se elige del resultado de la variación en *grados día o unidades de calor* minimizando el uso de series de cultivos, en donde la menor desviación estándar en la metodología de grados día ( $SD_{gdd}$ ) la define la ecuación 2 (Bonhomme 2000; Yang *et al.*, 1995).

*Ecuación 2:*

$$SD_{gdd} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n GDD_i - MGDD}{n-1}}$$

---

<sup>3</sup> Para condiciones del trópico se ha estimado que la temperatura del suelo en los primeros 50 centímetros es aproximadamente un grado mayor a la temperatura del ambiente, y debajo de los 50 cm puede ser hasta de 5 grados menos en promedio que la temperatura ambiental, lo cual se explica porque los suelos tienden a ser cuerpos negros que retienen calor.

$GDD_i$  son los grados día del  $i$ -ésimo cultivo,  $MGDD$  es el promedio de grados día de todos los cultivos, y  $n$  es el número de cultivos. El fundamento consiste en elegir la temperatura que genera grados día con la más pequeña desviación estándar, lo que implica tener  $T_b$  preliminares.

La **mínima desviación estándar en el método de días**, es un segundo procedimiento de determinación de la  $T_b$ . Esta metodología se centra en el error producido sobre el tiempo cronológico, en donde la menor desviación estándar en el método de días  $SD_{día}$  la define la ecuación 3 (Bonhomme, 2000; Yang *et al.*, 1995).

*Ecuación 3:*

$$SD_{día} = \frac{SD_{gdd}}{x_t - t_b}$$

En la que  $SD_{gdd}$  es la desviación estándar de los grados día,  $X_t$  es la temperatura media de todos los cultivos, y  $T_b$  es la temperatura base. Junto con el método anterior se requiere de  $T_b$  preliminares, y maneja el mismo nivel de procedimientos matemáticos.

El **coeficiente de variación en el método de días**,  $CV_{día}$ , es un tercer procedimiento matemático de determinación de la  $T_b$ , y se define con la ecuación 4 (Baker y Reddy, 2001; Bonhomme, 2000; Yang *et al.*, 1995).

*Ecuación 4:*

$$CV_{día} = \frac{SD_{día}}{x_d} \times 100\%$$

En la que  $SD_{día}$  es la desviación estándar en días y  $x_d$  es el promedio del número de días requerido para alcanzar una etapa de desarrollo dada. Debido a que  $x_d$  es constante, independiente de la  $T_b$  seleccionada, los tres métodos mencionados son equivalentes procedimentalmente en términos del cálculo para la selección de la  $T_b$ .

A pesar de su enfoque matemático, los tres métodos mencionados anteriormente calculan la  $T_b$  empíricamente, ya que requieren de las  $T_b$  candidatas y sus desviaciones

estándar asociadas, por lo que la literatura reporta dificultades inherentes para seleccionar la temperatura base correcta que genere la menor variación (Baker y Reddy, 2001; Yang *et al.*, 1995).

**El método del coeficiente de regresión  $b$**  para la determinación de la  $T_b$ , es un método que implica interpolación, por lo que no determina con exactitud la temperatura base debido a la dificultad para determinar el valor a partir de la gráfica; además, estadísticamente no es posible “extrapolar” en modelos de regresión (Baker y Reddy, 2001; Bonhomme, 2000; Trudgill *et al.*, 2005; Yang *et al.*, 1995).

De acuerdo a lo mencionado, los métodos del enfoque matemático de determinación de la  $T_b$  presentan limitaciones por su baja exactitud, y en la práctica requieren la aplicación recurrente de aproximaciones empíricas que involucran “el ensayo y error”.

En este contexto, existe además un **enfoque analítico** que reporta la literatura para determinar la  $T_b$  a través de curvas entre la tasa de crecimiento en el tiempo con dependencia de la temperatura o por tasas relativas de crecimiento, mediante la operación de *fitotrones* o cámaras de crecimiento a nivel de laboratorio. Este enfoque ofrece una perspectiva no estadística, pero práctica y económica con ventajas referidas al control de variables tales como la radiación y la humedad relativa (Baker y Reddy, 2001).

El enfoque analítico, en la práctica muestra semejanza con la determinación de  $T_b$  por medio del coeficiente de regresión lineal para la tasa de crecimiento con respecto al tiempo, y aplica la fundamentación presentada en la literatura sobre la relación lineal entre la temperatura y la tasa de crecimiento para organismos poiquilotérmicos (Bonhomme, 2000; Trudgill *et al.*, 2005).

Baker y Reddy (2001) plantean una consideración adicional respecto a las condiciones del modelo de tiempo térmico, y es que la predicción de eventos de desarrollo en plantas a través de la metodología de unidades de calor, es válida si se asumen los siguientes tres supuestos: 1) la tasa de desarrollo es lineal en el rango de temperatura experimentada, 2) las temperaturas diarias no alcanzan a superar las temperaturas extremas, menores a  $T_b$  y

mayores al umbral de temperatura máxima, y 3) la temperatura media diaria del aire y del tejido en crecimiento en la planta es la misma (Baker y Reddy, 2001).

Además, en el análisis térmico integral respecto al desarrollo se considera el extremo superior mencionado, umbral de temperatura superior o temperatura máxima límite (TML), condición que dependiendo del tipo de metabolismo del cultivo implica la exposición a estrés por calor y probablemente a incrementos en la fotorrespiración, similar al caso de la *Tb*, presentando reducciones fuertes en el rendimiento de la remolacha azucarera (Kenter *et al.*, 2006; Mäck y Hoffmann, 2006). Para este cultivo se han reportado valores de alrededor de 35°C para la temperatura máxima límite (Holen y Dexter, 1996).

## **Materiales y Métodos**

La construcción del modelo de acumulación de unidades de calor tuvo componentes tanto de laboratorio como de campo, ejecutados simultánea e independientemente para cada una de las partes de la investigación (*i.d.* Temperatura base [*Tb*], Crecimiento, Desarrollo y Calidad). La parte de determinación de la *Tb* se condujo en laboratorio e incluyó la plantulación en invernaderos y el trabajo en fitotrón para obtener la constante. Las partes de crecimiento y desarrollo se condujeron en campo siguiendo el mismo ciclo del cultivo experimental con mediciones de características morfofisiológicas y determinantes fisiológicos. La parte de calidad se condujo con medidas directas en campo de grados *brix* y en laboratorio mediante espectrofotometría con la determinación de los contenidos de sacarosa.

### **Materiales para la determinación de *Tb***

Se emplearon semillas Hilleshög de la casa comercial Syngenta, variedades 0615 y 0505, que fueron seleccionadas dentro de un grupo de materiales vegetales disponibles para Boyacá por sus mayores rendimientos.

Las plántulas seleccionadas para la determinación de la *Tb* presentaron la siguiente descripción morfofisiológica, a los 35 días en promedio de plantuladas: cuatro hojas verdaderas expandidas de forma oblonga, consistencia de limbo carnosa, margen crenado, ápice cuspidado, base atenuada y superficie glabra, de color predominantemente verde amarillo foliar (5GY 4/8). La venación pinnada craspedódroma color verde amarillo 5GY 7/6, igual al de los pecíolos de remolacha y raíces de color amarillo 2.5Y 8/4 fasciculadas, delgadas y finas.

### **Procedimiento para la determinación de *Tb***

La determinación de la *Tb* se hizo a través de un **enfoque analítico**.

Las variedades de remolacha 0615 y 0505 para el estudio de *Tb* fueron plantuladas en los invernaderos de la universidad Jorge Tadeo Lozano (UJTL), sembradas en un sustrato de turba rubia al 100% y empleando bandejas de germinación de 128 celdas (24 cc por

celda). La fase de germinación a emergencia sucedió en cuarto oscuro con temperatura media de 23°C. Después de la emergencia se trasladó el material a bandejas en el invernadero (14,5°C en promedio) en donde continuó su desarrollo hasta el momento del traslado de las plántulas al Laboratorio de Fisiología de Cultivos de la Universidad Nacional de Colombia (*i.d.* 4 hojas verdaderas), con un tiempo promedio de 35 días después de la siembra (*Figura 7*). Desde el momento que las plantas se trasladaron del cuarto oscuro al invernadero se inició el fertiriego con una solución nutritiva ( $\text{NH}_4$ , 31,4;  $\text{NO}_3$ , 116,8;  $\text{P}_2\text{O}_5$ , 54;  $\text{K}_2\text{O}$ , 154;  $\text{CaO}$ , 104;  $\text{MgO}$ , 30; S, 22 ppm).



*Figura 7. A. Emergencia de remolacha azucarera en cuarto oscuro; B. Plantulación; C. Plántulas ingresadas en fitotrón de Laboratorio de Fisiología de Cultivos; D. muestra de plántulas isomorfas.*

Para determinar la *Tb* en laboratorio, se emplearon alrededor de 1000 plántulas por cada variedad provenientes del invernadero, plantuladas cada 20 días en grupos de 50 plantas por

variedad, divididos a su vez en dos grupos de 20 y 30 respectivamente; con el primero se estimó el promedio representativo del peso seco por planta, y el segundo se ingresó al fitotrón Biotronette “model 845-2:Lab-Line” del Laboratorio de Fisiología de Cultivos. Estas mediciones se usaron para calcular las tasas relativas de crecimiento (TRC) en BBCH 14, a cada temperatura fijada, que fue adecuadamente monitoreada y calibrada a través de un data logger Testo 175-T2 de temperatura instalado al interior de dicho fitotrón (*i.d.* condiciones de radiación de  $1000 \mu\text{mol}$  de fotones  $\text{m}^{-2}.\text{s}^{-1}$  y humedad relativa de 60% constantes). El data logger fue ajustado para almacenar lecturas cada 30 segundos.

Las plantas se dispusieron a un mismo nivel dentro del fitotrón para controlar mejor las condiciones internas y evitar la exposición a diferentes gradientes de temperatura, luz y humedad relativa que pudieran presentarse entre niveles.

La evaluación de las plantas de remolacha se realizó cada cuatro días mediante la determinación de la variable “peso seco”, así: se retiraron consecutivamente seis plantas, se obtuvo el cálculo de TRC para plantas con 4, 8, 12, 16, y 20 días dentro del fitotrón a cada temperatura calibrada; adicionalmente, se midieron las variables de cambio en coloración con base en tabla Munsell para tejido vegetal, área foliar (con el medidor LI-3100C), peso seco foliar y el desarrollo mediante conteo de hojas.

Las temperaturas de operación calibradas en el fitotrón fueron:  $1,6^{\circ}\text{C}$ ,  $1,8^{\circ}\text{C}$ ,  $2,0^{\circ}\text{C}$ ,  $2,5^{\circ}\text{C}$ ,  $4,0^{\circ}\text{C}$ ,  $5,0^{\circ}\text{C}$  y  $12^{\circ}\text{C} \pm 0,3^{\circ}\text{C}$  cada 20 días para la determinación de las TRC (*i.d.* partiendo de BBCH 14 en cada caso), magnitud térmica mantenida relativamente constante durante períodos diarios de 24 horas. Eventualmente se evaluó cada dos días la temperatura al interior del sistema a través del logger mencionado anteriormente, verificando la temperatura de operación del equipo. Con base en las TRC en el tiempo para cada una de las temperaturas objetivo, se analizó la temperatura bajo la cual las plantas ralentizaban su crecimiento ( $T_b$ ), facilitado por la construcción de curvas de relación entre crecimiento en peso seco y tiempo.

### **Materiales para el análisis de Desarrollo, Crecimiento y Calidad**

En el Centro de Investigación ICA-Surbatá, ubicado en el municipio de Duitama (Boyacá) a una altura de 2420 msnm, se sembraron las variedades de remolacha azucarera Hilleshög 0615 y 0505. La localidad representa el ambiente de planicie aluvial frío-seco, el cual abarca unas 12000 hectáreas ubicadas en la zona del valle del río Chicamocha entre los municipios de Tuta y Sogamoso. Es un sector con pendientes del rango de 0-3%, suelos moderadamente profundos (limitados por horizonte argílico dispuesto a unos 80-100 cm de la superficie), drenaje externo moderado a pobre con algunas zonas afectadas por niveles freáticos superficiales y pH de fuertemente ácido a neutro (Syngenta –comunicación personal–, Diciembre de 2009).

Se sembró semilla de variedades de alrededor de 60 cm de altura, con abundante desarrollo de hojas, un tubérculo cónico de color amarillo 2.5Y 8/4 y rendimiento potencial de tubérculo de 100 t ha<sup>-1</sup> (Milford, 2006). La semilla de primera calidad seleccionada, fue suministrada por la división de semillas de Syngenta, que también aportó la información edafoclimática para la localidad en que se establecieron los cultivos (Anexo A).

En el lote que tuvo un ciclo anterior de papa se realizaron labores de preparación del terreno que incluyeron la aplicación de herbicidas e insecticidas, y de enmiendas con 1500 kg ha<sup>-1</sup> de la mezcla cal hidratada y cal dolomita (1:1,2). Se cavó una calicata de 42 cm de profundidad para conocer las condiciones del suelo en el lote (2 horizontes: El A con suelo de textura arenosa, de coloración rojo amarillenta 5YR 6/3 y de 17 cm de profundidad; y el B con suelo arcilloso, de coloración rojo amarillenta un poco más oscuro 10YR 3/4, y con 21 cm de profundidad). La preparación de suelo fue realizada con implementos tradicionales en esta localidad como arado de discos, cinceles y rastra (Anexo A).

En el lote se instaló un sistema de riego por goteo interline sencillo (no autocompensado) con distancia entre goteros de 30 cm y distancia entre líneas de 50 cm (línea por surco de remolacha). Se instalaron 2000 m de manguera; el sistema se surtió de una corriente de agua. En el punto de toma de agua se requirió hacer limpieza y dragado con retroexcavadora. El caudal bombeado fue de unos 30 galones por minuto, a 20 psi (libras por pulgada cuadrada) la dosis de riego por sector fue de 12 mm.h<sup>-1</sup>. El día de la

siembra se aplicaron 45 minutos de riego para favorecer la germinación, y a partir de ese momento se proporcionó riego semanal de acuerdo a balance hídrico (requerimiento de 600 mm ciclo<sup>-1</sup>).

Para completar los requerimientos del cultivo se fertilizó con 120 kg/ha de N, 150 kg/ha de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> y 60 kg/ha de K<sub>2</sub>O, teniendo en cuenta el análisis de suelos realizado en el Laboratorio de la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia (UPTC), con la aplicación de un fertilizante compuesto NPK y se balanceó con superfosfato triple y cloruro de potasio; la aplicación se fraccionó en dos de tal forma que en el “cierre de calle” se hizo la aplicación final de 60 kg ha<sup>-1</sup> de N y 30 kg ha<sup>-1</sup> de K<sub>2</sub>O, de acuerdo al paquete agronómico aplicado por Syngenta.

En el lote predominaban malezas de hoja ancha como bledo (*Amaranthus hybridus* L.), rábano (*Raphanus raphanistrum*), trébol forrajero (*Medicago sp.*), malva (*Malva sp.*), gualola (*Polygonum nepalense* M.) y papa (*Solanum tuberosum*) proveniente de tubérculos remanentes del cultivo anterior, por lo que fue necesario recurrir a deshierbas manuales para controlar la maleza que emergió en el lote. Las malezas de hoja angosta no se presentaron de forma acentuada.

Posterior a la siembra, se hicieron aplicaciones de los siguientes herbicidas: (1dds<sup>4</sup>) en preemergencia Tramet 500 SC con dosis de 4 kg ha<sup>-1</sup> (i.a. Ethofumesate), Pyramin (3 Kg/ha; i.a. Cloridazon) y Dual Gold (0.3 L ha<sup>-1</sup>; i.a. S-Metolachlor) con una efectividad entre 60 y 70%; (4dds) en preemergencia Glifosato (2 L ha<sup>-1</sup>), con el que se logró controlar efectivamente maleza que estaba apareciendo antes de la germinación del cultivo (bledo, rábano, papa). Con una efectividad de 90% sobre trébol forrajero mostrando tolerancia a Glifosato; (7dde<sup>5</sup>) en postemergencia Betanal (1 L ha<sup>-1</sup>; i.a. Phenmedipham; Desmedipham; Ethofumesate) con una efectividad de 95% sobre malva; (22 dde) en postemergencia Betanal (1.5 L ha<sup>-1</sup>) y Pyramin (0.3 Kg ha<sup>-1</sup>) con una efectividad de 99%, se logró controlar la malva, aunque persistieron brotes de papa. Estas aplicaciones fueron apoyadas por labores culturales de desyerbe manual cada 20 días.

---

<sup>4</sup> dds: día después de la siembra

<sup>5</sup> dde: días después de la emergencia

Hacia los 122 dds se empezaron a presentar ataques de roya con baja incidencia, en el control se aplicó Tilt (*i.a.* Propiconazole) a razón de 1 L ha<sup>-1</sup>, con lo cual se observó una detención en el avance de la enfermedad.

Los insectos no presentaron problema alguno para el ensayo, excepto la presencia de algunos trozadores al comienzo del ciclo, los cuales se controlaron de manera eficaz y persistente con una aplicación de Basudin (*i.a.* Diazinon) a chorrillo a razón de 1 L ha<sup>-1</sup>.

Los pesos tanto frescos como secos fueron determinados en balanzas analíticas OHAUS Adventurer™, el área foliar con el planímetro LICOR LI-3100, disponibles en el Laboratorio de Fisiología de Cultivos de la Facultad de Agronomía de la Universidad Nacional.

Finalmente, para la estimación del color munsell tanto de raíz, pecíolos y hojas se empleó una Tabla Munsell para tejido vegetal, y para la determinación de la calidad en grados *brix* y contenido de sacarosa se empleó respectivamente un refractómetro para sacarosa triple escala marca bellingham E – Line 90 (modelo 44-806) y los reactivos que aparecen en el Anexo A; se realizaron las reacciones, cuyo producto fue analizado en un espectrofotómetro (modelo Spectronic 1001).

### **Procedimiento para el análisis de Desarrollo**

Para determinar el efecto de la acumulación de unidades de calor sobre el crecimiento, desarrollo y el rendimiento de la remolacha azucarera, se establecieron cultivos en campo en condiciones agronómicas programadas en el ICA Surbatá (Duitama) en Boyacá, con una temperatura media de 18,1±0,03°C registrada durante el cultivo, y se recopiló información de cosecha tomada de cultivos de remolacha azucarera en Toca y Soracá, con temperaturas promedio durante el ciclo de 13 y 14,2°C respectivamente.

Se instaló un medidor data logger Testo 175-T2 de temperatura suspendido a la altura promedio del dosel del cultivo para la computación continua de temperaturas diarias, el cual fue conectado con una sonda térmica de penetración marca Testo AG 0610 1725/810 instalada a una profundidad promedio respecto a las raíces del cultivo; cada 3 minutos los data logger registraron simultáneamente dos valores de temperatura (*i.d.* dosel y edáfica),

lo que posteriormente se descargó en un computador en el momento del muestreo que se relacionó con las mediciones realizadas en cada etapa de desarrollo del cultivo (*i.d.* acumulación de unidades de calor en cada etapa de desarrollo vencida).

Las parcelas de 1000 m<sup>2</sup> se dividieron en tres bloques bajo el criterio de compactación (Anexo C), mediante un diseño de bloques completos al azar, sembrando las dos variedades, con una distribución espacial de cultivo de 0,24 m entre plantas y 0,45 m entre líneas, que posterior a la siembra y raleo alcanzó una población de 90000 plantas ha<sup>-1</sup>. La unidad muestral equivale a una planta completa extraída del cultivo de campo. Desde la siembra se hicieron muestreos programados a lo largo del ciclo productivo en intervalos de tiempo de 11±3 días con un total de 15 puntos calendario de medición, en cada muestreo se extrajeron 30 plantas por variedad. En cada planta extraída se realizaron mediciones morfo-fisiológicas, anatómicas y de crecimiento (*Tabla 3, Tabla 9, Anexo B*).

En cada fecha de muestreo, en horas de la mañana, se tomaron mediciones de grados *brix* y de altura de planta, y luego del traslado de las muestras al Laboratorio de Fisiología de Cultivos, se registraron variables de la morfología de la raíz, específicamente: largo máximo de la raíz tanto carnosa como fasciculada desprendida, el diámetro máximo y el diámetro a la mitad de su longitud, el número de anillos presentes a la altura del diámetro máximo de la raíz (*i.d.* corte transversal de la raíz), y se determinó el valor de variables relacionadas con la calidad y el rendimiento, como el contenido de sacarosa, el rendimiento en peso fresco –a partir del cierre de calle– y el peso seco radical en una balanza analítica OHAUS Adventurer<sup>TM</sup>.

A nivel foliar se contó el número de hojas expandidas y a medio expandir, se midió el ancho máximo foliar y la longitud de la vena media (o largo máximo de hoja) para todas las hojas incluyendo las hojas a medio expandir, la profundidad de la nervadura central (medición incluida después de cierre de calle, específicamente de las hojas 7 y 8, como lo sugieren Li *et al.*, 1992 ), el área foliar, el peso fresco foliar, el peso seco foliar, el color de hojas y se hizo seguimiento a la tasa de emisión foliar medida en días y en unidades de calor.

Por último, en pecíolos se registró cantidad, peso fresco, peso seco, color, longitud y diámetro a la mitad de su longitud.

Tabla 3. Variables tomadas por órgano de remolacha azucarera

<b>Órgano</b>	<b>Variable medida</b>
Raíz	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Grados <i>brix</i></li> <li>2. Contenido de sacarosa de muestras tomadas entre el primer y segundo anillo cambial secundario al nivel del ancho máximo radical</li> <li>3. Color</li> <li>4. Largo máximo de raíz carnosa</li> <li>5. Largo máximo de raíz fasciculada</li> <li>6. Diámetro máximo</li> <li>7. Diámetro a la mitad de su longitud</li> <li>8. Número y clase de anillos a la altura del diámetro máximo</li> <li>9. Peso fresco</li> <li>10. Peso seco</li> </ol>
Pecíolos	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Número</li> <li>2. Peso fresco</li> <li>3. Peso seco</li> <li>4. Color</li> <li>5. Diámetro a la mitad de su longitud</li> <li>6. Longitud</li> </ol>
Hojas	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Número de hojas expandidas</li> <li>2. Número de hojas a medio expandir</li> <li>3. Número de hojas por expandir</li> <li>4. Ancho máximo cada hoja</li> <li>5. Longitud de vena media cada hoja</li> <li>6. Profundidad de nervadura central en hojas 7 y 8</li> <li>7. Área foliar</li> <li>8. Peso fresco</li> <li>9. Peso seco</li> <li>10. Color</li> <li>11. Tasa de emisión foliar</li> </ol>

Las variables en las que se centró esta parte del análisis fueron las que tuvieron que ver con el desarrollo, que indican la aparición ordenada de órganos o el paso a través de etapas consecutivas –en ocasiones alternas como BBCH 119, BBCH 39 y BBCH 41– (Figura

34), tales como el número de hojas, la aparición de grupos de hojas externos a la filotaxia, el número de anillos a la altura del diámetro máximo de raíz y el diámetro máximo de la raíz.

Los registros de máximos y mínimos de temperatura diaria y de referencia horaria fueron guardados semanalmente en un computador. La ecuación 1 para la determinación de unidades de calor, fue usada para hacer seguimiento de la acumulación de unidades de calor diarias del cultivo en el experimento de Boyacá. Paralelamente se registraron las etapas de desarrollo del cultivo, y en cada ocasión la acumulación de unidades de calor etapa vencida, al igual que la indicación cronológica como insumo para la discusión de resultados de investigación.

Los resultados de esta investigación se comparan con los reportes de acumulación de unidades de calor que se registra en la literatura para la fase vegetativa de las variedades de remolacha azucarera en clima templado (Anexo D).

La información obtenida en la parte de campo sobre el desarrollo y la acumulación de unidades de calor del cultivo en Duitama se comparó con información existente para la zona del valle del río Chicamocha, recogida por Syngenta respecto a cultivos previos en Toca y Soracá para las variedades de remolacha 0615 y 0505.

Al final del análisis de desarrollo se presenta una construcción conceptual del modelo de acumulación de unidades de calor y su efecto sobre el desarrollo del ciclo de cultivo, teniendo en cuenta algunas de las variables que hacen parte de un enfoque de sistemas y programado en lenguaje *Structured Thinking Environment Learning Language with Animation* (STELLA).

El modelo principal se encadenó a un submodelo de crecimiento para potenciar la representación de los efectos esperados que tiene la temperatura no solo sobre las etapas de desarrollo, sino también sobre los criterios de calidad del cultivo como crecimiento y acumulación de azúcar.

La herramienta emplea ecuaciones diferenciales y la interfaz gráfica de simbología de circuitos que presenta STELLA (*v.gr.* flujos, reservorios, conectores de información), para

crear el esquema de relaciones involucrados tanto en la acumulación de unidades de calor, como en la acumulación de azúcar y rendimientos del cultivo. Para la calibración inicial del modelo se utilizaron las constantes reportadas en la literatura para el cultivo de remolacha azucarera y los resultados obtenidos en la parte de campo de esta investigación (Holen y Dexter, 1996; Kenter *et al.*, 2006; Li *et al.*, 1992).

Las partes que componen el modelo son los submodelos de crecimiento y desarrollo, y el modelo funciona a partir de una variable de entrada que es la temperatura. Se asume que no existe intervención de plagas ni enfermedades, y que existe un suministro adecuado tanto de nutrientes como de agua. El submodelo de crecimiento tuvo como principal mecanismo funcional los procesos fotosintéticos y respiratorios para la acumulación de peso, mientras que el submodelo de desarrollo empleó los resultados de esta investigación para pronosticar la aparición de cada etapa durante el ciclo (el mecanismo funcional son las unidades de calor).

### **Procedimiento para el análisis de Crecimiento**

Los materiales y el procedimiento general anteriormente descritos para el análisis de desarrollo se emplearon también para el análisis de crecimiento, haciendo énfasis sobre las variables de peso seco por órgano, medidas de superficie y determinantes fisiológicos; además, se construyó un modelo simple matemático multiplicativo determinístico para la simulación tanto del crecimiento como de la distribución del peso seco.

### **Índices de crecimiento**

Con base en las medidas directas del crecimiento obtenidas para cada muestra que se incluyen en la tabla 3, se calcularon medidas indirectas como el índice de área foliar (IAF), tasa de asimilación neta (TAN), relación de área foliar (RAF), área foliar específica (AFE), relación de peso foliar (RPF), tasa de crecimiento del cultivo (TCC), distribución de peso seco, coeficiente de distribución de peso seco, potencia de la fuente y del vertedero; cuya determinación se describe a continuación (Gardner *et al.*, 1985).

El IAF es el tamaño del sistema de hojas para interceptar la luz, expresada como la relación entre el área foliar (superficie sintetizadora) y el área de suelo ocupada por la misma (Gardner *et al.*, 1985). El área de hojas en un metro cuadrado de suelo fue medida en  $\text{cm}^2$  con un planímetro LICOR LI – 3100 pero convertida a la unidad derivada para el área en el sistema internacional de unidades.

La TAN representa la eficiencia del sistema fotosintético del cultivo, expresada como la ganancia neta de asimilados por unidad de área foliar y por unidad de tiempo (Gardner *et al.*, 1985). Las variables independientes para calcularla fueron el área cuya determinación se mencionó anteriormente, y el peso seco que fue medido en gramos en una balanza OHAUS Adventurer<sup>TM</sup> tras el secado de cada muestra dividida por órganos en una estufa de secado Colser a  $70^\circ\text{C}$  hasta alcanzar peso constante.

La RAF es la relación del área de tejido fotosintetizador con respecto al peso de los tejidos capaces de respirar, esta relación de área foliar expresó la relación existente entre el área foliar expuesta por la planta y el peso total de la planta (Gardner *et al.*, 1985). Se descompuso en AFE y RPF para profundizar su análisis.

El AFE es la representación de la densidad de hojas, el grosor relativo de la capa de hojas, y matemáticamente fue expresada por el área promedio de una hoja expandida por unidad de peso foliar.

La RPF es la relación del peso de tejido fotosintetizador con respecto al peso de los tejidos capaces de respirar, se expresó como la producción del tejido foliar con respecto al peso seco total.

La TCC es la ganancia en peso diario en un metro cuadrado de suelo, se expresó como el peso por unidad de área de suelo y por unidad de tiempo (Gardner *et al.*, 1985).

La distribución de peso seco, es la asignación absoluta de peso que hace el cultivo a lo largo del ciclo hacia sus diferentes órganos; mientras que el coeficiente de distribución de peso seco es la proporción de peso seco que presenta cada órgano en un momento dado de acuerdo a su desarrollo, la tasa de distribución entre órganos mencionada es un punto que relaciona el desarrollo y el crecimiento.

La potencia de la fuente y del vertedero, sirvió para comparar la fuerza que tienen las hojas como órgano para producir fotoasimilados y la del órgano para demandarlos como es el caso de la raíz; en otras palabras, la potencia de la fuente es la cantidad de peso de las hojas por unidad de tiempo como órgano fuente en la producción de fotoasimilados, y la potencia del vertedero es para la remolacha la habilidad de la raíz para atraer y acumular azúcares, subrogada en términos de su peso por unidad de tiempo.

### **Modelo simple de simulación del crecimiento y distribución de peso seco**

La comparación entre el crecimiento y la distribución del peso seco para ambas variedades se determinó también a través de un modelo matemático multiplicativo determinístico para simular el crecimiento diario y la distribución de peso seco por órgano.

Los componentes del modelo de crecimiento fueron la radiación fotosintéticamente activa (RFA), y la fracción de luz interceptada ( $FL_{INT}$ ) estimada con base en el índice de área foliar. Con la posterior determinación de los parámetros fisiológicos de uso eficiente de la radiación (RUE), el coeficiente de extinción de la luz ( $k_i$ ), y el porcentaje de distribución de peso seco hacia cada órgano por la remolacha azucarera.

La RFA se obtuvo a través de las horas de brillo solar registradas por la estación agrometeorológica (AM) del IDEAM código 2403512 Surbatá-Bonza (Duitama) localizada  $5'48''N$  y  $73'04''W$  (2485msnm), próxima a la localidad del experimento en el ICA, empleando el método de Angstrom citado por Spitters *et al.* (1989); y la  $FL_{INT}$  se determinó como función del IAF definida por la ecuación 5.

*Ecuación 5:*

$$FL_{INT} = 1 - e^{-k_i \cdot IAF}$$

En la que el coeficiente de luz interceptada ( $FL_{INT}$ ) se encuentra en función de  $k_i$ , que es el coeficiente de extinción de la luz, y el IAF que se determinó para cada uno de los muestreos del experimento.

La estimación de los parámetros fisiológicos derivados del modelo (*v.gr.*  $k_i$ , RUE), se obtuvo a través del método de optimización no lineal usando la herramienta de análisis SOLVER de Excel.

La tasa de crecimiento dada por el modelo en peso seco se define a partir de la ecuación 6, en la que se relaciona la  $FL_{INT}$  por el dosel, la RFA y la RUE.

*Ecuación 6:*

$$\partial W_t = RUE \cdot FL_{INT} \cdot RFA_t$$

En la que  $\partial W_t$  es el incremento de peso seco diario por unidad de área.

Por su parte, el peso seco diario se define de acuerdo al método de Euler por la ecuación 7.

*Ecuación 7:*

$$W_t = W_{(t-1)} + \partial W_t \cdot \Delta t$$

En la que  $W_t$  es el peso seco total de cada variedad de remolacha en el tiempo  $t$ , que está en función de  $W_{t-1}$ , que para efectos prácticos es el peso seco acumulado al día anterior de la simulación,  $\partial W_t$  es el incremento de peso seco diario por unidad de área y  $\Delta t$  es el día de simulación.

Retomando el método de Euler, fue posible obtener para el modelo a través de SOLVER el particionamiento estimado del peso seco en la planta; esta relación permitió asignar una proporción media del peso seco a cada órgano con la inclusión de un coeficiente de distribución de peso seco por órgano de remolacha en la ecuación 8, que permitió ampliar la discusión sobre el crecimiento de las variedades 0505 y 0615.

*Ecuación 8:*

$$W_{0,t} = W_{0,(t-1)} + \alpha_0 \cdot \partial W_t \cdot \Delta t$$

En la que  $W_{0t}$  es el peso seco del órgano (*v.gr. raíz, pecíolos, hojas*) en el tiempo  $t$ , que está en función de  $W_{0(t-1)}$ , que es el peso seco del órgano en el tiempo  $t-1$ ; de  $\alpha_0$  que es el coeficiente de distribución de cada órgano, que toma la notación de  $\alpha_h$  para el caso de las hojas,  $\alpha_p$  para el caso de los pecíolos y  $\alpha_r$  para el caso de la raíz; de  $\partial W_t$  que es el incremento de peso seco diario por unidad de área; y de  $\Delta t$  que corresponde al día de simulación.

Para efectos del análisis se construyó un modelo compuesto, y definido para tres dominios de acuerdo a etapas de desarrollo de remolacha dentro de la fase vegetativa considerada.

Finalmente, se exploró una forma alternativa para estimar el área foliar, que es el insumo que se toma del cultivo para el modelo de tasa de crecimiento planteado (ecuación 5); a pesar que existen algunos métodos no destructivos para su determinación, la literatura reporta la utilidad de la relación matemática entre las mediciones directas del crecimiento “ancho máximo de hoja” y “longitud máxima de la vena media” en remolacha azucarera, a través de los cuales se puede determinar geoméricamente el área individual que subroga el área del dosel (Tsialtas y Maslaris, 2005).

El método no destructivo para estimar el área foliar permitió a través del modelo propuesto simular bajo las condiciones del experimento el crecimiento continuo del cultivo en el tiempo.

### **Procedimiento para el análisis de Calidad**

Los materiales y el procedimiento general para el análisis de calidad fueron los mismos descritos para el del análisis de crecimiento y desarrollo, aunque las variables relevantes consideradas fueron los grados *brix* y el contenido de sacarosa de la muestra. Ya que la calidad para la posterior producción de etanol está basada en criterios de acumulación de sacarosa, insumo primordial del proceso industrial (Rosillo-Calle y Walter 2006); y el momento oportuno de cosecha además del rendimiento en peso involucra también la dinámica de acumulación de sacarosa durante el desarrollo.

En el método se tuvo en consideración lo que se conoce sobre la regulación circadiana endógena que presenta la remolacha azucarera respecto a la asignación de carbono asimilado dirigido a la síntesis y exportación de sacarosa hacia la raíz; por lo que a nivel del día es apropiado cosechar en momentos tempranos de la mañana, hacia aproximadamente dos horas después de iniciado el periodo de radiación (Li *et al.*, 1992), razón por la que las determinaciones de grados *brix* en cada uno de los muestreos, se hicieron directamente en campo temprano en la mañana (antes de 8:00 am).

Para determinar el contenido de sacarosa, las muestras fueron trasladadas desde la localidad del experimento hasta el Laboratorio de Bioquímica del Departamento de Química de la Universidad Nacional en Bogotá. El análisis de laboratorio inició con el corte de una sección de tejido radical localizado entre el primer y segundo anillo cambial secundario al nivel del ancho máximo radical, en cada punto de muestreo del ciclo productivo de remolacha. Estos cortes aproximadamente de 30 g y 1,5 cm<sup>3</sup> para cada variedad fueron tomados de tres plantas tomadas al azar en cada fecha, previamente registrada la medición de grados *brix* sobre cortes isomorfos, se llevaron provisionalmente a un congelador a -20°C, fueron cortados finamente y macerados con nitrógeno líquido para detener los procesos de oxidación y fermentación de azúcares, el macerado se almacenó a -20°C hasta la preparación del extracto.

Para la preparación del extracto se tomaron 12 g de tejido radical macerado, y se aplicó 10 mL de buffer fosfato 0,1 M conteniendo 0,5% (w/v) de polivinilpirrolidona y 3 mM EDTA disódico, correspondiente al buffer de extracción con un pH de 7,5 de acuerdo a la metodología de Dubois *et al.* (1956). Posteriormente se centrifugó a 16000 xg durante 10 minutos a 4°C; el sobrenadante se almacenó a -20°C (*Figura 8*).



*Figura 8. Procesamiento de muestras de tejido radical para determinación de azúcar. a. corte de muestras entre el primer y segundo anillo cambial secundario al nivel del ancho máximo radical; b. toma de muestras isomorfas para la determinación de °Brix; c. Lectura de °Brix sobre el jugo extraído de la muestra; d. Corte de 3 plantas por variedad para cada fecha; e. macerado en fresco a baja temperatura; f. macerado con nitrógeno líquido; g. muestra triturada y congelada; h. muestra almacenada; i. pos-reacción en tubos de ensayo, en etapa de enfriamiento; y j. extracción con micropipeta hacia la celda de cuarzo que se ubicó en el espectrofotómetro.*

Se realizó una curva de calibración de sacarosa ( $0,2 \text{ mg de azúcar.mL}^{-1}$ ), en el rango de 0 a  $200 \text{ }\mu\text{g.mL}^{-1}$ . La cuantificación se realizó mezclando  $10 \text{ }\mu\text{L}$  de extracto con  $140 \text{ }\mu\text{L}$  de fenol al 80%,  $5 \text{ mL}$  de  $\text{H}_2\text{SO}_4$  concentrado y  $2 \text{ mL}$  de agua bidestilada, en tubos de ensayo con la suspensión de bolas de cristal para evitar la liberación de productos durante la reacción a  $60^\circ\text{C}$  (como medida de precaución para evitar la pérdida de muestra e inhalación de fenol). Tras un período de enfriamiento de treinta minutos se realizó la lectura de absorbancia a  $490 \text{ nm}$  en un espectrofotómetro, con tres repeticiones por cada muestra, y se realizaron los cálculos en miligramos de sacarosa por gramo fresco de tejido radical.

Finalmente, los resultados de grados *brix* y de contenidos de sacarosa entre el primer y segundo anillo cambial, respecto a la acumulación de unidades de calor, se incluyeron en el análisis del momento oportuno de cosecha.

### **Procedimiento matemático-estadístico**

La información recolectada durante el ciclo de cultivo fue analizada a través del programa estadístico Spad v3.5 con el procedimiento de componentes principales (estadística exploratoria multifuncional), para categorizar y seleccionar variables para el análisis (junto con el coeficiente de correlación de Pearson), el programa estadístico SAS v.9 con los procedimientos anova para el análisis de varianza, y en conjunto con CurveExpert para el modelamiento matemático (Anexo I, Anexo J, Anexo K, Anexo L; supuestos de modelo), STELLA para la programación del modelo de acumulación de unidades de calor y el procedimiento SOLVER de Excel para la obtención de los coeficientes del modelo diferencial de simulación del crecimiento.

En los casos de las variables de medición directa como contenido de sacarosa entre el primer y segundo anillo cambial y rendimientos se realizó análisis de varianza para probar diferencias entre las variedades. Para estas variables con referencia a las unidades de calor (tiempo térmico), y respecto al rendimiento se determinaron los parámetros bajo los modelos Gaussiano, Logístico, y Richards, que presentaron el mejor ajuste matemático, sentido biológico, mayor coeficiente de correlación y los menores cuadrados medios del error (CME).

## Resultados y Discusión

### *Cultivo*

Debido a que el estudio de “unidades de calor” es específico, respecto al material vegetal y al paquete agronómico, a continuación se hace la consideración sobre las condiciones agronómicas que determinaron el cultivo experimental y los aspectos fitosanitarios que se presentaron durante el ciclo (Jeuffroy y Ney, 1997).

Respecto al experimento en campo, la edad cronológica al final del ciclo productivo fue de 180 dds equivalente a 3336 grados día ( $^{\circ}\text{Cd}$ ) en tiempo térmico, aunque se permitió continuar el cultivo hacia los 203 dds para tomar medidas de rendimiento y crecimiento de raíz; la etapa de desarrollo vegetativo culminó con 53 y 45 hojas completamente expandidas para las variedades 0615 y 0505 respectivamente, con una acumulación máxima de unidades de calor o tiempo térmico de  $3726^{\circ}\text{Cd}$  al final del periodo extendido.

La temperatura diurna de la zona de Duitama fue relativamente alta con respecto a los registros históricos y a los de las demás localidades de referencia, más adelante se presenta su efecto sobre el desarrollo de la remolacha azucarera. Al comparar con las localidades de Toca a 2700 msnm (con temperatura promedio de  $13^{\circ}\text{C}$ ) y Soracá a 2800 (con promedios de  $14,2^{\circ}\text{C}$ ), que se encuentran en la región del valle del río Chicamocha, la zona de Duitama con una altitud de 2500 msnm, presentó altas temperaturas diurnas y alcanzó la temperatura promedio de  $18,1\pm 0,03^{\circ}\text{C}$ . Aunque el cultivo tuvo una tasa inicial de emisión foliar (TEF) similar a la observada en otros ensayos, el cierre de calle en el experimento se presentó por completo entre el día 70 y 74 dds para las dos variedades ensayadas (entre 1400 y  $1480^{\circ}\text{Cd}$ ), tiempo que fue más corto al reportado en los cultivos en comparación con cierre de calle a los 80 días (Syngenta –comunicación personal–, Diciembre de 2009).

Sin embargo, respecto a la relación morfofisiológica esperada entre la profundidad de la vena media de los pecíolos de las hojas 7 y 8 con alguna de las variables que se midieron en el experimento no hubo correlación (bajos coeficientes de correlación de Pearson y representación en el análisis de componentes principales, anexo M); en la literatura se reportan como hojas totalmente maduras, completamente expandidas que han alcanzado su

tamaño máximo, que con alta probabilidad alcanzan la mayor intercepción de luz y están lo suficientemente distantes de la senescencia (Li *et al.*, 1992), lo cual es cierto para las etapas tempranas de desarrollo en la fase vegetativa; sin embargo, en la fracción avanzada del cultivo forman parte del tercio inferior, que corresponde a hojas senescentes, por esta razón se sugiere para el futuro considerar hojas de referencia por ubicación dentro del tercio medio, debido a que existe una continua dinámica posicional de cada hoja número en el dosel.

### ***Temperatura base (T<sub>b</sub>)***

La remolacha azucarera presenta una temperatura base debajo de la cual no crece, una temperatura óptima en la que crece a una tasa máxima, que se reporta en 18°C, y una temperatura máxima límite por encima de la cual no hay crecimiento (Baker y Reddy, 2001; Kenter *et al.*, 2006).

Aunque las plantas de una misma especie pueden presentar diferentes temperaturas base (*T<sub>b</sub>*) en distintas fases de su ciclo productivo (*i.d.* fase vegetativa y fase reproductiva), en el caso de la remolacha azucarera es posible asumir una *única T<sub>b</sub>*, ya que durante todo su ciclo como cultivo de acumulación de azúcar en raíz se mantiene en la fase vegetativa; y su máximo crecimiento radical se obtiene dentro de esta fase (Jeuffroy y Ney 1997).

De acuerdo con la escala de desarrollo BBCH, la *T<sub>b</sub>* fue determinada durante la etapa 14 por un método analítico usando un fitotrón (*i.d.* con 4 hojas desplegadas completamente expandidas), ya que se encontraba dentro de la fase vegetativa y posibilitaba el manejo de un número adecuado de repeticiones dentro del fitotrón para determinar las respectivas tasas relativas de crecimiento (TRC) en el tiempo para cada una de las variedades.

La TRC de las plantas de remolacha en varias temperaturas consecutivas decrecientes mostró un valor ralentizado progresivo, y con la temperatura de 1,8°C se registró un crecimiento lo significativamente bajo como para considerarla como un punto práctico para el *T<sub>b</sub>*, con una TRC de 0,000356 g g<sup>-1</sup>día<sup>-1</sup> y de 0,000740 g g<sup>-1</sup>día<sup>-1</sup> para las variedades 0615 y 0505 respectivamente. Para efectos prácticos, primero, conociendo el límite histórico de temperaturas máximas en el valle del río Chicamocha, y segundo, teniendo en cuenta este

conocimiento sobre las variedades estudiadas en condiciones del experimento, se puede afirmar que el cultivo tuvo la temperatura disponible para alcanzar algún rendimiento, debido a que tanto en la localidad en la que se ubicó el experimento, como por la información histórica que se tiene para este y los otros puntos de la región, no han sido alcanzadas temperaturas similares o más bajas a la  $T_b$  determinada, por el contrario se reportó ligeros incrementos respecto a las temperaturas mínimas anuales. Este panorama presenta a esta región de Boyacá como potencial para el establecimiento de este cultivo.

Retomando los supuestos de Baker y Reddy (2001), para las condiciones consideradas en esta investigación la predicción de eventos de desarrollo en remolacha azucarera a través de la metodología de unidades de calor es válida, ya que: *i*) la tasa de desarrollo fue lineal en el rango de temperatura experimentada, *ii*) las temperaturas diarias no alcanzaron a ser menores a la  $T_b$ , ni mayores al umbral superior de temperatura reportado en literatura (Anexo A, Anexo E), y *iii*) la temperatura diaria promedio del aire y del tejido en crecimiento en la planta fue la misma.

Para este último supuesto de la metodología, se asumió la temperatura registrada por la sonda precisa de penetración marca Testo AG 0610 1725/810 instalada a 20 cm bajo la superficie del suelo, como la temperatura a la cual los tejidos de la raíz de remolacha se expusieron, la cual se comparó con la temperatura del aire al nivel del dosel a través del data logger TESTO 175-T2 LOGGER ubicado a 20 cm sobre la superficie del suelo. No se encontraron diferencias significativas entre los promedios de temperaturas diarios entre ambos puntos (anexo A). De hecho, los valores calculados de tiempo térmico del modelo presentan similitud con los calculados a partir de la temperatura subterránea mencionada.

## ***Crecimiento***

### ***Índices de Crecimiento***

El *índice de área foliar* en las dos variedades de remolacha azucarera presentó un incremento similar hacia los 1500°Cd (75 dds), a partir del cual la variedad 0505 mostró mayores valores de IAF, y alcanzó su valor máximo de 8,8 alrededor de los 2900 °Cd (154 dds), mientras que la variedad 0615 alcanzó su IAF máximo de 8,2 alrededor de los 2700

$^{\circ}\text{Cd}$  (144 dds). Es decir que la variedad 0615, aunque presentó menor IAF en la parte final de la fase vegetativa del cultivo, alcanzó más pronto el tamaño máximo de su sistema fotosintético; este resultado es relevante en el sentido que la duración entre la etapa inicial y final de crecimiento del dosel afecta la distribución de peso seco hacia el órgano de almacenamiento (Milford, 2006).

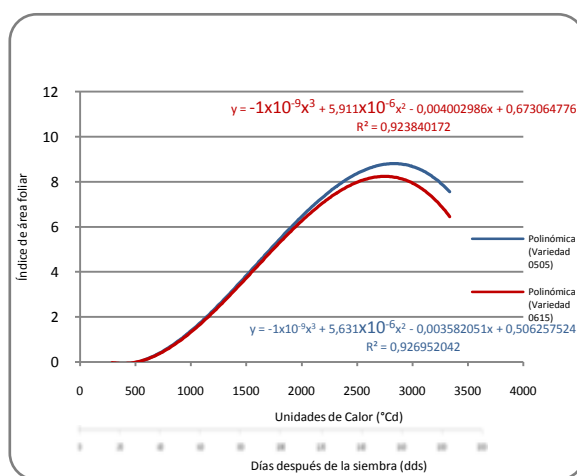


*Figura 9. Hojas en una planta de remolacha azucarera, en la parte superior se separa las hojas 1-45, en la parte inferior 4 agrupaciones de hojas que se encontraron insertadas a la corona.*

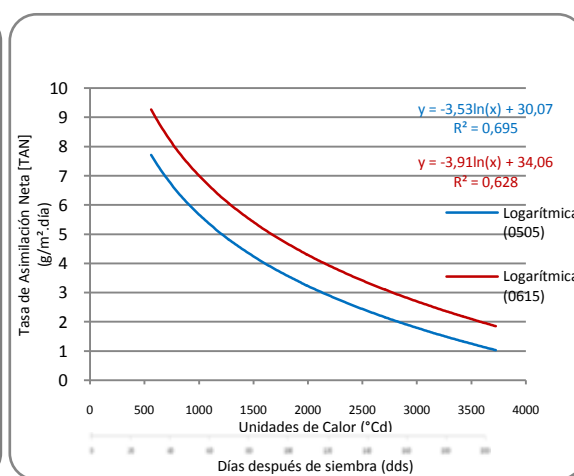
La variedad 0505 en todo el lapso del cultivo solo presentó sus hojas más largas alrededor de los 150 dds (IAF máximo para la variedad 0505), entre las hojas 36 a 40 (29,2 y 32,0 cm). Consideración que fue reportada por Bell *et al.* (1996), que mencionan que el tamaño de la parte aérea y el índice de área foliar (IAF) son máximos, cuando la hoja más grande completa su expansión.

Los IAF máximos fueron alcanzados un mes después –a los 500°Cd– de la aparición de grupos de hojas externos a la filotaxia principal de ambas variedades de remolacha azucarera (*Figura 9*). La aparición de estos grupos de hojas coincidió con la TCC máxima de las variedades.

El mayor valor de IAF indica mayor tamaño del sistema de hojas para interceptar la luz en la variedad 0505 respecto a la variedad 0615, lo que no significa un mayor desarrollo, pues el número de hojas es el que lo define –lo cual se discute en los resultados de desarrollo–, ya que por su parte la variedad 0615 es la que alcanza mayor desarrollo de hojas, con mayor número de ellas hacia el final del ciclo del cultivo (*Figura 10*).



*Figura 10. IAF en remolacha variedades 0505 y 0615.*



*Figura 11. TAN en remolacha variedades 0505 y 0615*

A partir de los 2800°Cd (150 dds), se presentó una fuerte disminución del IAF –principalmente en 0615–, que coincide con el cambio de apariencia general del cultivo, que pasa de tener un aspecto verde a presentar un dosel verde con una base amarilla por las hojas senescentes.

El IAF se puede relacionar con la producción de materia seca en la planta, puesto que al alcanzar el máximo tamaño del sistema fotosintético, se espera un efecto incremental sobre la producción de materia seca debida a la fotosíntesis, lo cual coincide con la etapa de llenado final del vertedero del cultivo. Los puntos máximos de IAF se pueden apreciar visualmente en el cultivo y se anticipan al momento oportuno de cosecha, que se alcanzó después de 500°Cd a partir del punto en que los IAF fueron máximos.

Actualmente las variedades en este estudio se siembran con la misma distribución de cultivo, con distancias de 24 cm entre las plantas y 50 cm entre surcos; sin embargo, este índice es un punto de referencia para el manejo de densidades de población. Un material vegetal con alto índice de área foliar como la variedad 0505, expuesto a condiciones de alta densidad puede presentar mayor competencia intraespecífica, en contraste, la variedad 0615 de remolacha azucarera presentó un menor IAF bajo la misma distribución de campo, por lo que para futuras pruebas de campo se sugiere ensayar una densidad de población mayor, lo que puede permitir el aumento en la captación de radiación y por consiguiente incrementos en su actividad fotosintética como cultivo, y a la vez aprovechar su condición de variedad de alto rendimiento. Lo anterior se puede relacionar con la observación de campo sobre la arquitectura diferencial del dosel para las dos variedades, que en la variedad 0615 presentó un aspecto más erectófilo, y en la 0505 uno relativamente más planófilo (ver página 69, discusión del coeficiente de extinción de luz [ $k_i$ ]); sin embargo, esto se limita a ser una observación cualitativa de arquitectura, debido a que no se tomaron registros de ángulos en la muestra, pero sirve para prever una planeación óptima en la distribución de próximos cultivos de la variedad 0615.

Para la expansión en promedio de cada hoja de remolacha se necesitó de  $56^\circ\text{Cd}$  y  $54^\circ\text{Cd}$  para la variedad 0505 y 0615 respectivamente; y se requirió en promedio de  $125^\circ\text{Cd}$  y  $132^\circ\text{Cd}$  para alcanzar 0,5 unidades en expansión del IAF, que fueron valores menores comparados con lo reportado por Milford (2006) para el que la expansión del IAF la estimó en el rango de 0,5 a 1 unidad cada  $100^\circ\text{Cd}$  de tiempo térmico en cultivos comerciales, y la aparición de cada nueva hoja fue cada  $30^\circ\text{Cd}$  de tiempo térmico, resultados que no fueron afectados significativamente por el suministro de agua o nutrientes. Debido a que el desarrollo está fuertemente influenciado por la temperatura (Milford 2006), y a que los resultados de este experimento tampoco estuvieron influenciados por el suministro de agua o nutrientes, las diferencias entre lo reportado y los valores de esta investigación se atribuyen a diferencias varietales de los materiales en estudio.

Los resultados del sistema de hojas presentan un contraste entre su crecimiento y desarrollo, consistente con lo reportado en literatura sobre la diferencia en tasas de crecimiento como el IAF y tamaño final del dosel, que son respuesta a las tasas de

crecimiento y tamaño final de las hojas individuales, y no a diferencias en el desarrollo o número de hojas (Milford, 2006).

Aunque no se han medido valores de IAF para remolacha azucarera de referencia en otras zonas dentro de la región del Valle del Río Chicamocha, una alta temperatura como la experimentada en el ICA-Surbatá, permitió un rápido desarrollo de las hojas.

El valor máximo de IAF encontrado en esta investigación es superior al reportado en otras investigaciones, como en el valle del Cauca con IAF máximo de 6,4 (Bruzón, 2007), y de 5 en cultivos establecidos en Inglaterra (Milford, 2006).

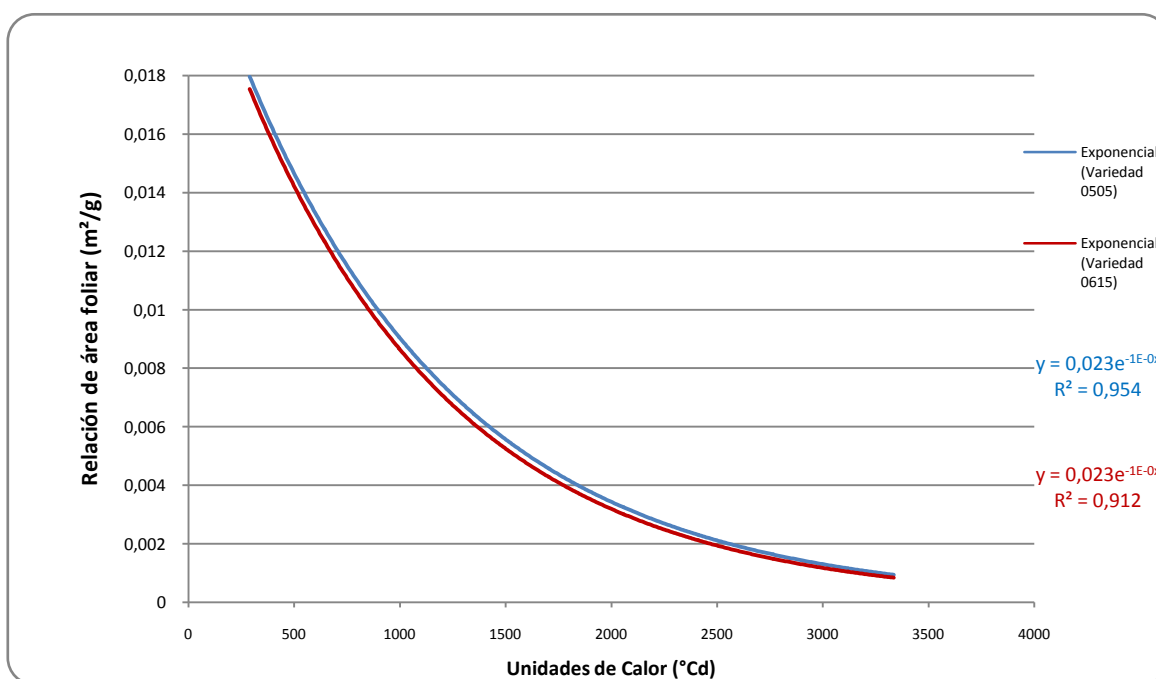
Por su parte, la *tasa de asimilación neta* (TAN) es mayor al inicio del cultivo, cuando las plantas no están expuestas a competencia interespecífica y la radiación fotosintéticamente activa es alcanzada plenamente por las plántulas de remolacha azucarera. En la variedad 0615 se determinó una TAN máxima de  $9,3 \text{ g.m}^{-2}.\text{día}^{-1}$  seguida por la de la 0505 con  $7,7 \text{ g.m}^{-2}.\text{día}^{-1}$  alrededor de los  $500^{\circ}\text{Cd}$  (24 dds), momento en que estas variedades presentan alta asimilación neta de carbono. Estos valores máximos en la etapa inicial del ciclo de cultivo se explican por la ausencia de competencia y plena exposición foliar a la radiación fotosintéticamente activa ( *Figura 11*).

Las variedades de remolacha azucarera presentaron diferencias, siendo la 0615 la variedad con mayor eficiencia de su sistema fotosintético, lo que se mantuvo durante todo el ciclo de cultivo. Como normalmente sucede, la TAN disminuye hacia el final del ciclo debido al autosombreamiento del cultivo y al cierre de calle, pero la tendencia mencionada sobre la eficiencia fotosintética de la variedad 0615 se mantuvo.

Bajo las mismas condiciones edafoclimáticas, en especial referido a la parte térmica en la que se centró esta investigación, los valores de TAN para la variedad 0615 son superiores a los de la variedad 0505 durante todo el ciclo, lo que significa mayor producción de materia seca por unidad de área foliar por unidad de tiempo, reiterando la mayor eficiencia fotosintética de 0615 con respecto a la variedad 0505.

Debido a la relación de las hojas de remolacha azucarera con el llenado de la raíz –que se amplía más adelante en los resultados de desarrollo– (*Figura 27, Figura 28*), es relevante considerar la medición derivada “relación de área foliar” (RAF).

De acuerdo a la RAF, los valores instantáneos ligeramente mayores en la variedad 0505 respecto a la 0615, indican una mayor asignación del peso seco de la primera variedad hacia la conversión de área de hojas, lo que coincide con el resultado que muestra el IAF (*Figura 10*) en el que a pesar que el IAF máximo es alcanzado más rápido por la variedad 0615, es la variedad 0505 la que logra mayor área de hojas por metro cuadrado de suelo, y alcanza mayor área captadora de luz.



*Figura 12. RAF en remolacha variedades 0505 y 0615*

La tendencia general de la curva de RAF es decreciente con el desarrollo del cultivo debido a la activa acumulación de peso seco, principalmente por el aumento del peso del órgano vegetativo cosechable, que incrementa en gran proporción el peso de los tejidos capaces de respirar. Esta diferencia entre las variedades puede estar relacionada con un mayor peso por planta de la variedad 0615.

Para analizar este resultado con mayor detalle se examina a continuación los componentes de la RAF: el área foliar específica (AFE) y la relación de peso foliar (RPF).

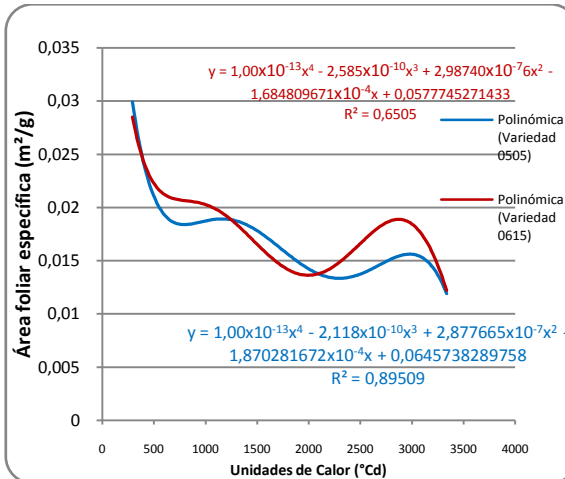


Figura 13. AFE en remolacha variedades 0505 y 0615

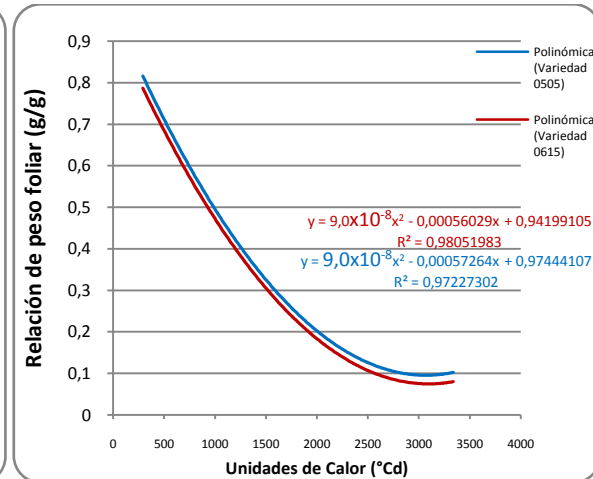


Figura 14. RAF en remolacha variedades 0505 y 0615

El AFE es superior en la variedad 0615 de remolacha azucarera durante casi todo el ciclo respecto a la variedad 0505, excepto cuando la primera se encuentra en la etapa de cobertura del cultivo –analizada posteriormente en los resultados de desarrollo–; hubo mayor aparición de hojas para la variedad 0615 durante el ciclo del cultivo, que aunque no presentó el mayor IAF, si alcanzó un mayor grosor relativo de la capa de hojas respecto a la variedad 0505 ( ).

La mayor densidad de hojas de la variedad 0615 podría estar involucrada con el aspecto más erectófilo respecto a la variedad 0505, lo que se explica más adelante para el coeficiente de extinción de luz [ $k_i$ ].

Finalmente, la RPF es mayor en la variedad 0505 que en la 0615 durante todo el ciclo, es decir que de la acumulación de materia seca total, la variedad 0505 asigna más porcentaje hacia el peso de sus hojas que 0615, coherente con el anterior análisis de los resultados para los índices de crecimiento de ambas variedades, en el que es consistente una mayor producción del tejido foliar de 0505 con respecto al peso seco total ( Figura 14).

En consecuencia, el análisis de componentes de RAF permitió verificar que la variedad 0505 presenta un mayor compromiso con el alcance de mayor área captadora que la variedad 0615 de remolacha azucarera, pese a su menor desarrollo relativo de hojas.

Al analizar este resultado junto con el de IAF, es conveniente considerar que cuando se extiende la etapa de desarrollo de hojas (hasta IAF máximo) y en consecuencia el crecimiento foliar como lo hace la variedad 0505 en términos relativos a la variedad 0615, incrementa la relación parte aérea:subterránea hacia la cosecha, lo cual es inconveniente para el rendimiento ya que se disminuye la proporción de peso seco asignado hacia las raíces del cultivo, que es el órgano vegetativo cosechable (Milford 2006).

La *tasa de crecimiento del cultivo* (TCC), mostró que la variedad 0615 presenta una mayor acumulación de peso seco diario por metro cuadrado de suelo, durante las etapas de desarrollo de la fase vegetativa respecto a la 0505. La TCC de la variedad 0505 fue menor, si bien esta variedad expone mayor área foliar (asigna más peso hacia la parte aérea), se debe considerar que lo hace con un menor desarrollo de hojas; y la variedad 0615 por su parte asigna más peso hacia la raíz que es el principal órgano de acumulación, exhibiendo mayor ganancia relativa diaria en peso de raíz por metro cuadrado de suelo, por tanto mayor TCC. La máxima tasa de crecimiento del cultivo (TCC) de las variedades 0615 y 0505 del estudio se presentó a los 2200°Cd (116 dds), en la etapa de llenado de la raíz con un valor de 37 g.m<sup>-2</sup>.día<sup>-1</sup> y 31 g.m<sup>-2</sup>.día<sup>-1</sup> respectivamente, valores comparables con las tasas de crecimiento de cultivos con metabolismo C3.

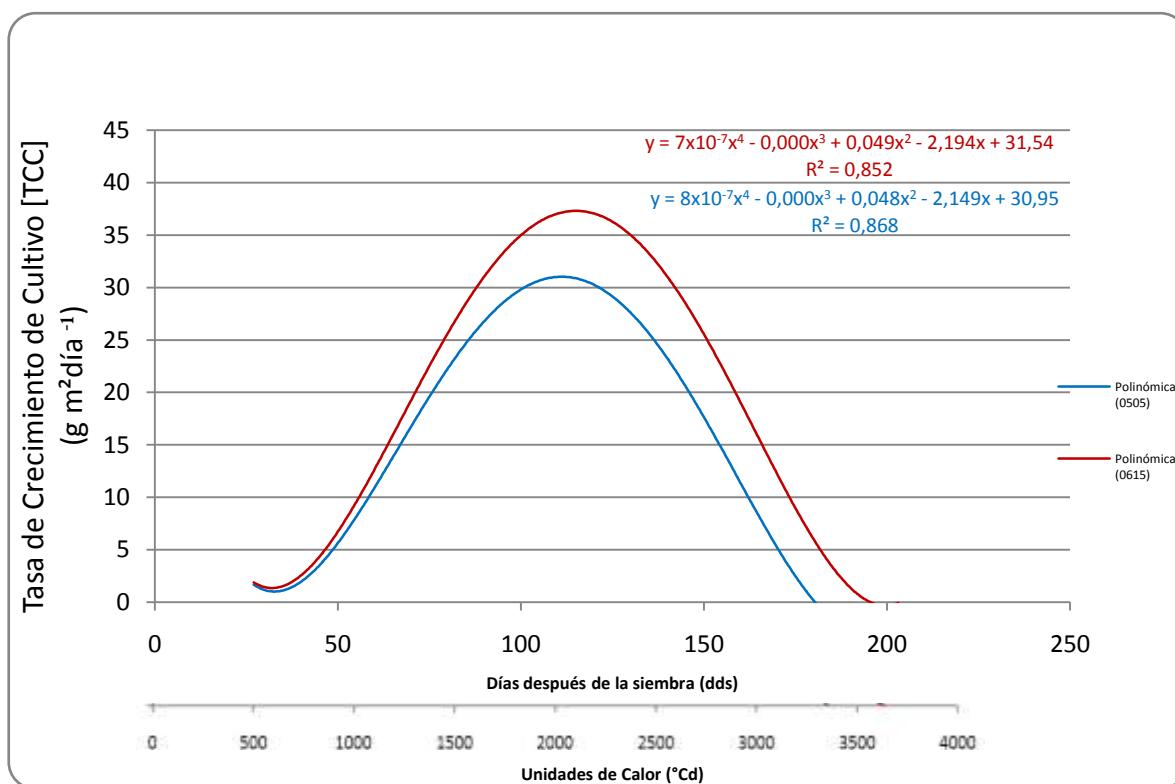


Figura 15. Tasa de Crecimiento del Cultivo de Remolacha Azucarera variedades 0505 y 0615, sembradas en el ICA-Surbatá (Duitama).

La literatura reporta alta eficiencia de la remolacha en ganancia de peso diario de raíz por metro cuadrado de suelo (Gardner *et al* 1985), en la que la TCC continúa en aumento por encima de un IAF de 5 ( $21\text{-}29 \text{ g m}^{-2} \cdot \text{día}^{-1}$ ), lo que es consistente con estos resultados, ya que el cultivo se encontró con un IAF de 7,5 en el momento de alcanzar la TCC máxima mencionada anteriormente.

### Distribución del peso seco

La distribución del peso seco en el cultivo de remolacha azucarera presenta una respuesta de acuerdo a la variedad, que se observa a través de la alometría. Una determinación cuantitativa que permitió analizar la “asignación relativa al crecimiento” para cada variedad.

En la ecuación convencional para la relación potencial de alometría de la forma  $Y = b \cdot X^k$ , la constante de alometría ( $k$ ) describe la relación que existe entre las hojas y el sistema radical.

Para su determinación se hizo la respectiva transformación de datos de peso seco aplicando logaritmo a los valores de cada eje para determinar el  $k$  como una pendiente de una ecuación lineal, que a su vez presentó altos coeficientes de determinación entre peso seco de hojas y raíces de 0,939 y 0,935 para las variedades de remolacha 0505 y 0615 respectivamente.

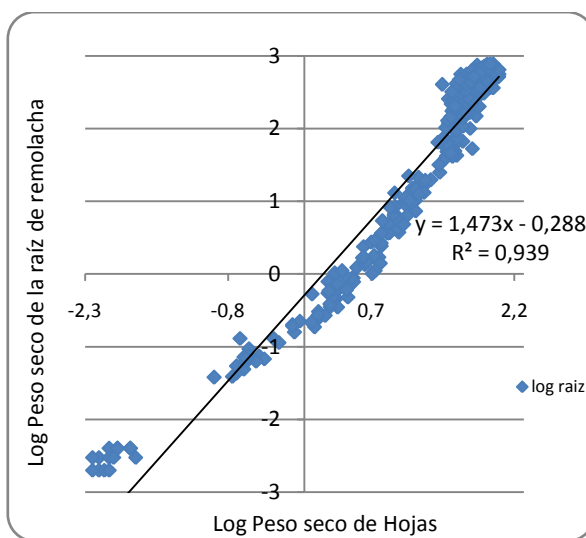


Figura 16. Alometría variedad 0505 de remolacha.

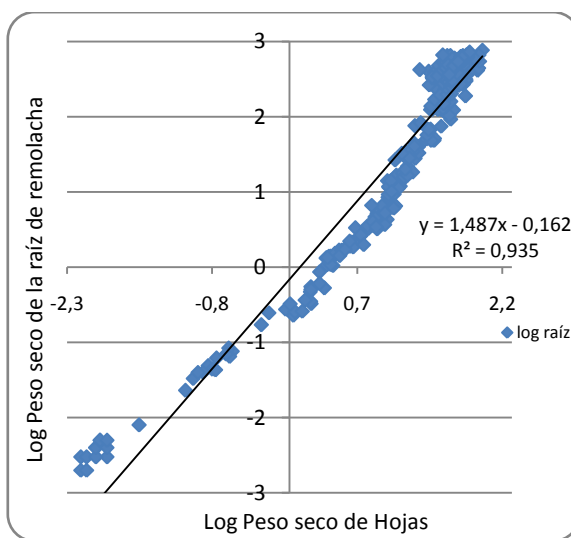


Figura 17. Alometría variedad 0615 de remolacha.

Para las anteriores ecuaciones lineales, la variedad 0615 de remolacha azucarera presentó el valor de pendiente de 1,487 (Figura 17), mayor al de la variedad 0505 que fue de 1,473 (Figura 16), que corresponden al coeficiente de alometría, que de acuerdo a los datos linealizados se expresa en términos del incremento unitario en el logaritmo del peso seco de hojas de remolacha sobre el incremento en el logaritmo del peso seco de raíz de remolacha azucarera.

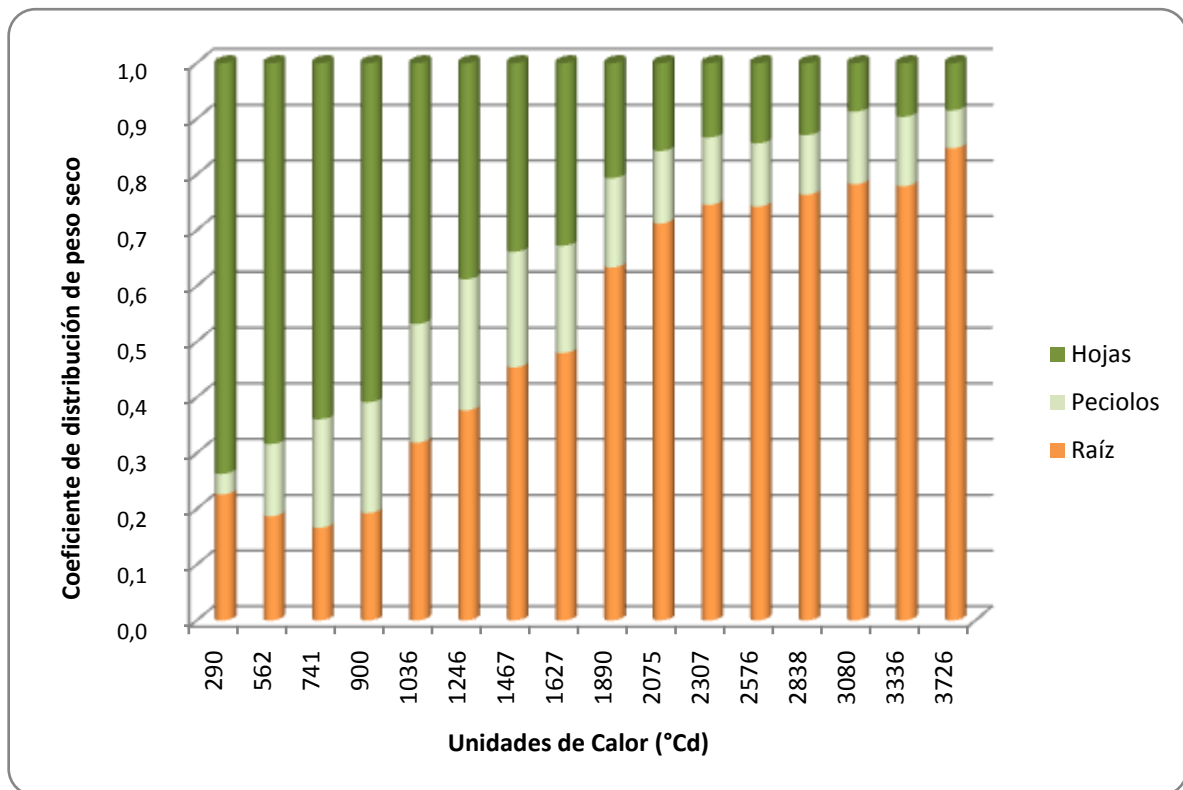


Figura 18. Distribución de peso seco de la variedad 0505

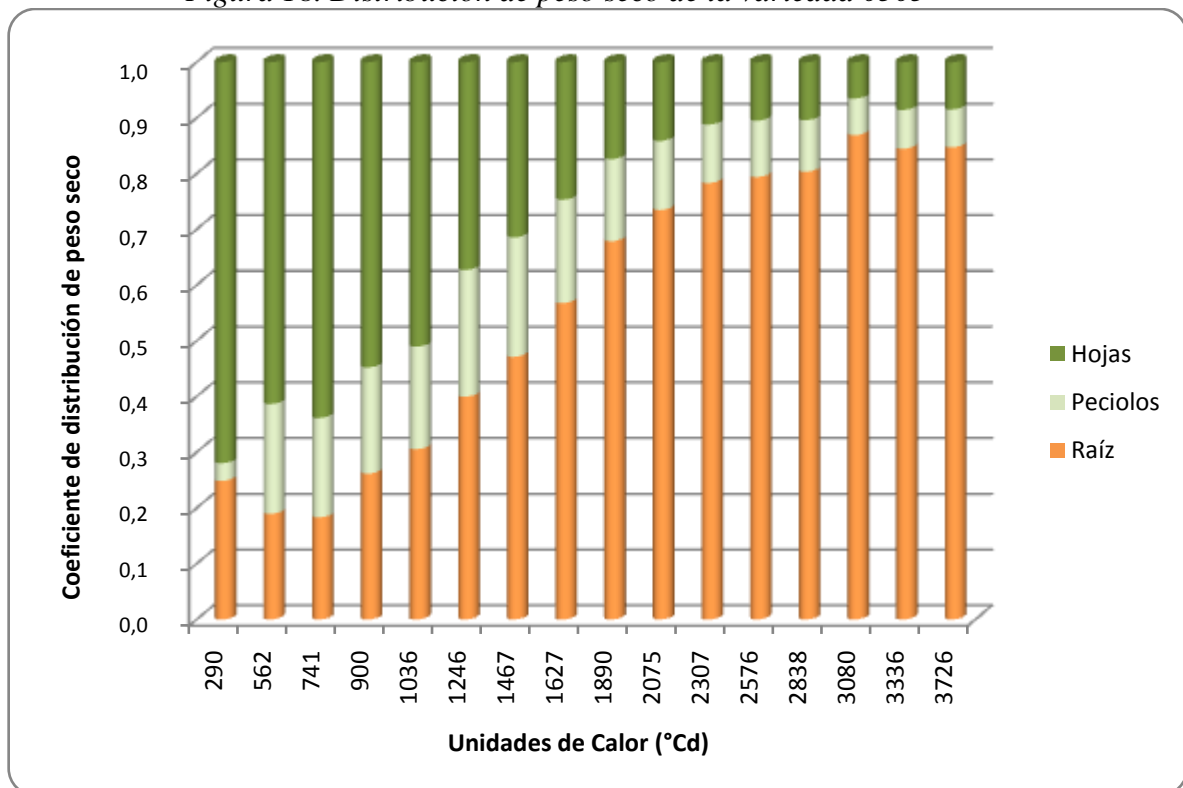
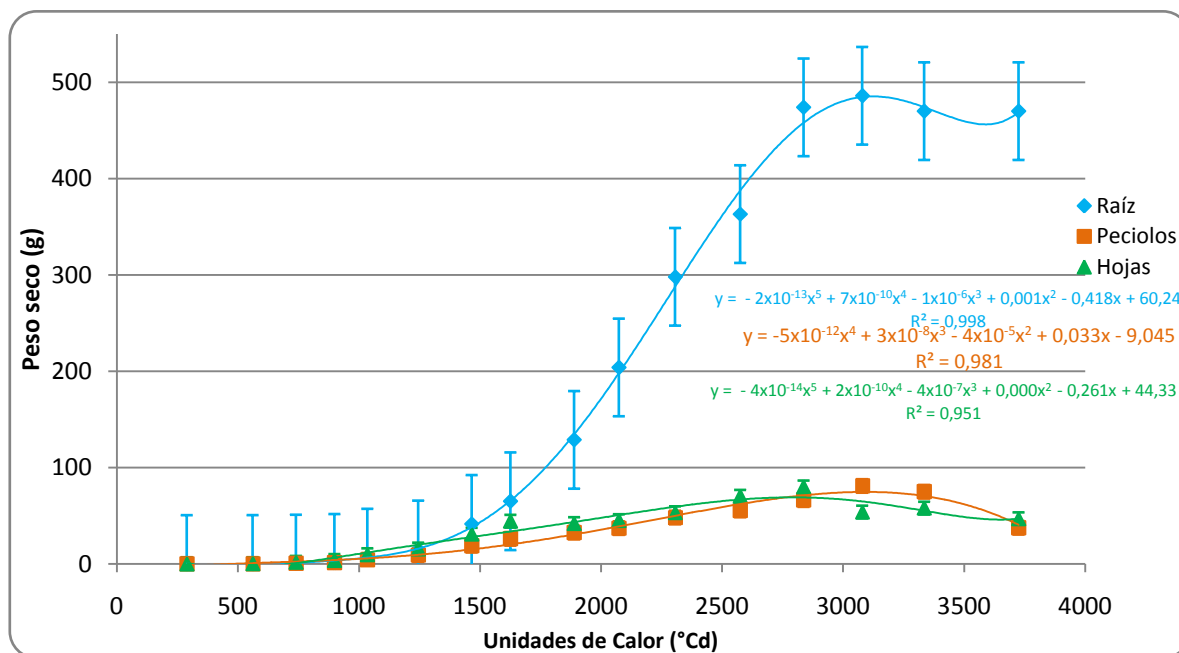


Figura 19. Distribución de peso seco en la variedad 0615

Los valores de  $k$  para las variedades 0505 y 0615 de remolacha azucarera de 1,473 y 1,487 respectivamente, indican mayor crecimiento de la raíz en ambas variedades de remolacha azucarera respecto al peso seco de sus hojas; aunque no se presenta evidencia estadística sobre diferencias significativas entre el coeficiente de alometría de las variedades, la variedad 0615 presenta ligeramente mayor asignación relativa de asimilados hacia la parte radical. Una condición que cobra relevancia debido a que la asignación de asimilados hacia un órgano está relacionada con el tamaño del órgano, en este caso el órgano vegetativo cosechable.

La distribución del peso seco explicó la asignación relativa de remolacha azucarera hacia cada órgano a lo largo del cultivo, a medida que avanza el cultivo respecto a la etapa de desarrollo de la fase vegetativa se mostró un coeficiente de migración de materia seca dinámico (*Figura 18 y 19*).

Este coeficiente fue inicialmente mayor en hojas, y después de 1100-1250°Cd (54-62 dds) hasta el final del cultivo fue mayor en raíz. Debido a la formación y desarrollo inicial de los órganos fuente, que progresivamente es dominado por la traslocación de asimilados hacia el vertedero, incrementando el peso seco del órgano vegetativo cosechable.



*Figura 20. Patrón de distribución de peso seco durante el ciclo de la variedad 0505*

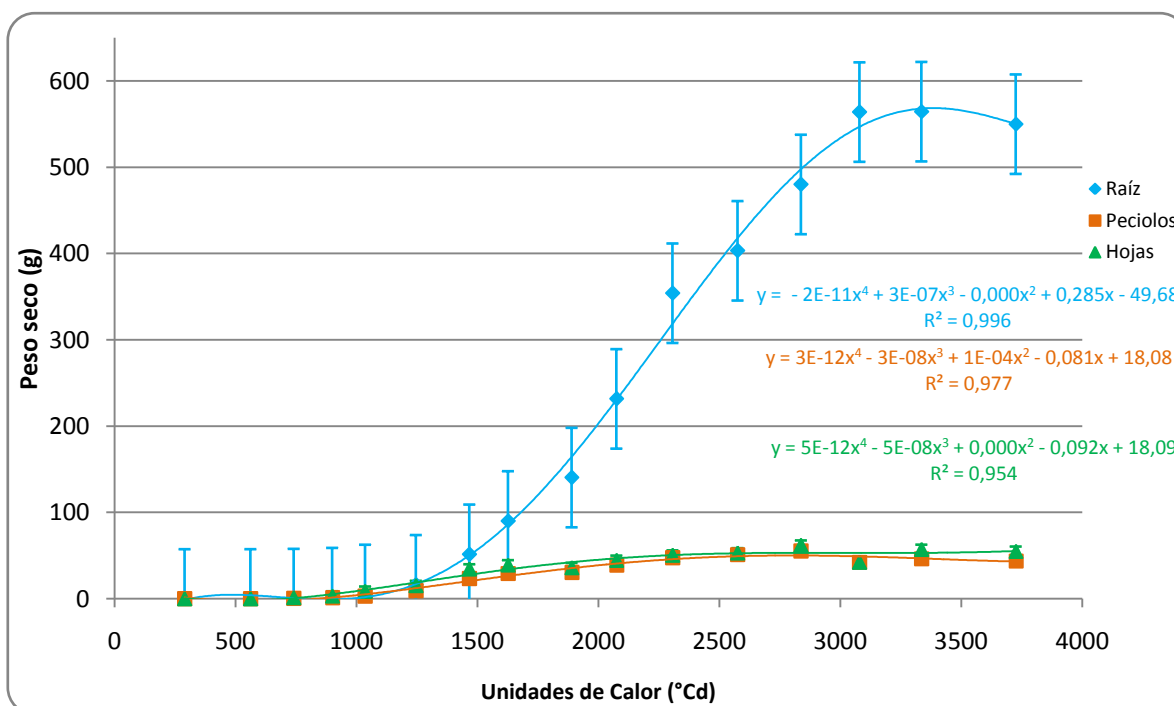


Figura 21. Patrón de distribución de peso seco durante el ciclo de la variedad 0615.

La distribución de fotoasimilados de la fuente (hojas y pecíolos), respecto al peso seco total disminuyó con el avance del cultivo. Al inicio se presentó una inclinación de la distribución de peso seco hacia los tejidos de los órganos fuente, y menor en los tejidos de la raíz; mientras que la distribución del órgano de almacenamiento incrementó después de 1100-1250°Cd hasta el momento oportuno de cosecha.

Para el momento oportuno de cosecha (en la página 94 se analiza su determinación), los coeficientes de distribución de peso seco de la raíz fueron de 0,779 y 0,845 para las variedades 0505 y 0615 respectivamente; mientras que los coeficientes de hojas y pecíolos, fueron de 0,096 y 0,124 para la variedad 0505, y de 0,086 y 0,070 para la variedad 0615.

Estos resultados coinciden con lo reportado por Bell *et al* (1996) de distribución de peso seco para este cultivo de 0,2 hacia la parte aérea y 0,8 hacia la raíz en la cosecha, distribución de peso seco que se presenta en forma progresiva.

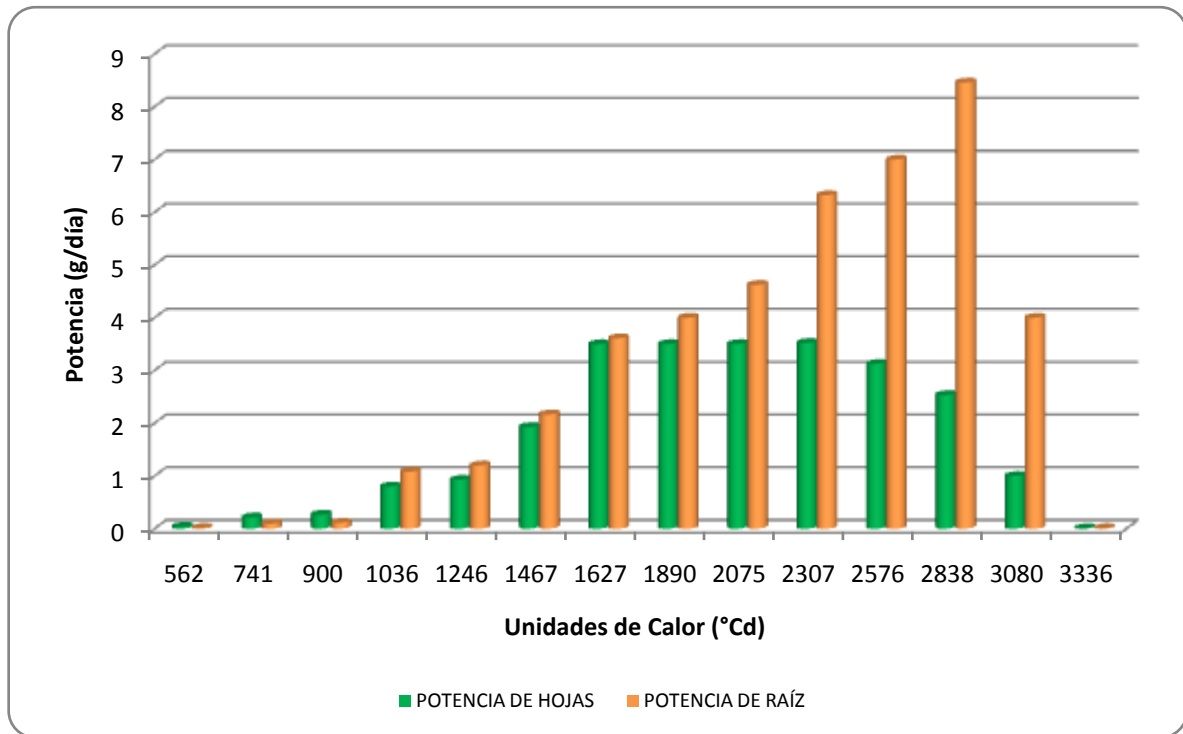


Figura 22. Potencial entre fuente y vertedero en la variedad 0505

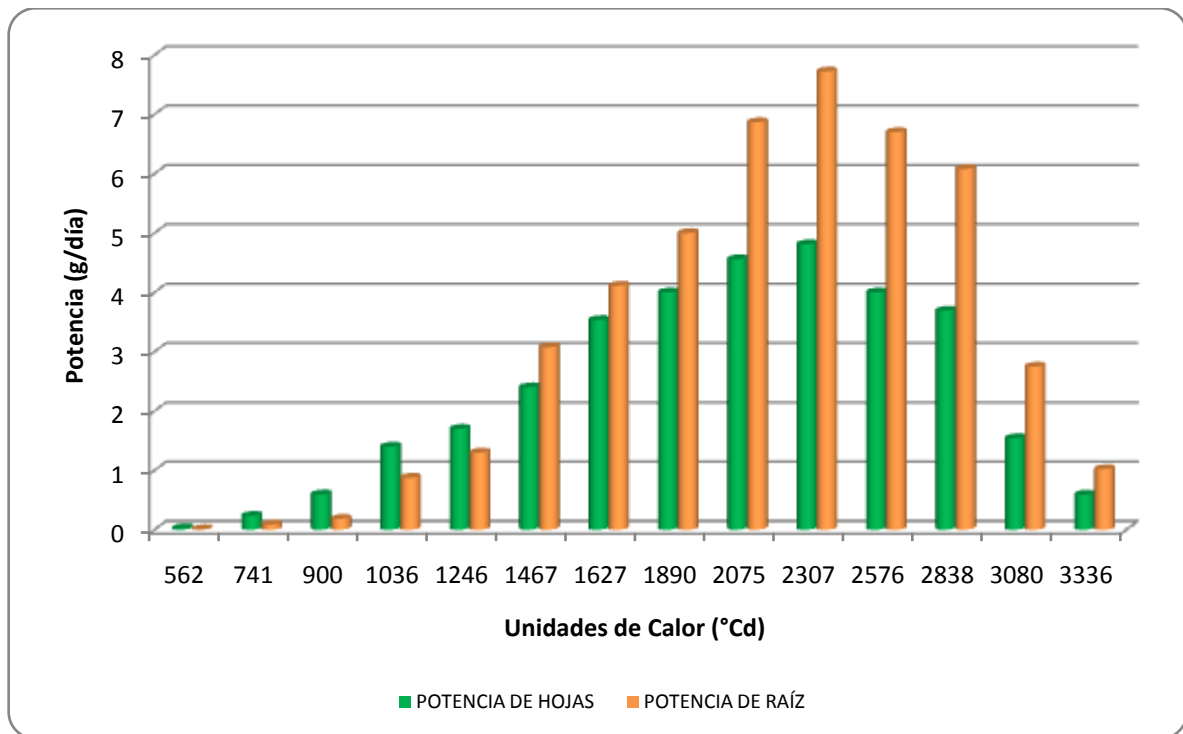


Figura 23. Potencial entre fuente y vertedero en la variedad 0615

La variedad 0505 presentó mayores coeficientes de distribución de peso seco para la parte aérea y menores coeficientes para la raíz en comparación con la variedad 0615. Sin embargo, la distribución de fotoasimilados desde la fuente hacia el vertedero fue progresiva durante el experimento. Esta distribución de peso seco hacia la raíz inició tardíamente en la variedad 0505 respecto a la 0615, lo que está relacionado con un desarrollo más rápido en la variedad 0615.

A partir de la emergencia y durante la parte inicial, las dos variedades presentaron alta potencia de la fuente, esto produjo una distribución de asimilados preferencial hacia los órganos de la parte aérea. Sin embargo, la fuerza de las hojas como órgano para producir fotoasimilados, fue progresivamente superada por la de la raíz (*Figura 22 y 23*).

La potencia de la fuente en la variedad 0615 fue mayor que la variedad 0505 al principio del cultivo; mostró una rápida asignación hacia la parte aérea probablemente asociada al mayor desarrollo inicial de hojas que alcanzó esta variedad, hasta 2300°Cd (121 dds), a partir del que disminuye su potencia con el avance en la etapa de desarrollo de raíz, mientras que la potencia de la fuente en 0505 aumentó hasta 1640°Cd (83 dds) y permaneció alta hasta su IAF máximo, después del cual disminuyó rápidamente.

La potencia de la raíz fue incremental para ambas variedades; sin embargo, la variedad 0615 alcanzó más rápido la máxima potencia a los 2300°Cd (121 dds), es decir que desarrolló más rápido la habilidad para atraer sacarosa hacia la raíz y acumularla incrementando su peso seco, lo que se puede explicar por el rápido establecimiento y desarrollo de hojas. Mientras que la variedad 0505 consiguió su potencia máxima de vertedero más tarde hacia los 2900°Cd (154 dds), que coincide con el IAF máximo para esa variedad.

La variedad 0615 mostró un rápido desarrollo en la potencia tanto de la fuente como del vertedero, lo cual puede atribuirse a su mayor y más rápido desarrollo con respecto a la variedad 0505, un resultado que tiene efectos sobre el rendimiento que se presenta en la página 96.

Para concluir el análisis de crecimiento se hizo un modelo matemático multiplicativo determinístico que simula el crecimiento diario del cultivo y la distribución de peso seco por órgano (Anexo G); esta simulación solo puede utilizar el tiempo cronológico como referencia debido a que los registros de horas de brillo solar y temperatura de las estaciones meteorológicas disponibles en el país son diarios.

El modelo se definió con tres rangos de dominio de acuerdo a etapas de desarrollo dentro de la fase vegetativa, así: desde la siembra hasta los 74 dds en que los cultivos cerraron calle –poco después del inicio del desarrollo de raíz–, desde el cierre de calle hasta los 152 dds donde en promedio los cultivos alcanzaron el IAF máximo, y finalmente desde los 152 dds hasta el momento oportuno de cosecha –como se analiza en desarrollo y rendimientos– logrando disminuir a la vez el error cuadrado medio del modelo matemático de crecimiento.

La eficiencia en el uso de la radiación (RUE) fue de  $0,570 \text{ g.MJ}^{-1}$  y  $0,475 \text{ g.MJ}^{-1}$  para las variedades 0505 y 0615 respectivamente, menores comparadas con los valores estimados para otras variedades de remolacha de  $1,72 \text{ g.MJ}^{-1}$  y  $1,76 \text{ g.MJ}^{-1}$  reportados por Glauert's (1983) citado por Ritcher en el 2001. Incluso fue menor respecto al valor de  $0,900 \text{ g.MJ}^{-1}$  que se obtuvo para remolacha en condiciones variables de humedad del suelo (Richter *et al.*, 2001). Esta estimación fue consistentemente mayor al rango de la RUE estimada para cultivos de brócoli (*Brassica sp.*), clavel (*Dianthus caryophyllus*), estragón (*Artemisia dracunculus*), *Minthostachys mollis*, repollo (*Brassica oleracea*) y uchuva (*Physalis peruviana*), que implementaron la misma metodología.

En el experimento se presentó el IAF y la FLINT máximos, a los 154 dds y 126 dds para la variedad 0505 (8,8 y 0,996), y a los 144 dds y 122 dds para la variedad 0615 (8,2 y 0,996) respectivamente, de acuerdo a los valores simulados de la FLINT. La asíntota de la FLINT para ambas variedades se alcanzó antes del IAF máximo.

Durante la mayor parte del cultivo, el coeficiente de extinción de luz ( $k_i$ ) y la RUE fueron mayores para la variedad 0615, lo cual muestra, primero, la ventaja del dosel más erectófilo de esta variedad, lo que coincide con la observación hecha sobre los materiales

vegetales y el análisis del IAF, y segundo, que es mayor la cantidad de luz aprovechada por la variedad 0615, asociando un menor tamaño del sistema de hojas con una mayor RUE.

Los valores de los coeficientes de distribución del peso seco por órgano ( $\alpha_0$ ), mostraron una mayor asignación hacia raíces en la variedad 0615 con respecto a la variedad 0505 desde el cierre de calle hasta el final del cultivo; la última variedad a su vez asignó mayor proporción de peso seco hacia la parte aérea en términos relativos, tal como se ha discutido en el análisis de distribución de peso seco.

A continuación se presenta la tabla de los parámetros fisiológicos estimados del modelo de crecimiento y distribución de remolacha bajo las condiciones ecológicas del experimento en Duitama (Tabla 4).

**Tabla 4. Parámetros  $k_i$ , RUE,  $\alpha_h$ ,  $\alpha_p$ ,  $\alpha_r$  del modelo de crecimiento para las variedades 0505 y 0615 de remolacha.**

Parámetro	Variedad 0505			Variedad 0615		
	0-1479°Cd	1480-2800°Cd	2801-3300°Cd	0-1479°Cd	1480-2800°Cd	2801-3300°Cd
$k_i$	0,038	0,319	0,016	0,071	0,625	0,194
RUE	1,8	0,57	0,015	2,036	0,475	0,203
$\alpha_h$	0,309	0,113	0,125	0,329	0,051	0,010
$\alpha_p$	0,211	0,097	0,125	0,215	0,069	0,088
$\alpha_r$	0,480	0,790	0,750	0,456	0,880	0,812

Es relevante considerar que los valores del  $k_i$  estimados para ambas variedades de remolacha fueron bajos durante la etapa de desarrollo de aparición de hojas en plantas individuales –antes del establecimiento del dosel–, mientras que a partir del cierre de calle hasta el IAF máximo los valores del  $k_i$  fueron de 0,32 y 0,63 para las variedades 0505 y 0615 respectivamente, además, se mantuvo la tendencia inicial de un mayor  $k_i$  para la variedad 0615 con relación a la variedad 0505.

A partir del IAF máximo hasta la cosecha del cultivo los valores del  $k_i$  estimados disminuyeron sensiblemente debido a la reducción en el IAF que presentó cada variedad, el  $k_i$  continuó siendo mayor en la variedad 0615 respecto a la 0505. Hay disminución de la cobertura para la intercepción de la luz, probablemente debido a la reducción en el número de hojas por la senescencia y en consecuencia, parte de la radiación disponible no fue absorbida por el cultivo; igual a lo que sucedió en la etapa inicial del cultivo cuando las remolachas se comportaron como planta individual, y presentaron bajos valores del  $k_i$  estimados.

Si bien, los valores del  $k_i$  estimados son altos respecto a los valores obtenidos del  $k_i$  para otros cultivos hortícolas usando esta metodología, Andrieu *et al* citados por Lemaire *et al.* (2009) reportan un valor de 0,7 para el  $k_i$  de remolacha azucarera; este valor de la literatura es superior al estimado para las dos variedades de remolacha, siendo la 0615 (con 0,63) la más cercana a este valor (Lemaire *et al.*, 2009).

Es probable que la diferencia entre las variedades esté asociada con el desarrollo y la arquitectura del dosel; sin embargo, en general los cultivos presentaron pequeños parches con efecto en la emergencia –como se mencionó en la discusión sobre el cultivo–, que por pequeño que haya sido, al bajar ligeramente la densidad y las medidas derivadas del crecimiento –que son insumo de este modelo–, explica un valor relativamente menor del  $k_i$  estimado por esta investigación con respecto al de la literatura. Es probable que el incremento en la densidad de siembra, o un mejor control sobre las variables agronómicas mencionadas pueda mejorar la estimación de los valores del  $k_i$  y de la RUE en futuros cultivos (Ruiz y Bertero, 2008).

La RFA total incidente estuvo en función de la latitud, fecha de siembra y desarrollo diferencial por especie, y el modelo se limita a predecir el crecimiento del cultivo de remolacha en la localidad del experimento, bajo condiciones climáticas similares, que podrían presentarse durante el mismo semestre del año –con relación al clima histórico–; debido a esta limitación, conviene establecer futuros modelos para otras localidades y fechas de siembra con el fin de validar la simulación (Ruiz y Bertero, 2008).

En la práctica este modelo es útil para discutir diferencias entre las variedades, ya que tanto el manejo del cultivo, como el factor edafoclimático fue idéntico en el experimento para ambas variedades. La variedad 0615 tuvo mayores valores del  $k_i$  (captura del recurso luz) y de la RUE (transformación del recurso luz), lo que indica una mayor eficiencia en la conversión de fotoasimilados, que coincide con el resultado de TAN y del rendimiento.

Por su parte, el patrón de distribución de fotoasimilados evidenció las diferencias observadas entre variedades, en el que la variedad 0505 dirige ligeramente más del 6% de peso seco hacia la formación de hojas respecto a la variedad 0615; en contraste, la variedad 0615 dirige el 9% más del peso seco hacia la raíz respecto a la 0505 en la fracción intermedia del ciclo de cultivo, lo que refleja diferencias varietales en términos de relación fuente-vertedero, en que la variedad 0615 muestra mejores rendimientos relativos.

Con la información recogida en el experimento para la hoja 11, desde su expansión completa al mes y medio de iniciado el cultivo (900°Cd, inicio del cierre de calle) hasta el momento oportuno de cosecha. Para ambas variedades de remolacha en cada muestreo del experimento, se encontró alta correlación entre el ancho máximo de la hoja y la longitud máxima de la vena media, mostrando una tendencia que puede ajustarse a un modelo lineal. Sin embargo, el modelo logístico y el modelo geométrico modificado alcanzaron un ajuste mayor para las variedades 0505 y 0615 respectivamente; esta diferencia entre las relaciones anatómicas de largo y ancho muestra el efecto de variedad (Anexo K); un trabajo realizado en remolacha azucarera variedad Rizor estableció una relación lineal entre estas medidas (Tsialtas y Maslaris, 2005).

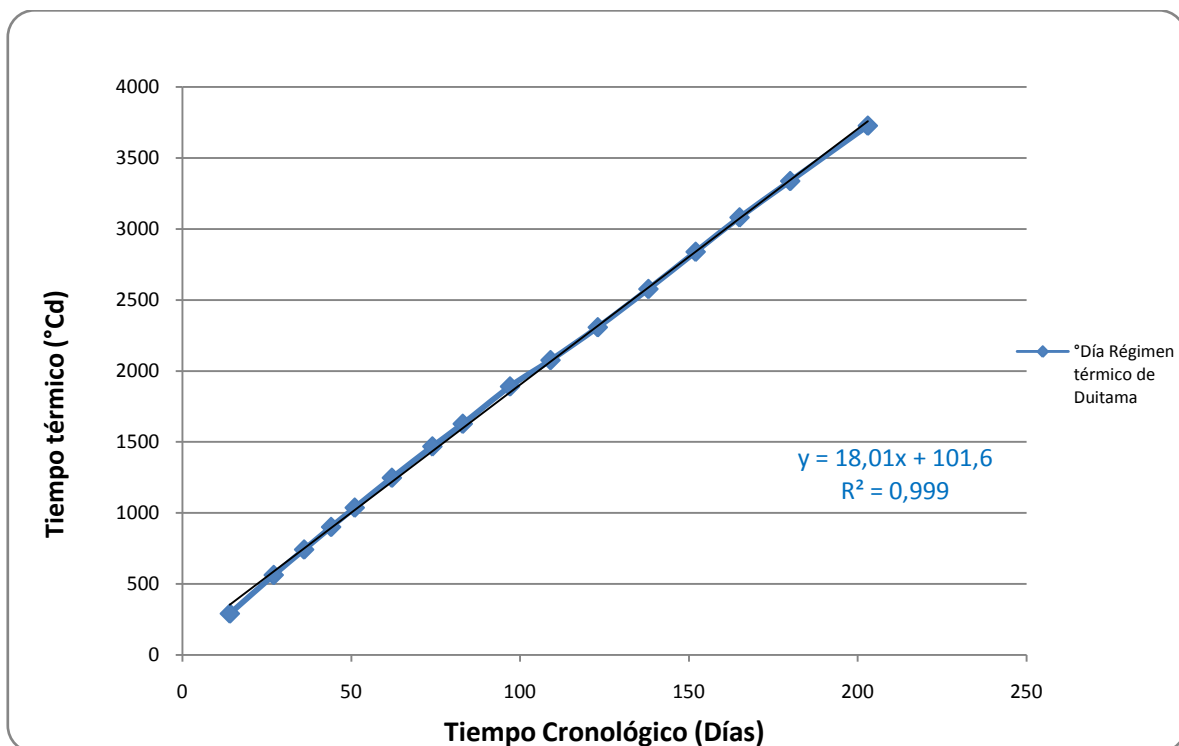
Lo relevante en estas asociaciones consistió en identificar la correspondencia en la morfofisiología de un cultivo como la remolacha azucarera, cuyo aparato de hojas tuvo un compromiso directo con el rendimiento del cultivo.

Finalmente, la discusión con base en variables lineales, superficiales de crecimiento y el número de unidades estructurales, mejoró el análisis de crecimiento, ya que, las medidas consideradas en conjunto para remolacha azucarera, mostraron finas diferencias entre variedades; por ejemplo, el mayor valor de una medida lineal, como el peso seco de hojas, y una superficial, como el área foliar (tamaño), que contrastan con el menor número de

unidades de hojas en la variedad 0505 con respecto a la variedad 0615, muestra que el crecimiento foliar no necesariamente está relacionado con un mayor número de hojas; destacando que el crecimiento foliar está involucrado en menor grado de lo esperado con el rendimiento del cultivo (peso de raíz), y el número de hojas está más asociado con el desarrollo.

### *Desarrollo*

Es relevante considerar la acumulación de unidades de calor de un cultivo, ya que alcanzar las diferentes etapas de desarrollo depende de la temperatura a que se expone durante el ciclo. En el caso de la región del Valle del Río Chicamocha, se contó con información tomada directamente del lote experimental en Duitama, y con información de referencia para cultivos de remolacha azucarera en otros dos municipios de esta región.

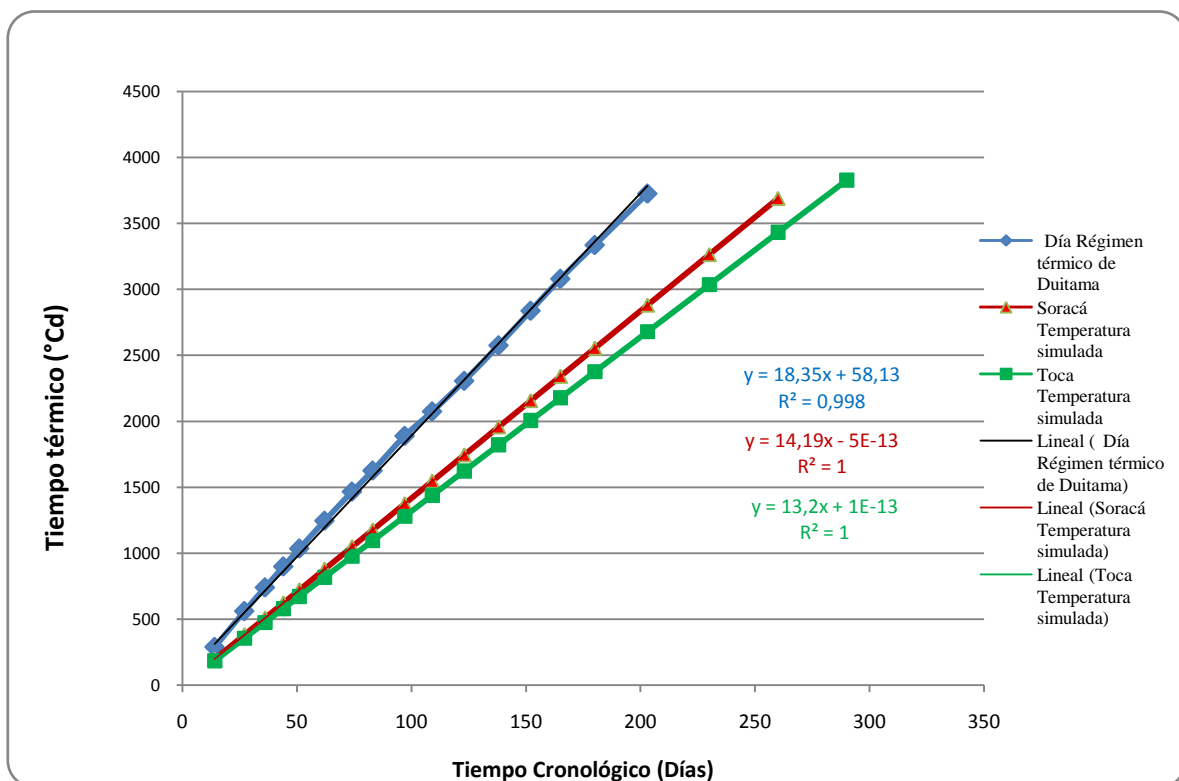


*Figura 24. Tiempo cronológico y tiempo térmico para el ICA-Surbatá (Duitama)*

Dependiendo de la temperatura se cumplen las etapas de desarrollo con mayor o menor velocidad; el avance de las etapas de desarrollo en remolacha azucarera fue directamente proporcional a la acumulación de unidades de calor a que se expuso (*Figura 24 y 39*).

La temperatura medida a través de un data logger instalado en medio de los cultivos establecidos en el ICA-Surbatá, promedió  $18,1\pm 0,03^{\circ}\text{C}$  durante el ciclo de cultivo, magnitud similar a la pendiente de la línea que ajusta la correlación entre las variables independientes: tiempo térmico y tiempo en días (*i.d.*  $\Delta=18,01$ ).

Con los datos de temperatura tomados del experimento en Duitama y de acuerdo a las temperaturas que se presentaron en los respectivos cultivos de referencia, en Toca y en Soracá, se presenta el tiempo térmico por localidad en la *Figura 25*.



*Figura 25. Tiempo cronológico y tiempo térmico para la región del valle del río Chicamocha; azul, en el ICA-Surbatá (Duitama); rojo, Soracá; y verde, Toca.*

Toca y Soracá, presentaron pendientes térmicas menores respecto a Duitama, debido a que sus promedios de temperatura en el ciclo fueron menores, así como el tiempo térmico

disponible para los cultivos de remolacha azucarera que se establecieron en dichas localidades; las pendientes de cada ajuste lineal corresponden al “régimen térmico” experimentado en cada localidad durante el ciclo del cultivo de remolacha azucarera.

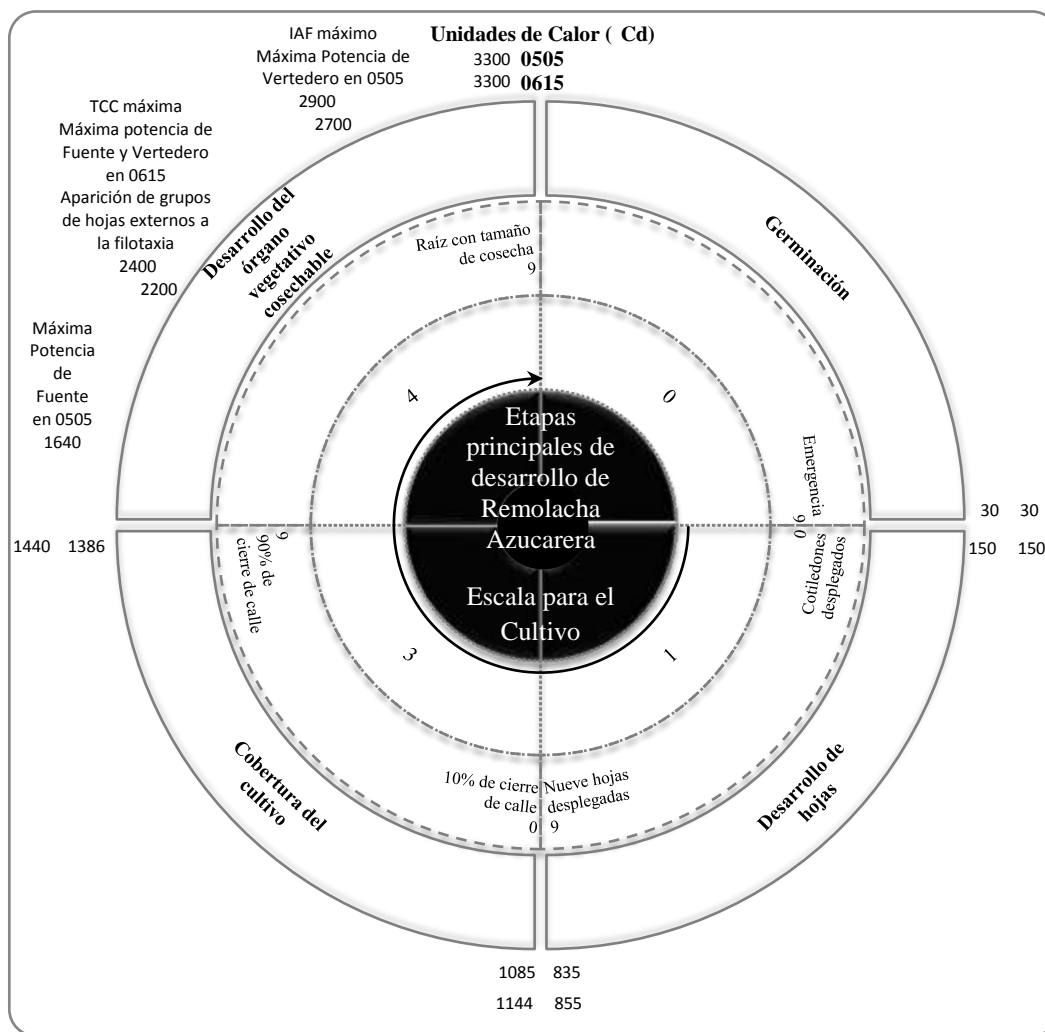


Figura 26. Etapas de desarrollo de remolacha azucarera hasta la fase vegetativa de acuerdo a la escala BBCH. Adaptado de Meier 2001.

El estudio de tiempo térmico es decisivo para definir el desarrollo de un cultivo, al establecer con precisión la duración de cada etapa. A partir del seguimiento del ciclo de cultivo de las variedades, y de acuerdo preliminarmente a la escala descriptiva de desarrollo para remolacha azucarera BBCH de Meier (2001) se determinaron las etapas de desarrollo dentro de la fase vegetativa y su duración para las variedades Hilleleshög 0505 y 0615 de remolacha, con base en el experimento de campo.

De acuerdo a esta escala, a continuación se presenta el análisis de los resultados por etapa principal de desarrollo para las variedades 0505 y 0615.

La emergencia es la representación agronómica de la germinación (BBCH 0), que fue relativamente alta y homogénea en el experimento; en el conteo se encontraron valores de 85%; estos valores están asociados con una mayor saturación de agua en algunos sectores debido a la topografía del lote, además de un pequeño encostramiento parcial sobre la superficie, debido a la presencia de lluvia relativamente fuerte durante los días siguientes a la siembra. Se presentaron lluvias imprevistas en horas de la noche posterior a la siembra (18 - 23 mm); cantidad de agua que llegó en un momento crítico, ya que la saturación de agua puede provocar fácilmente la pudrición de la semilla. Luego de raleadas estas parcelas, se obtuvo una población de 90000 plantas/ha.

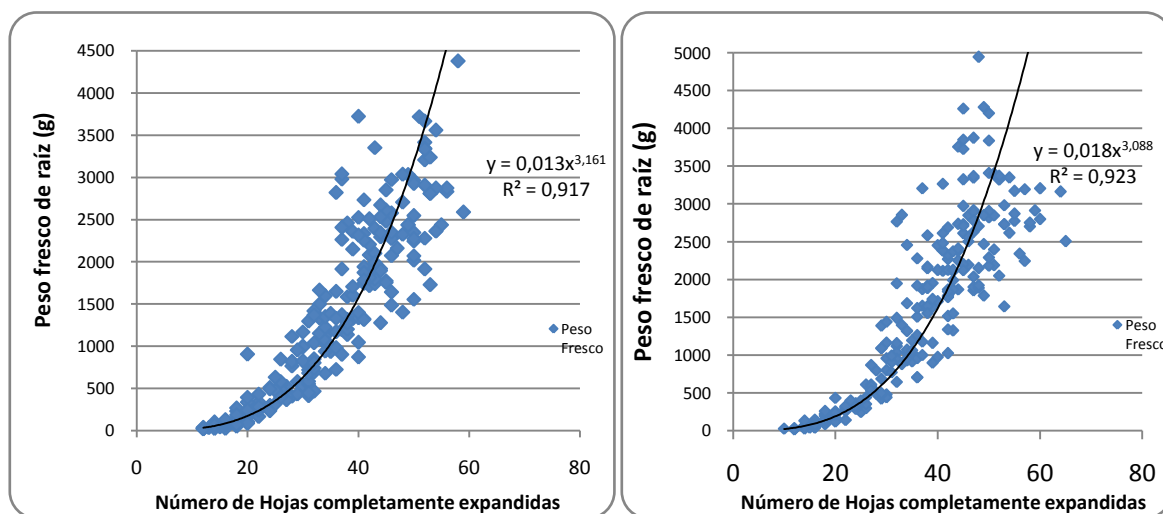


Figura 27. Desarrollo vs rendimiento en variedad 0505. Figura 28. Desarrollo vs rendimiento en variedad 0615.

El desarrollo de las hojas (BBCH 1) es una etapa que se define por la aparición promedio de hojas para cada variedad, lo que fue registrado para cada unidad experimental. En la primera parte del ciclo de cultivo para las dos variedades se presentaron similares tasas de emisión foliar y número de hojas hasta los 480°Cd (23 dds); sin embargo, a partir de este punto la variedad 0615 presentó mayor velocidad en la aparición de hojas, manteniendo un mayor número de hojas durante el resto del cultivo.

El desarrollo de hojas de la remolacha azucarera estuvo correlacionado con el crecimiento de la raíz, que es el principal componente del rendimiento del cultivo. Específicamente, existe un alto compromiso del número de hojas completamente expandidas o aparición de hojas sobre el rendimiento de la remolacha azucarera, pues el sistema fotosintético es la fuente del sustrato que se trasloca, asimila y acumula en la raíz, en especial cuando el cultivo se encuentra en la mitad de las etapas de desarrollo de hojas y desarrollo de la raíz.

El modelo logístico presentó el mejor ajuste entre el número de hojas y el rendimiento, para la variedad 0505, mientras que el modelo Gaussiano lo tuvo para la variedad 0615, esta diferencia entre la relación anatómica de la parte aérea y el rendimiento es varietal; sus parámetros se presentan en el Anexo I y la representación gráfica de este modelo se muestra en el anexo E (coeficiente de correlación,  $r=0,927$  y  $0,9$  para las variedades 0505 y 0615 respectivamente).

Esta tendencia se observó tanto para la variedad 0505 como para la variedad 0615 (*Figura 27*, *Figura 28*), que permitió relacionar la aparición de hojas o desarrollo, con el crecimiento de la raíz, principal criterio del rendimiento del cultivo. Los valores de correlación también fueron altos para la variable “número de hojas” sobre el peso seco de la raíz (coeficiente de correlación de *Pearson* de  $0,911$ ).

La relación entre una variable como el desarrollo foliar y el tamaño de raíces es una herramienta de alta importancia práctica, debido a que la determinación de la aparición de hojas se obtiene de una forma muy precisa por ser producto del conteo y no de una medición con criterio subjetivo de un operario, que incluya un margen sensible de error experimental. Esto puede involucrar una sencilla técnica de conteo para estimar preliminarmente la proximidad del momento de cosecha del cultivo de remolacha azucarera.

Alrededor de los  $2300^{\circ}\text{Cd}$  (122 dds) las dos variedades presentaron agrupaciones de hojas laterales, que son externas a la filotaxia de la remolacha azucarera, algunas a manera de filotaxia individual, que se incrementan en número de grupos y número de hojas

agrupadas, presentando su máximo en los 2800°Cd (150 dds); a partir de este punto se presentó una sensible disminución hacia el final del cultivo (*Figura 9*).

A los 2800°Cd ambas variedades alcanzaron su máximo desarrollo de hojas –conteo sobre el dosel–; sin embargo, la aparición de hojas continuó pero a una tasa menor que la tasa de senescencia de hojas maduras.

Finalmente, el desarrollo de hojas está relacionado con la tasa de emisión foliar, que en remolacha azucarera –como en cualquier otro cultivo– es dependiente de la temperatura. A la temperatura designada por la literatura como óptima para su desarrollo, se presentó en el experimento del ICA-Surbatá (Duitama), se obtuvo en promedio la expansión completa de una hoja cada 4 y 3,5 días para las variedades 0505 y 0615 respectivamente. Cuando la aparición de hojas fue más activa en la variedad 0615 se alcanzó parcialmente de forma prolongada la expansión completa de cada hoja en tres días.

Con base en la información obtenida de los cultivos del experimento y adaptando la escala general que presenta Meier (2001) para la remolacha azucarera, se construyó una escala de desarrollo BBCH (*tabla 5*), incluyendo para esto un código de tres dígitos para la etapa de desarrollo de hojas que se acaba de describir –mientras el desarrollo de hojas continúa en paralelo– para visualizar el solapamiento con otras etapas en la fase vegetativa.

La etapa principal BBCH 3 se define como la cobertura del cultivo, refiriéndose al cierre de calle, determinado de acuerdo al traslape porcentual de las hojas entre hileras. Durante esta etapa, aproximadamente hacia el 40% de cobertura para la variedad 0505 y el 50% para la variedad 0615 se da paso a la siguiente etapa de desarrollo de la raíz.

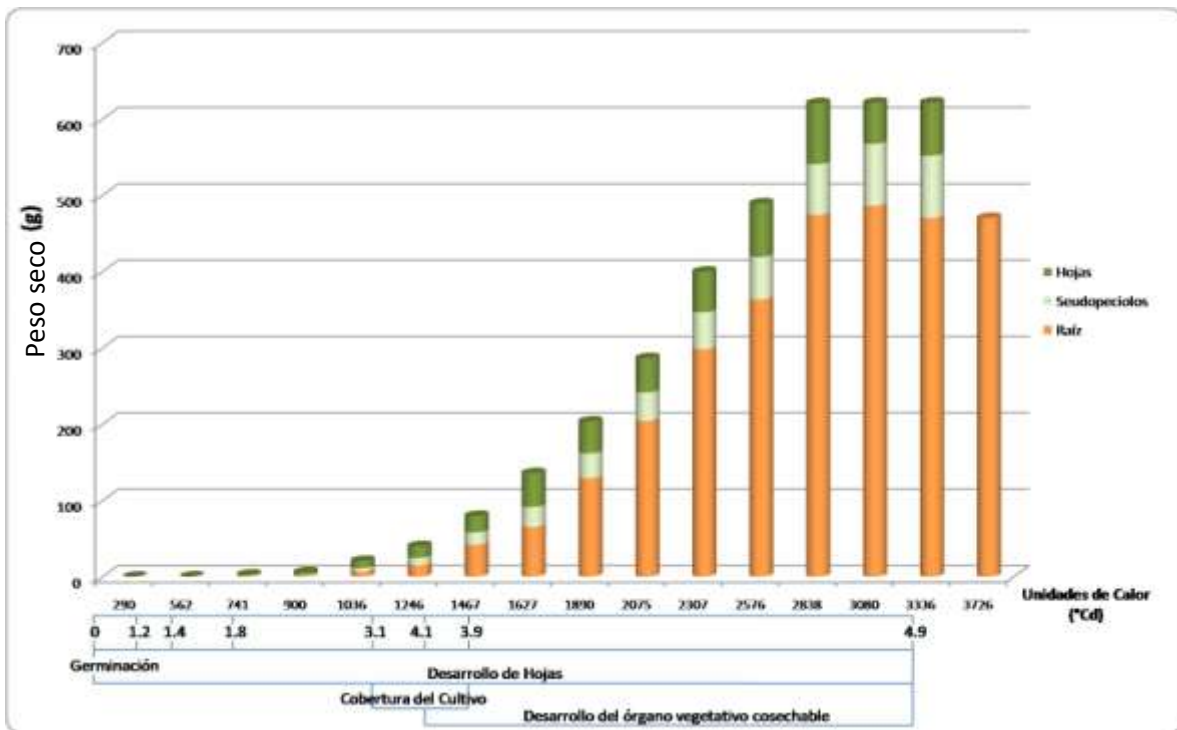


Figura 29. Distribución del peso seco de la planta de remolacha azucarera variedad 0505 y sus etapas de desarrollo características en fase vegetativa.

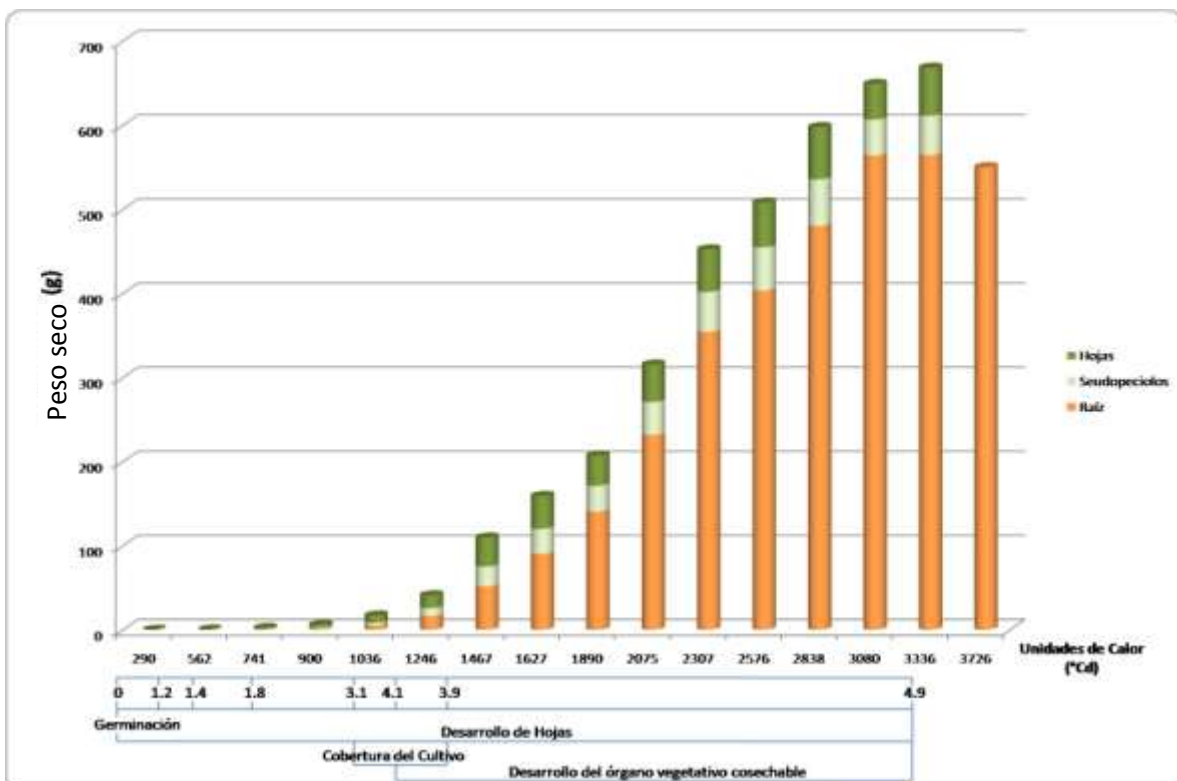


Figura 30. Distribución del peso seco de la planta de remolacha azucarera variedad 0615 y sus etapas de desarrollo características en fase vegetativa.

La variedad 0615 de remolacha azucarera alcanzó más rápido el inicio de la cobertura a los 900°Cd (44 dds), mientras que la variedad 0505 solo lo alcanzó a los 1050°Cd (51 dds). Estos resultados se deben al mayor desarrollo de follaje de la variedad 0615 con respecto a la variedad 0505. La variedad 0615 de remolacha azucarera también completó el cierre de calle más rápido que la variedad 0505.

A lo largo de toda la parte inicial del ciclo del cultivo hasta los 1100-1250°Cd, el peso seco de hojas para ambas variedades fue superior al de la raíz, debido a que durante esta parte las plantas se ocupan del establecimiento del sistema fotosintético para una mayor captación de luz, para la posterior acumulación radical, mientras que el crecimiento de raíces principalmente se encuentra involucrado con el anclaje de la planta al suelo (Bell *et al.*, 1996); en cortes transversales realizados durante los primeros muestreos se puede observar seudoanillos comprimidos sin desarrollar.



*Figura 31. Corte transversal de raíces de remolacha azucarera previo a la etapa de desarrollo de raíz, presencia de seudoanillos*

La etapa principal BBCH 4 completa la sucesión de etapas de desarrollo dentro de la fase vegetativa de la remolacha azucarera en la escala de referencia, finalizando con el completo desarrollo de la raíz.

El inicio del desarrollo de raíz se presentó a los 1100°Cd (54 dds) para la variedad 0615 y a los 1250°Cd (62 dds) para la variedad 0505; esta diferencia está probablemente asociada al mayor desarrollo de hojas que presentó la primera variedad a partir de los

480°Cd. Esta etapa fue alcanzada cuando las raíces ya coniformes, mostraban un diámetro máximo promedio de 5 cm, y se detectó con la aparición del primer anillo cambial secundario desarrollado para el inicio de la acumulación radical. Una característica fisiológica que se puede asociar al inicio de la etapa principal BBCH 4 es la aparición de la hoja 17 completamente expandida, que a su vez coincide con el punto de equilibrio de las curvas de distribución de peso seco entre hojas y raíces, es decir a partir del cual el peso seco de la raíz pasa de ser menor a superar al de las hojas hasta el final del cultivo.

El completo desarrollo de la raíz (BBCH 49) se definió morfofisiológicamente por el número de anillos desarrollados al nivel del ancho máximo radical, de forma análoga a como se hace en la parte aérea (el valor medio del máximo desarrollo fue de 7 anillos). El valor máximo de anillos desarrollados en las raíces se alcanzó en ambas variedades a los 3300°Cd (180 dds). Dentro de esta etapa final de la fase vegetativa, este punto marca el completo desarrollo del órgano vegetativo cosechable, una etapa de desarrollo en que la variedad 0615 presentó 46 hojas completamente expandidas y el peso seco radical alcanzó su máximo, lo que ocurrió de la misma forma para la variedad 0505 que por su parte presentó 45 hojas completamente expandidas.

La duración de esta etapa principal difirió entre las dos variedades. La variedad 0615 presentó la mayor duración cronológica y térmica en la etapa de desarrollo de la raíz, pues entre el inicio y la terminación del desarrollo de anillos transcurrieron 2200°Cd (120 días, 1100°Cd-3300°Cd), mientras que para la variedad 0505 esta etapa tomó 2050°Cd (112 días, 1250°Cd-3300°Cd).

Las diferencias en la duración de la etapa de desarrollo de raíces en las dos variedades, explican el mayor crecimiento de la raíz de la variedad 0615 en términos de peso seco en relación con la variedad 0505, además de aspectos anatómicos del tubérculo como los diámetros máximos promedio hacia la madurez fisiológica de la raíz coniforme, que fueron de 16,7 cm y 16,5±0,05cm para las variedades 0615 y 0505 respectivamente.

La duración de la formación de la raíz a la temperatura del ICA-Surbatá (Duitama) se da entre el 57-65 dds y el 180 dds. Este conocimiento sobre el desarrollo del cultivo es

relevante, ya que la duración de la etapa de desarrollo de la raíz es un factor determinante para su acumulación de peso seco, lo cual se reflejó en los índices de crecimiento.

Estos resultados señalan una ventaja de la variedad 0615 en el desarrollo y acumulación de peso seco en sus raíces (crecimiento de raíz); por su parte la variedad 0505 dedicó un lapso de tiempo menor para el crecimiento y desarrollo de este órgano vertedero. Identificar la etapa crítica en la que hay llenado de raíz tiene importancia práctica, ya que se debe proporcionar un manejo cuidadoso de condiciones sanitarias, suministro de riego y nutrición, para favorecer la producción de asimilados y la traslocación de sacarosa hacia la raíz, para su desarrollo y acumulación. Cualquier suceso biótico o abiótico que afecte el cultivo en esta etapa, que desencadene estrés oxidativo –que tenga efecto sobre el llenado de la raíz–, va a ser más sensible para la variedad 0505 en términos relativos comprometiendo en mayor grado su rendimiento; considerando que la etapa crítica de llenado para esta variedad ocurre en un lapso más corto de tiempo térmico y cronológico.

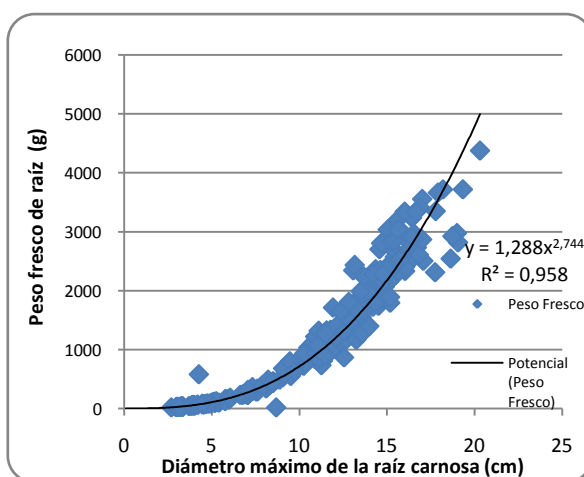


Figura 32. Diámetro radical vs rendimiento en 0505.

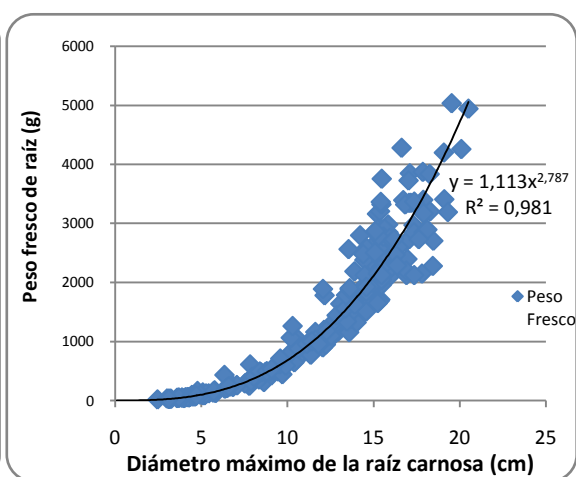


Figura 33. Diámetro radical vs rendimiento en 0615.

Anatómicamente, el peso fresco radical o rendimiento de la remolacha azucarera se puede estimar a través de varias de sus medidas anatómicas, debido a la alta correlación encontrada con su longitud máxima, el diámetro a la mitad de su longitud y su diámetro máximo de la raíz carnosa ( $r^2$  de 0,809; 0,962 y 0,958 en la variedad 0505, y 0,817; 0,982 y 0,981 en la variedad 0615 respectivamente).

Entre estas variables anatómicas altamente correlacionadas con el rendimiento, sólo el diámetro máximo de la raíz puede ser en la práctica un descriptor no destructivo de campo (*Figura 32*, *Figura 33*), útil para la estimación del rendimiento en un momento dado, debido a que la raíz es coniforme, a que el diámetro máximo se encuentra próximo a la superficie del suelo, y a la relativa facilidad presente en campo para descubrir los “hombros” de la raíz, condicionado a que posterior a la determinación se cubra con suelo. De lo contrario la epidermis de la raíz se vuelve verde y comienza a consumir las reservas de azúcar desencadenando la pérdida de calidad de la cosecha.

El diámetro máximo de la raíz carnosa en el momento de cosecha se propone para complementar la descripción de la etapa de desarrollo de la raíz, considerando la alta correlación que tiene esta variable con el rendimiento, siendo este último el único punto de referencia en la escala de Meier (2001) para este cultivo (*i.d.* obtención del tamaño de cosecha); a falta de otra descripción dentro de la etapa principal o una guía anatómica que permita percibir la cercanía con el momento oportuno de cosecha se propone utilizar el diámetro máximo de la raíz carnosa como un descriptor del desarrollo de la raíz.

Con base en la escala general BBCH, y con el análisis detallado de esta investigación se propone la siguiente escala para las etapas de desarrollo de la fase vegetativa del cultivo, en la que sobresalen tres aportes principales (*Tabla 5*). Primero, la generación de una mesoetapa o código de tres dígitos para la etapa de desarrollo de hojas paralelo a otras etapas en la fase vegetativa para visualizar como el desarrollo de hojas continúa durante esta fase –solapamiento–, a la vez una columna de código secundario que indica el inicio de una etapa en simultáneo con el avance de la anterior (*v.gr.* desarrollo de raíz); segundo, la definición de un código preciso para la etapa de desarrollo de la raíz (órgano vegetativo cosechable) con base en la aparición del número de anillos cambiales secundarios; y tercero, la definición asociada con el tamaño de cosecha de la raíz que presenta una descripción alternativa para la etapa de desarrollo de la raíz con base en el porcentaje del diámetro máximo alcanzado por ésta hacia el momento oportuno de cosecha.

*Tabla 5. Etapas de desarrollo y clave de identificación extendida BBCH para el cultivo de Remolacha Azucarera. Propuesta adaptada de Meier 2001.*

---

### **Etapa principal de desarrollo 0: Germinación de la semilla**

---

<b>Código</b>			<b>Descripción</b>
Dos dígitos principal	Dos dígitos anticipado	Tres dígitos (Germinación)	
00		000	Semilla seca
01		001	Comienzo de la imbibición; las semillas comienzan a absorber agua
02		002	Protrusión de la testa de la semilla
03		003	Imbibición de la semilla terminada; el glomérulo empieza a cuartearse
05		005	La radícula emerge (raíz embrional) de la semilla (glomérulo)
07		007	Brote fuera de la semilla (glomérulo)
09		009	Emergencia: el brote traspasa la superficie del suelo

---

### **Etapa principal de desarrollo 1: Desarrollo de hojas**

---

<b>Código</b>			<b>Descripción</b>
Dos dígitos principal	Dos dígitos anticipado	Tres dígitos (Hojas)	
10		100	Etapa cotiledonar: cotiledones desplegados horizontalmente; la hoja, visible, (tamaño cabeza de alfiler)
11		101	1er par de hojas, visible, sin desplegar todavía; (tamaño de arvejas/guisantes)
12		102	2 hojas (1er par de hojas), desplegadas
13		103	3 hojas desplegadas
14		104	
15		105	4 hojas desplegadas

16	106	5 hojas desplegadas
17	107	6 hojas desplegadas
18	108	7 hojas desplegadas
19	109	8 hojas desplegadas
	110	9 hojas desplegadas
	111	10 hojas desplegadas
	112	11 hojas desplegadas
	113	12 hojas desplegadas
		13 hojas desplegadas

---

### **Etapa principal de desarrollo 3: Cobertura del cultivo**

---

#### **Código**

<b>Dos dígitos principal</b>	<b>Dos dígitos anticipado</b>	<b>Tres dígitos (Hojas)</b>	<b>Descripción</b>
31		114	Comienza la cobertura del cultivo: 10 % de las plantas se tocan entre las hileras
32			20 % de las plantas se tocan entre las hileras
33		115	30 % de las plantas se tocan entre las hileras
34		116	40 % de las plantas se tocan entre las hileras
35	41		50 % de las plantas se tocan entre las hileras
36		117	60 % de las plantas se tocan entre las hileras
37		118	70 % de las plantas se tocan entre las hileras
38			80 % de las plantas se tocan entre las hileras
39		119	Cobertura del cultivo finalizada: cerca del 90 % de las plantas se tocan entre las hileras

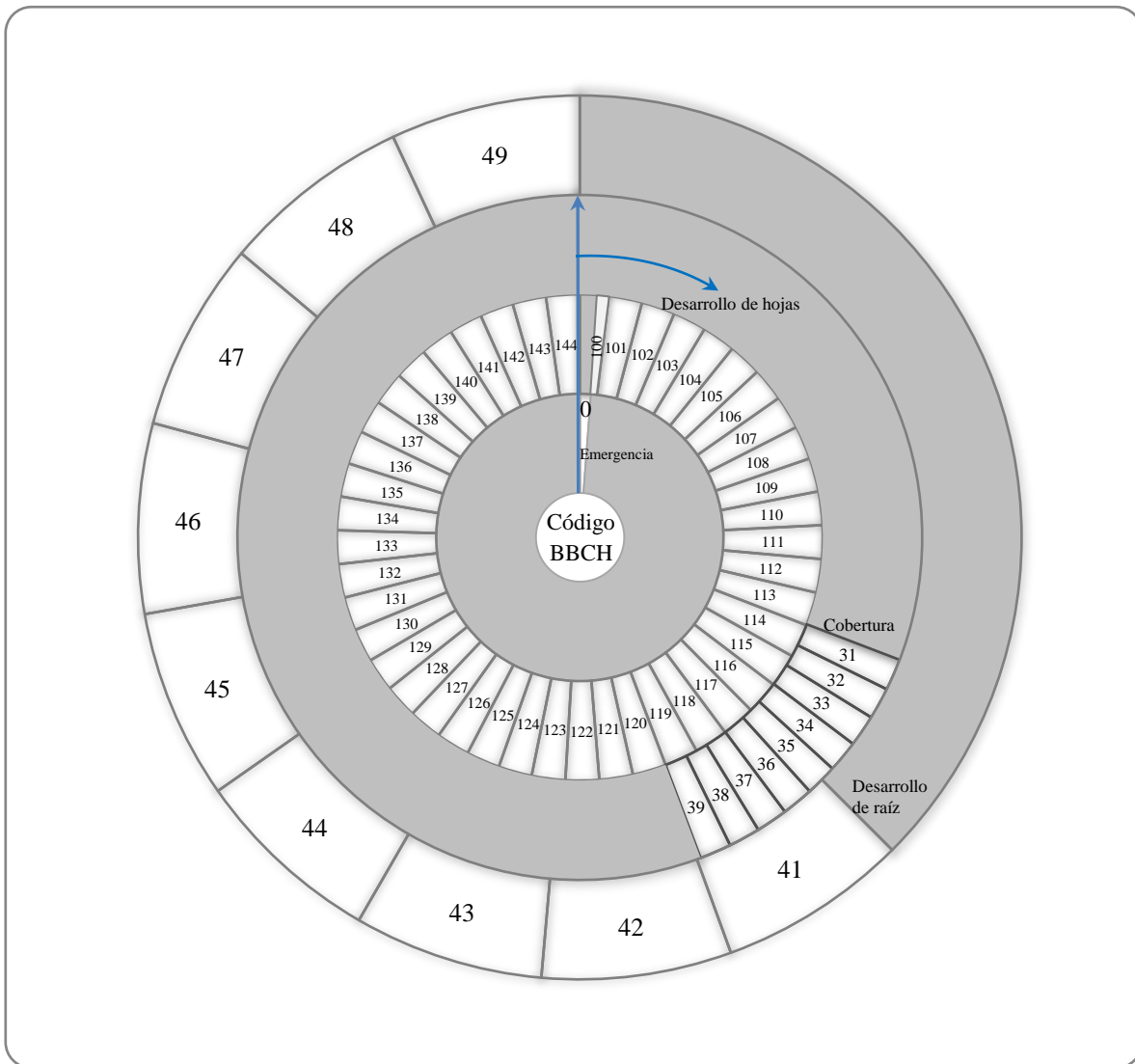
---

## Etapa principal de desarrollo 4: Desarrollo del órgano vegetativo cosechable

<b>Código</b>			
Dos dígitos principal	Dos dígitos anticipado	Tres dígitos (Hojas)	Descripción
41		117	Anillo de elementos vasculares y cambium desarrollado rodeando la estela central
42		120	Primer anillo cambial secundario desarrollado. 30% del diámetro máximo máximo alcanzado.
43		123	Segundo anillo cambial secundario desarrollado. 40% del diámetro máximo máximo alcanzado.
44		126	Tercer anillo cambial secundario desarrollado. 50% del diámetro máximo máximo alcanzado.
45		129	Cuarto anillo cambial secundario desarrollado. 60% del diámetro máximo máximo alcanzado.
46		133	Quinto anillo cambial secundario desarrollado. 70% del diámetro máximo máximo alcanzado.
47		136	Sexto anillo cambial secundario desarrollado. 80% del diámetro máximo máximo alcanzado.
48		139	Séptimo anillo cambial secundario desarrollado. 90% del diámetro máximo máximo alcanzado.
49		142	Tamaño del cosecha de la raíz. 100% del diámetro máximo máximo alcanzado.

La columna de código anticipado permitió asociar entre etapas principales del cultivo, que toma valor en BBCH 35, ya que continuó el desarrollo de hojas (BBCH 116), en simultáneo inició el desarrollo de la raíz (BBCH 41), mientras sucedió la mitad de la etapa principal de cobertura del cultivo.

Aunque la escala BBCH presenta textualmente el alcance del “tamaño de cosecha de la raíz” como punto crucial de la fase vegetativa, esta investigación incluyó el tamaño radical subrogado con el diámetro máximo de la raíz, además se determinó el contenido de sacarosa (entre el primer y segundo anillo cambial) y los grados *brix* presentes en este órgano como parte del análisis relacionado con el momento oportuno de cosecha, como un componente del rendimiento, pero relacionado con la calidad que se retoma más adelante en el análisis de calidad y rendimientos.



*Figura 34. Figura de la escala de desarrollo para las etapas de la fase vegetativa de remolacha azucarera. En el gráfico de anillo, desde el interior hacia la periferia se presentan las etapas principales de desarrollo para el cultivo.*

Para condiciones del trópico se ha estimado que la temperatura del suelo en los primeros 50 centímetros es un grado centígrado mayor a la temperatura del ambiente, lo cual se explica porque los suelos tienden a ser cuerpos negros que retienen calor. Las integrales térmicas entre la temperatura del dosel del cultivo y del suelo a 20 cm de profundidad mostraron diferencias mayores en términos absolutos; sin embargo, la temperatura media asumida como aquella a que se expuso los tejidos no fue diferente estadísticamente de la tomada a 20 cm sobre el suelo (Anexo A), esta evidencia sugiere la temperatura del dosel

como adecuada para construir el modelo de tiempo térmico, en especial referido a los supuestos de Baker y Reddy (2001) para esta metodología.

A continuación se presenta la escala relacional de acumulación de unidades de calor y las etapas principales de desarrollo BBCH de la fase vegetativa de las variedades 0505 y 0615 de remolacha azucarera, comparando la escala descriptiva de Holen y Dexter, 1996 (Tabla 6).

*Tabla 6. Número de unidades de calor (°Cd) para el cultivo de remolacha azucarera variedades 0615 y 0505.*

<i>BBCH</i>	<i>Escala de Holen y Dexter/Descripción de la etapa</i>	<i>Unidades de Calor [°C d] 0615</i>	<i>Unidades de Calor Acumuladas 0615</i>	<i>Unidades de Calor [°C d] 0505</i>	<i>Unidades de Calor Acumuladas 0505</i>
<b>09</b>	<i>E/ Emergencia</i>			<i>114</i>	<i>--</i>
	<i>V1/ Cotiledones desplegados horizontalmente</i>				
<b>11</b>	<i>V2/ Una hoja desplegada</i>	<i>--</i>		<i>--</i>	<i>242</i>
<b>12</b>	<i>V2/ Dos hojas desplegadas</i>	<i>48</i>	<i>290</i>	<i>48</i>	<i>290</i>
<b>13</b>	<i>V3/ Tres hojas desplegadas</i>	<i>117</i>	<i>407</i>	<i>135</i>	<i>425</i>
<b>14</b>	<i>V4/ Cuatro hojas desplegadas</i>	<i>128</i>	<i>535</i>	<i>91</i>	<i>516</i>
<b>15</b>	<i>V5/ Cinco hojas desplegadas</i>	<i>55</i>	<i>590</i>	<i>92</i>	<i>608</i>
<b>16</b>	<i>V6/ Seis hojas desplegadas</i>	<i>55</i>	<i>645</i>	<i>55</i>	<i>663</i>
<b>17</b>	<i>V7/ Siete hojas desplegadas</i>	<i>55</i>	<i>700</i>	<i>55</i>	<i>718</i>
<b>18</b>	<i>V8/ Ocho hojas desplegadas</i>	<i>55</i>	<i>755</i>	<i>56</i>	<i>774</i>
<b>19</b>	<i>V9/ Nueve hojas desplegadas</i>	<i>37</i>	<i>792</i>	<i>36</i>	<i>810</i>
<b>31</b>	<i>V14/ Cobertura del cultivo 10%</i>	<i>239</i>	<i>1031</i>	<i>276</i>	<i>1086</i>
<b>32</b>	<i>V14/ Cobertura del cultivo 20%</i>	<i>36</i>	<i>1067</i>	<i>36</i>	<i>1122</i>
<b>33</b>	<i>V15/ Cobertura del cultivo 30%</i>	<i>37</i>	<i>1104</i>	<i>37</i>	<i>1159</i>
<b>34</b>	<i>V16/ Cobertura del cultivo 40%</i>	<i>37</i>	<i>1141</i>	<i>37</i>	<i>1196</i>
<b>35</b>	<i>V17/ Cobertura del cultivo 50%</i>	<i>36</i>	<i>1177</i>	<i>37</i>	<i>1233</i>

<b>36</b>	<b>V17/ Cobertura del cultivo</b> 60%	37	1214	36	1269
<b>37</b>	<b>V18/ Cobertura del cultivo</b> 70%	37	1251	37	1306
<b>38</b>	<b>V18/ Cobertura del cultivo</b> 80%	37	1288	37	1343
<b>39</b>	<b>V19/ Cobertura del cultivo</b> 90%	36	1324	55	1398
<b>49</b>	<b>V44/ Tamaño de cosecha de</b> la raíz	1976	3300	1902	3300

La remolacha azucarera no alcanza su senescencia en la fase vegetativa, en consecuencia no lo hace antes de la cosecha del cultivo. Incluso como se ha mencionado anteriormente, aún durante la madurez de la raíz se presentan numerosas hojas completamente expandidas y verdes en cada variedad. Es la razón por la que no se incluyó el código de la etapa de senescencia en la BBCH de la fase vegetativa (*Tabla 6*).

La duración general de la fase vegetativa hacia el tamaño de cosecha de la raíz fue la misma para ambas variedades de remolacha azucarera, sin embargo cabe notar que difirieron principalmente en su desarrollo foliar, el inicio de la cobertura del cultivo e inicio y duración de la etapa de desarrollo radical.

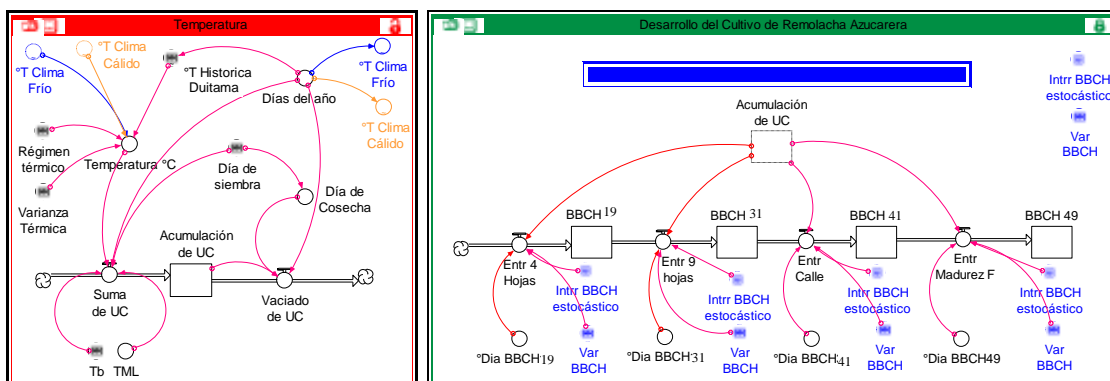
Suele existir sincronía entre crecimiento y desarrollo, tal como se mencionó para cada etapa de desarrollo, en las que paralelamente se analizó las relaciones de acumulación de peso seco; sin embargo, la máxima acumulación de peso seco por órgano no es un indicador de la terminación de una etapa de desarrollo, ya que éste no está ligado solamente al tamaño del órgano como en el caso del desarrollo foliar, en el cual lo relevante es la aparición de hojas.

### **Modelo de desarrollo en STELLA**

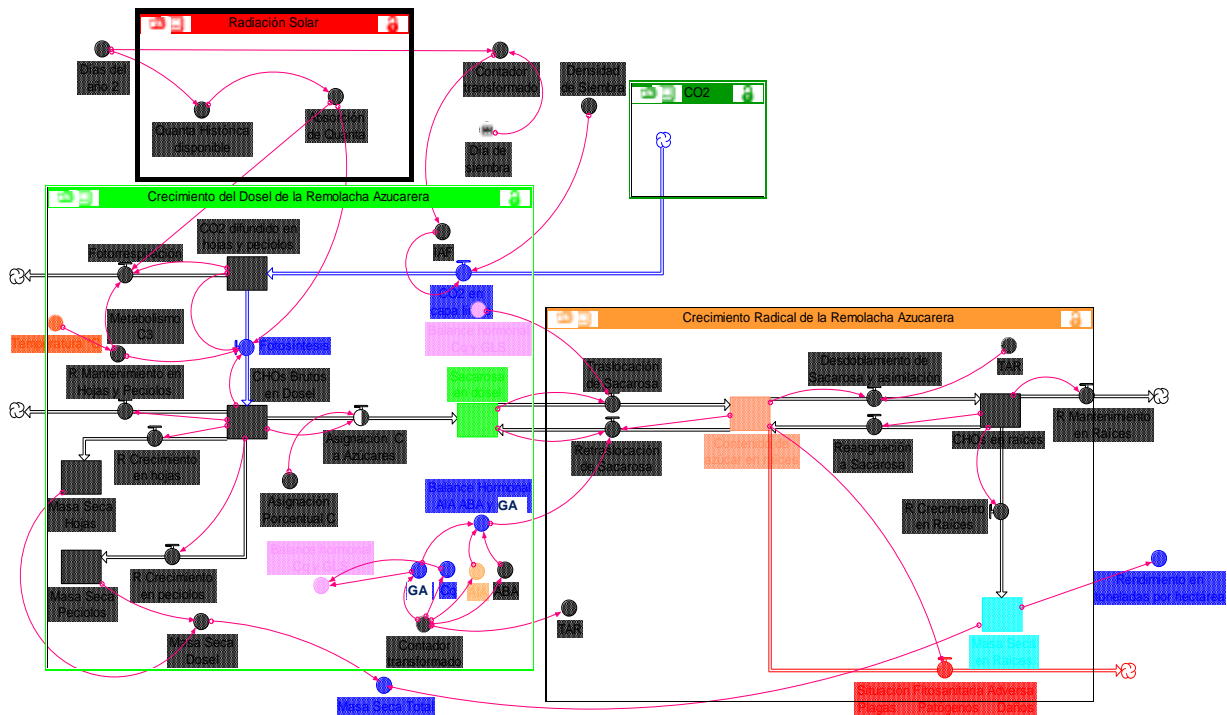
La construcción conceptual de un modelo de acumulación de unidades de calor y su efecto sobre el desarrollo del ciclo de cultivo se hizo teniendo en cuenta algunas de las variables que hacen parte de la teoría general de sistemas y programado en lenguaje *Structured Thinking Environment Learning Language with Animation* (STELLA). La estructura principal se encadenó a un submodelo de crecimiento para representar los efectos

esperados que tiene la temperatura no solo sobre las etapas de desarrollo, sino también sobre los criterios de calidad del cultivo como crecimiento y acumulación de azúcar. Su calibración inicial usó las constantes reportadas en la literatura para el cultivo de remolacha azucarera y se convalidó con los resultados obtenidos en la parte de campo de esta investigación (Holen y Dexter, 1996; Kenter *et al.*, 2006; Li *et al* 1992).

El modelo en STELLA integra el submodelo de crecimiento y el submodelo de desarrollo, y funciona a partir de una variable de entrada que es la temperatura (*Figura 35*); se asume que no existe intervención de factores bióticos (*i.d.* plagas y enfermedades) ni abióticos (*i.d.* existe un suministro adecuado tanto de nutrientes como de agua). El submodelo de crecimiento tiene como mecanismo principal de funcionamiento los procesos fotosintéticos y respiratorios para la acumulación de peso (*Figura 36*), mientras que el submodelo de desarrollo emplea los resultados de esta investigación para pronosticar la aparición de cada etapa principal durante el ciclo del cultivo (el mecanismo funcional son las unidades de calor).



*Figura 35. Esquema del Modelo de tiempo térmico para remolacha azucarera representado con simbología de flujos del lenguaje STELLA*



*Figura 36. Submodelo para el crecimiento del cultivo de remolacha de apoyo para el de tiempo térmico representado con simbología de flujos del lenguaje STELLA*

El modelo de acumulación de unidades de calor, como muchos de los modelos aplicados a la agricultura, suele presentar problemas de aplicación; los limitantes de uso a los que se enfrentan pueden deberse a la falta de portabilidad del modelo para su implementación.

Esta herramienta construida como parte de esta investigación hace seguimiento al cultivo y permite realizar simulaciones que proyectan los resultados de cosecha en función de la acumulación de unidades de calor, y los requerimientos específicos del cultivo de remolacha azucarera para su desarrollo.

La modelación sistémica y la experimental se complementan en términos dinámicos, pues la primera retroalimenta conceptualmente al enfoque experimental, y aporta un esquema de relaciones para la comprensión de principios organizadores en que convergen.

En la construcción del modelo conceptual se consideró la información actual de literatura científica de remolacha azucarera aplicando lo relacionado con el factor temperatura como componente parcial de una perspectiva de sistemas, para abordar tanto el

desarrollo como la cosecha del cultivo de remolacha azucarera para las variedades 0615 y 0505 (Bruzon, 2007; Holen y Dexter, 1996; Kenter *et al.*, 2006; Li *et al.*, 1992; NDAWN 2007; Sauer, 2007).

El modelo general en STELLA se ejecutó empleando como insumo los datos de temperaturas medias diarias que se presentaron en el ICA-Surbatá (Duitama), y se obtuvo la predicción del rendimiento, presentando precisión con respecto al rendimiento experimental resultado de esta investigación.

### ***Calidad y Rendimiento***

La escala BBCH presenta textualmente como punto terminal de la fase vegetativa el alcance del “tamaño de cosecha de la raíz”, sin embargo carece de descripciones para la escala general que precisen el momento oportuno de cosecha. Para definirlo, esta investigación determinó además del tamaño radical en peso seco y fresco, variables de calidad como el contenido de sacarosa (entre el primer y segundo anillo cambial) y los grados *brix* en la raíz, como parte de la discusión relacionada con el momento oportuno de cosecha.

De acuerdo al método utilizado para la determinación de sacarosa, se estimó su contenido a nivel parenquimático (las células entre primer y segundo anillo cambial secundario), tejido de acumulación en conexión con los haces vasculares, que presenta la primera opción de llegada de sacarosa a los tejidos de crecimiento y almacenamiento en la raíz por su proximidad anatómica con el xilema (*Figura 37*).

Para esta determinación de laboratorio el modelo Richards presentó el mejor ajuste para el contenido de sacarosa interanular en ambas variedades, y sus parámetros se presentan en el Anexo J (coeficiente de correlación  $r$ , de 0,984 y 0,983 para las variedades 0505 y 0615 respectivamente).

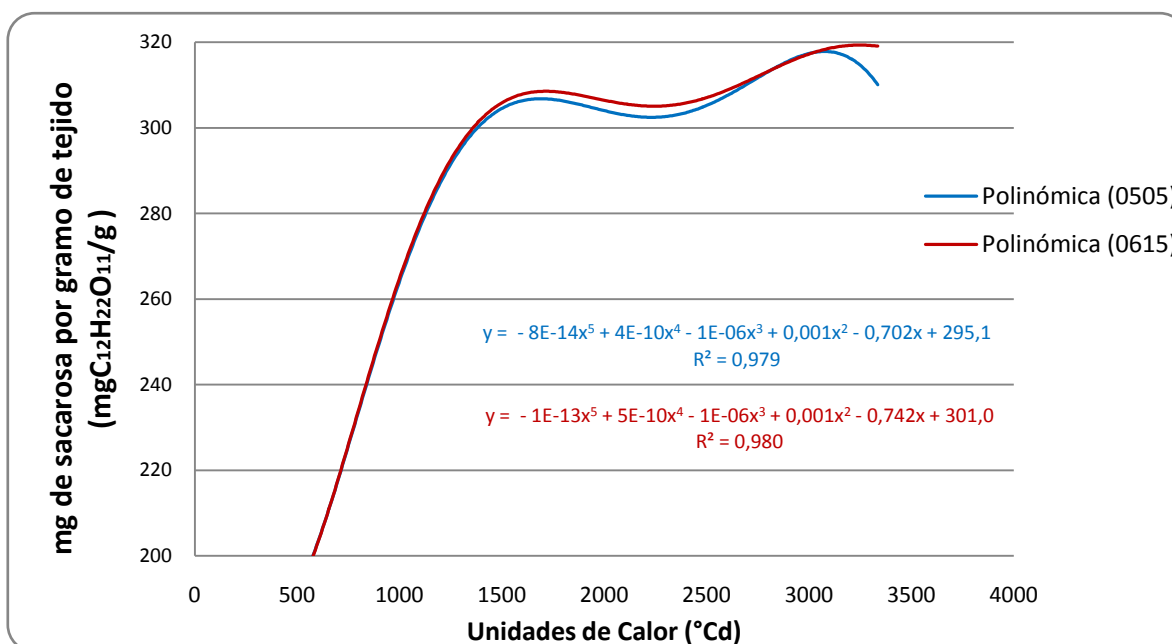


Figura 37. Acumulación de Sacarosa entre primer y segundo anillo cambial de Remolacha Azucarera variedades 0615 y 0505

Estos resultados muestran la traslocación de sacarosa hacia la raíz, asociada con el desarrollo del primer anillo de acumulación o de reserva a nivel radical (Figura 37), que ocurre aproximadamente después de los 1100°Cd para las dos variedades, a partir de ese momento comienza el proceso de formación, crecimiento y acumulación en los seis anillos cambiales secundarios adicionales de remolacha.

El contenido de sacarosa en el tejido incrementó de forma lineal hasta la formación del primer anillo de acumulación, formado éste, se presentó un incremento gradual del contenido de sacarosa, durante el que la raíz se mantuvo en desarrollo con la formación de anillos de acumulación adicionales; a partir de allí hubo un incremento de la demanda en los tejidos de almacenamiento en formación que logró incrementos en el contenido de sacarosa en este punto del tejido; cuando el desarrollo de raíz se completó hacia los 3300°Cd, disminuyó su contenido relativo de sacarosa.

El contenido de sacarosa presentó alta correlación con las medidas del refractómetro de grados *brix* (Anexo F); sin embargo, el método refractométrico dio información más amplia del promedio de acumulación de azúcar del conjunto de anillos desarrollados de la raíz. La medición de grados *brix* incluyó la etapa previa al desarrollo radical, es decir la medición

en pseudoanillos. A continuación se presenta la curva para las dos variedades de remolacha azucarera que establece la relación entre la fracción masal de azúcares y el ciclo del cultivo (Figura 38).

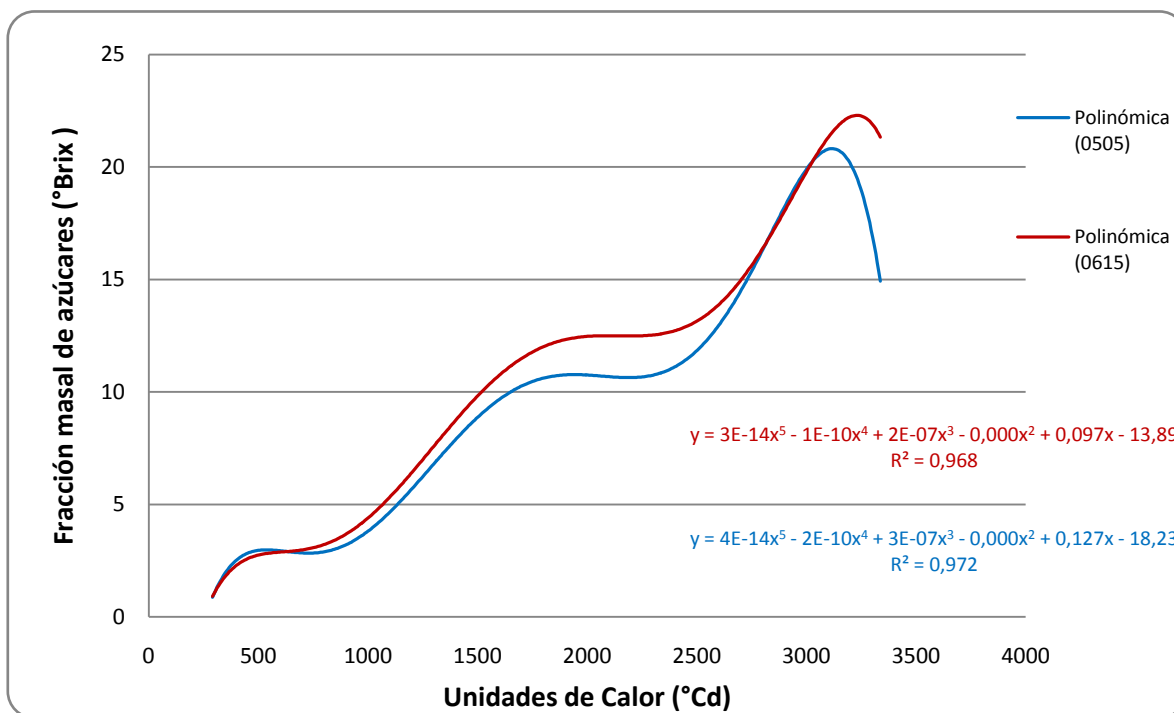


Figura 38. Grados brix en raíz de Remolacha Azucarera variedades 0615 y 0505 a lo largo del experimento.

Casi durante todo el experimento, la variedad 0615 tuvo mayores valores de grados *brix* respecto a la 0505 en la raíz, probablemente asociado con el mayor desarrollo relativo de la primera variedad, lo cual se reflejó en el valor máximo de 23 y 21 grados *brix* para las variedades 0615 y 0505 respectivamente, que se alcanzó a los 3100°Cd para la variedad 0505 y los 3300°Cd para la variedad 0615.

El jugo de remolacha mostró contenidos de azúcar desde la primera muestra en ambas variedades a los 250°Cd (12 dds), y a lo largo del experimento se encontró mayor fracción masal relativa de azúcares en la variedad 0615.

Respecto a los valores de grados *brix*: el incremento inicial para las dos variedades coincidió con la cobertura del cultivo o cierre de calle, aproximadamente hasta los 1000°Cd (50 dds), en que se muestra un incremento lento; entre 1000°Cd y 1600°Cd se presentó un

incremento lineal, seguido por una etapa constante que coincide con el activo desarrollo de la raíz en las dos variedades entre los 1600°Cd y los 2200°Cd, posterior a lo cual comenzó una nueva fase de rápido incremento que coincidió con la aparición de grupos de hojas fuera de la filotaxia principal de remolacha azucarera, y que creció hasta el valor máximo de grados *brix* a los 3100°Cd (174 dds) y los 3300°Cd (180 dds) para las variedades 0505 y 0615 respectivamente (*Figura 38*). A partir del valor máximo de cada variedad los valores de grados *brix* promedio disminuyeron.

En síntesis, se presentan tres estados estacionarios o “mesetas” en la curva de grados *brix*, que coinciden con: el desarrollo de hojas antes de la cobertura, el desarrollo del tercero al quinto de los anillos cambiales de la raíz, y el alcance del tamaño del órgano vegetativo cosechable.

Estos resultados muestran una correspondencia del desarrollo y la calidad de la remolacha azucarera como cultivo. La curva de grados *brix* de la variedad 0615 presenta una tendencia de acumulación relativamente más rápida que la variedad 0505, lo que se debe al más rápido desarrollo de esta variedad.

Es conviene considerar la importancia del análisis de calidad respecto a lo reportado por Milford (2006), en que las concentraciones de azúcar presentan correlación inversa con el tamaño radical dentro de un rango fisiológico. Esto revela, que al rebasar el momento oportuno de cosecha puede disminuir la calidad de la misma. Por otro lado, las concentraciones de azúcar presentan una correlación directamente proporcional con la densidad de anillos cambiales de la raíz, y dicho número de anillos define el desarrollo de la raíz; lo que indica que la elección del momento oportuno de cosecha debe analizarse desde el punto de vista del desarrollo del cultivo, como se hizo a lo largo de la parte del análisis del desarrollo.

Cabe mencionar que el cultivo presentó bajas temperaturas nocturnas que en ocasiones llegaron a presentar cambios con respecto a su respectiva temperatura diurna de alrededor de 10°C, lo que ha sido discutido en la literatura por Milford (2006) que al citar los trabajos de Ulrich, muestra que la concentración de azúcar en remolacha azucarera se incrementa por la presencia de factores que generalmente restringen o disminuyen el crecimiento, tales

como bajas temperaturas nocturnas; factor que puede explicar los altos rendimientos que se presentaron en el experimento –como se menciona enseguida–, que superaron los rendimientos techo de referencia en Colombia para estos materiales genéticos.

Por su parte, el análisis estadístico sobre el rendimiento en toneladas por hectárea de remolacha azucarera (ton/ha) mostró que se presentaron diferencias significativas entre las variedades 0615 y 0505 en el experimento de Duitama ( $p > 0,0110$ ); el rendimiento de la variedad 0615 de remolacha azucarera fue mayor a la 0505 con una media de 166 ton/ha y de 159 ton/ha respectivamente (Anexo M).

Respecto a la acumulación de unidades de calor, el modelo Richards presentó el mejor ajuste para los rendimientos de ambas variedades, modelo matemático que en la literatura se seleccionó como ajustado para los rendimientos de cultivos como la yuca (Amanullah *et al.*, 2007), cuyo órgano vegetativo cosechable es subterráneo al igual que la remolacha. Este modelo de crecimiento presenta tres etapas, la primera exponencial, continuando una lineal y finalmente se alcanza un estado estacionario (meseta) en el crecimiento cuando el órgano alcanza su tamaño máximo. A partir de allí el llenado puede aumentar o disminuir de acuerdo a la dinámica circadiana de acumulación, lo cual se asocia más directamente con calidad, referida al contenido de sacarosa y grados *brix*.

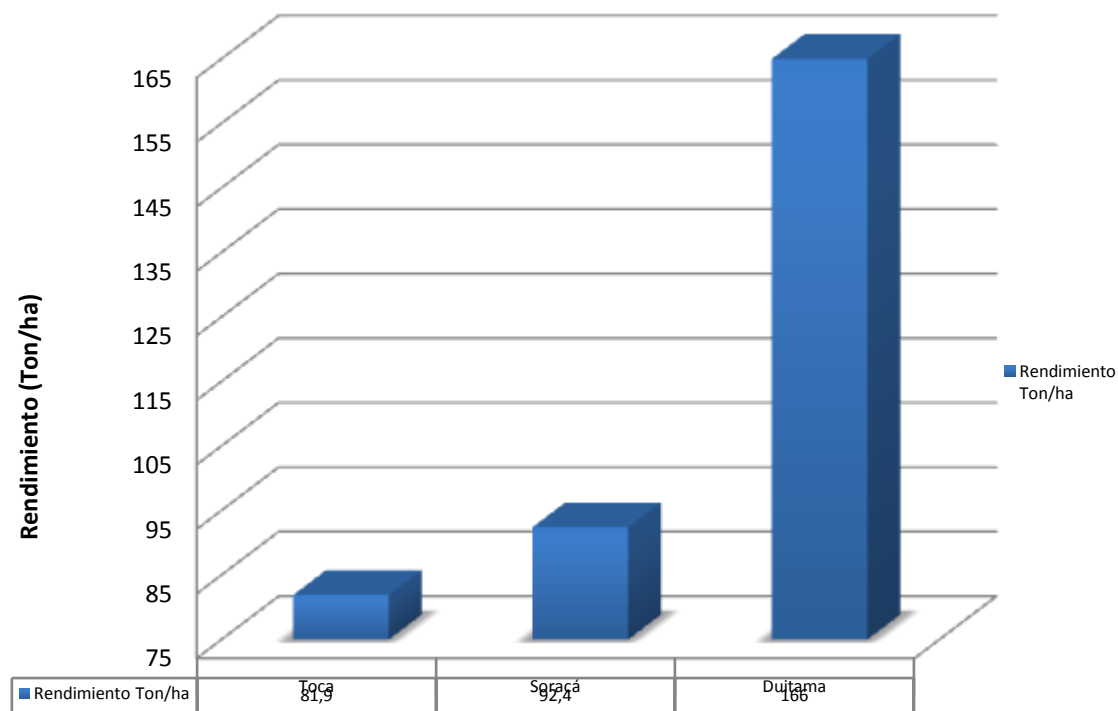
Ambas variedades de remolacha azucarera presentaron mayores rendimientos en el experimento del ICA-Surbatá (Duitama) con respecto a Toca y Soracá; la condición térmica en la localidad del experimento en el marco de la región del Valle del Río Chicamocha presentó las mejores condiciones respecto a las otras dos localidades mencionadas de las que se extrajo información para este cultivo. Se encontraron rendimientos óptimos hacia los 3300°Cd (180 dds), que coinciden con la mayor acumulación de sacarosa en el ciclo, con lo que se superó el rendimiento techo para la remolacha azucarera consultado en la literatura (Milford, 2006) y comunicado por el proveedor de la semilla<sup>6</sup> (Syngenta –comunicación personal–, Diciembre de 2009). El momento oportuno de cosecha con base en el alcance de la asíntota de tamaño de la raíz del modelo es relevante, ya que como se mencionó anteriormente, hay una correlación inversa relativa entre el contenido de azúcares y el

---

<sup>6</sup> Claudia Moreno

tamaño de la raíz y células, pues al sobrepasar el momento oportuno de cosecha puede disminuir la calidad de la misma (Milford, 2006).

Para evidenciar el efecto del tiempo térmico sobre el rendimiento, a continuación se presentan los rendimientos de remolacha azucarera para tres de las localidades de la región del Valle del Río Chicamocha. Para comparar los rendimientos entre las localidades de Soracá y Duitama se usaron los rendimientos parciales de la variedad comercial 0615 respecto a la acumulación de unidades de calor. Se excluyó la información del municipio de Toca para el análisis de rendimientos parciales con respecto a la acumulación de unidades de calor, debido a que sólo se contó con el rendimiento a los 180 dds en esa localidad –como se mencionó en la discusión– solo se tomó este rendimiento absoluto para la comparación general.



*Figura 39. Rendimiento de la variedad 0615 de remolacha azucarera a los 180 días en tres localidades de la región del valle del río Chicamocha.*

La comparación de los rendimientos para la variedad 0615 a los 180 dds en los municipios de Toca, Soracá y Duitama se muestra en la *Figura 39*. Esta comparación fue

posible debido a la disponibilidad de información de temperatura y de rendimientos para estas localidades de la región del valle del río Chicamocha.

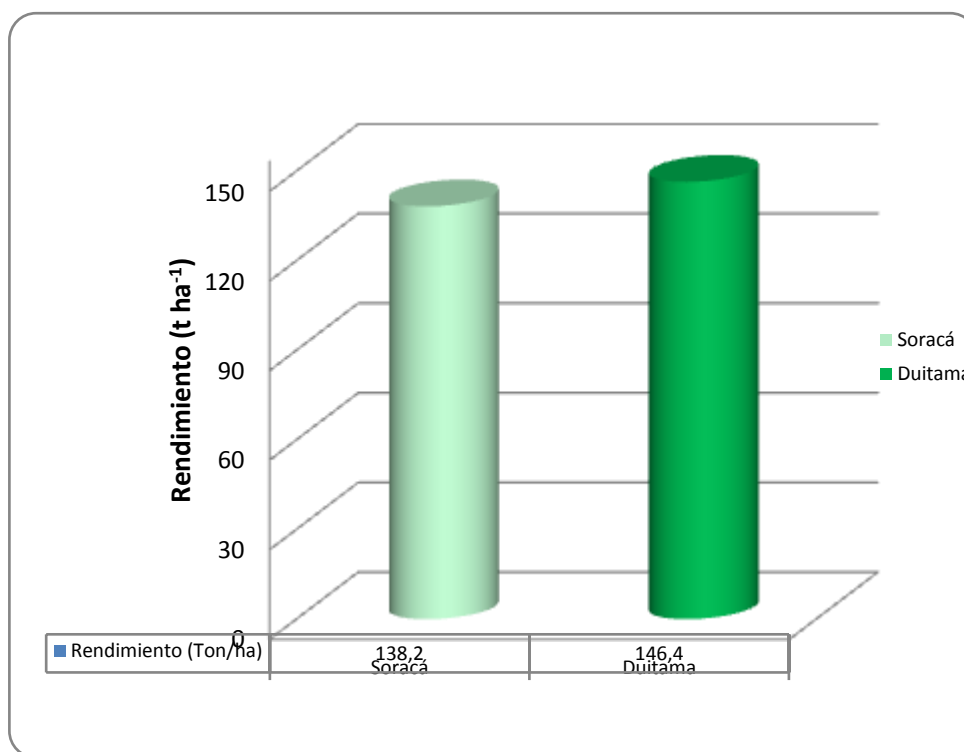
La temperatura media fue de 13°C, 14,2°C y 18,1±0,003°C para Toca, Soracá y Duitama respectivamente, mientras que el manejo del cultivo se hizo ajustando un mismo paquete agronómico.

En Duitama (18,1±0,03°C de temperatura media), la variedad 0615 de remolacha azucarera presentó mayores rendimientos a los 180 dds con un promedio de 166 t ha<sup>-1</sup>, comparados con 81,9 t ha<sup>-1</sup> y 92,4 t ha<sup>-1</sup> para Toca y Soracá respectivamente (p>0,001).

Sin embargo, el tiempo cronológico no es suficiente para comparar el alcance fisiológico de ciertas etapas de desarrollo, en particular el alcance del tamaño del órgano vegetativo cosechable. En efecto, puede explicar el contraste del ambiente –especialmente de la temperatura–, sobre el comportamiento del cultivo, pero no permite concluir sobre el rendimiento de la variedad porque no hay una base común de referencia.

Teniendo como referencia el tiempo cronológico, el valor del rendimiento de la variedad 0615 para Duitama es muy superior debido a que a los 180 días en esta localidad se acumularon 3300°Cd, mientras que en la misma fecha cronológica en las localidades de Toca y Soracá se alcanzó una acumulación de unidades de calor de 2376°Cd y 2554,2°Cd respectivamente. Esto implica que en cada localidad el cultivo se encontró fisiológicamente en un punto diferente de desarrollo de la raíz (diferente edad fisiológica), así que en Duitama se alcanzó el tamaño de cosecha, un punto considerablemente más avanzado respecto al llenado y desarrollo radical parcialmente alcanzado a 2376°Cd y 2554,2°Cd de unidades de calor acumuladas en Toca y Soracá respectivamente.

Con base en los registros de rendimiento para Soracá y la medición de rendimientos parciales que se tomó en los muestreos del experimento en el ICA-Surbatá (Duitama), a continuación se presenta el rendimiento parcial a los 3000°Cd para la variedad 0615 (*Figura 40*), los cuales son alcanzados a los 160 dds en el ICA-Surbatá y a los 210 dds en Soracá (50 dds de diferencia).



*Figura 40. Rendimiento parcial de remolacha azucarera variedad 0615 a los 3000°Cd en dos localidades de la región del valle del río Chicamocha.*

De acuerdo a la acumulación de unidades de calor, el rendimiento parcial de la variedad 0615 hacia los 3000°Cd es de 146,4 ton/ha para el cultivo de Duitama, mayor al rendimiento de 138,22 ton/ha de los cultivos de Soracá bajo el mismo manejo agronómico.

Los rendimientos parciales de la variedad 0615 fueron similares a los 3000°Cd. Para visualizar este efecto, a continuación se comparan los rendimientos en la etapa final del ciclo de cultivo de la variedad 0615 de remolacha azucarera para las localidades.

La *Figura 41* muestra los rendimientos parciales de Soracá y Duitama, a partir de los 1700°Cd hasta los 3000°Cd. La variedad 0615 sembrada en Duitama presentó mayor rendimiento parcial, lo que se puede asociar a un mayor régimen térmico general, y al mayor número de horas de brillo solar de Duitama comparado con Soracá, que a su vez permitió durante mayor tiempo la producción de fotoasimilados, traslocación de sacarosa y llenado de azúcares en las raíces, un alcance oportuno del tamaño del órgano vegetativo cosechable o madurez fisiológica de la raíz.

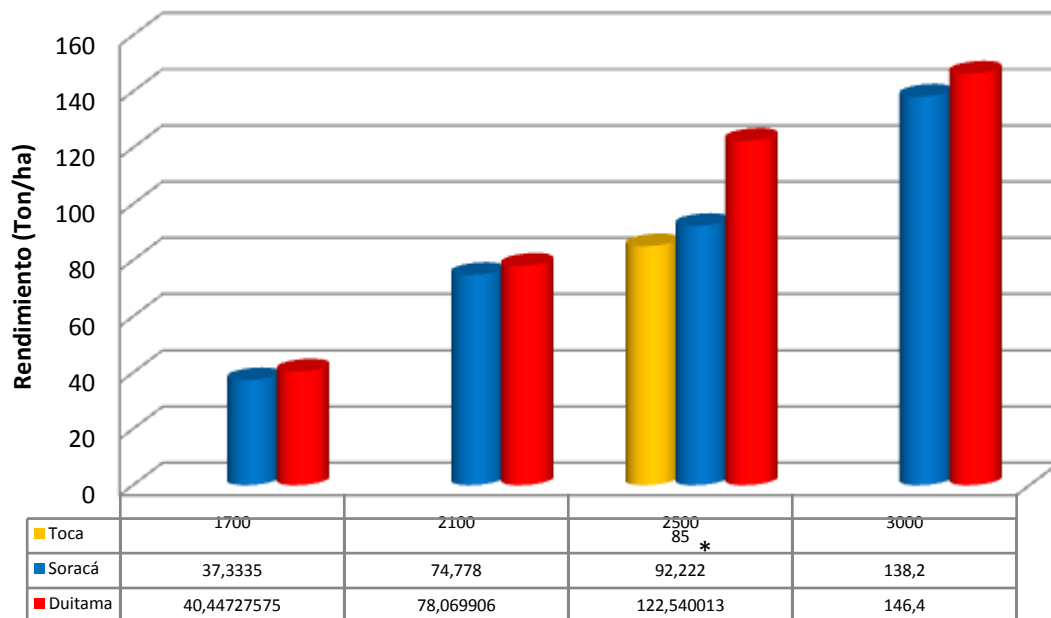


Figura 41. Rendimientos parciales de remolacha azucarera variedad 0615 en tres localidades de la región del valle de Chicamocha. \*Único valor reportado para la localidad de Toca.

Además, el *Índice de Cosecha* (IC) aunque no es una garantía del rendimiento, por ser un porcentaje y expresar la acumulación de peso seco relativa al peso seco total, es una medida interesante en la comparación de variedades. La aplicación del IC en remolacha azucarera se expresó como el coeficiente porcentual de migración de peso seco de raíz al final del cultivo. El IC de las variedades Hillesehög de remolacha azucarera 0505 y 0615, en el cultivo del ICA-Surbatá fue de 80 y 85% respectivamente, lo que reitera la observación del crecimiento de mayor migración relativa de peso seco hacia raíces en la variedad 0615.

Es deseable alcanzar oportunamente las unidades de calor necesarias para la cosecha porque el ciclo es más corto, se reducen los costos de producción y probablemente el desarrollo y la acumulación de peso seco son más eficientes energéticamente, mejora la calidad de la cosecha, se obtienen mejores rendimientos y productividad.

En contraste, sobrepasar el momento oportuno de cosecha hace que los tejidos respiren por un mayor lapso de tiempo después de alcanzada la madures fisiológica, y se

incrementen las probabilidades de que factores externos de tipo biótico o abiótico afecten las principales etapas de desarrollo y en consecuencia el rendimiento.

## Conclusiones

La  $T_b$  para las variedades de remolacha azucarera es inferior a  $1,8^{\circ}\text{C}$ , dadas las TRC de  $0,00356 \text{ gg}^{-1} \cdot \text{día}^{-1}$  y  $0,00740 \text{ gg}^{-1} \cdot \text{día}^{-1}$  para las variedades 0615 y 0505 respectivamente; el valor de  $T_b$  al compararse con la información histórica y los datos de temperatura mínima registrados en el cultivo, no es limitante para su crecimiento y desarrollo en la región del valle del río Chicamocha (zona productora de montaña alta andina en Boyacá).

En condiciones climáticas idénticas, en las que se cultivaron las variedades de remolacha azucarera 0615 y 0505 en el experimento del ICA Surbatá-Duitama, la variedad 0615 se desarrolló más rápido y obtuvo mayor rendimiento y calidad en términos de contenidos de sacarosa en la raíz que la variedad 0505, ya que la primera presentó: mayor tasa de emisión foliar, un inicio más rápido hacia la etapa de desarrollo de la raíz, una duración más prolongada en la etapa de desarrollo de la raíz ( $2200^{\circ}\text{Cd}$ , 120 días vs  $2050^{\circ}\text{Cd}$ , 112 días), índices más altos del crecimiento radical y de planta completa ( $k$ , AFE, TCC, TAN, IC); en contraste, la variedad 0505 tuvo un crecimiento dirigido a la asignación de peso seco hacia las hojas del cultivo, lo que se refleja en mayores valores de los índices relacionados con el área y peso de las hojas (IAF, RAF, RPF).

Los rendimientos obtenidos en el experimento de Duitama para ambas variedades superaron el rendimiento techo de  $100 \text{ t ha}^{-1}$  de referencia fijado por la literatura y el distribuidor de semilla, obtenidos en el momento oportuno de cosecha de  $3300^{\circ}\text{Cd}$  (180 dds en la localidad de Duitama). Esto probablemente se explica porque el cultivo estuvo expuesto a la temperatura ( $18,1 \pm 0,03^{\circ}\text{C}$ ) que reporta la literatura para su óptimo desarrollo, lo que combinado con “bajas temperaturas nocturnas” probablemente favoreció la acumulación de sacarosa.

Los rendimientos de las localidades de referencia en la región del Valle del Río Chicamocha, muestran que hubo interacción del ambiente, debido a que aún empleando la escala de tiempo térmico como referencia, el mayor rendimiento se dio en la localidad que presentó una temperatura promedio de  $18^{\circ}\text{C}$ , por tanto, Duitama es la localidad más adecuada para el establecimiento del cultivo de remolacha; sin embargo, en las localidades

se espera que se alcance todas las etapas de desarrollo del cultivo, ya que ninguna localidad dentro de esta región rebasó la  $T_b$  para el cultivo, ni su temperatura máxima límite; a pesar de esto, se requerirá la evaluación de un mayor número de ambientes con diferentes temperaturas para alcanzar un mayor conocimiento (en especial temperaturas más elevadas con respecto a la óptima y otras variables climáticas) que permita construir una herramienta integral para la selección de localidades en Boyacá, y en el país, aptas para el establecimiento de este cultivo.

Teniendo en cuenta la participación directa de la temperatura sobre el desarrollo, la acumulación de unidades de calor sirvió para definir el cultivo fisiológicamente (*v.gr.* escala BBCH del cultivo, momento oportuno de cosecha). Al comparar las dos variedades se estableció como punto sensible en el desarrollo del cultivo, la etapa de desarrollo de raíz, lo que implica un mayor esfuerzo en el manejo agronómico en ese momento para potencializar el rendimiento del cultivo.

El modelo propuesto se puede utilizar preliminarmente para elegir localidades que satisfagan la demanda térmica, hacer el seguimiento del desarrollo del cultivo e identificar el momento de cosecha.

Se encontraron dos variables morfofisiológicas que sirven para estimar los rendimientos del cultivo en las dos variedades: el desarrollo de hojas completamente expandidas y el diámetro máximo de la raíz de remolacha; por su alta correlación con el rendimiento del cultivo y la facilidad para su medición en campo.

La medición de grados *brix* puede ser utilizada preliminarmente como herramienta de apoyo en campo para predecir el momento oportuno de cosecha, ya que éste está asociado con los mayores valores de grados *brix* (21 y 23 para las variedades 0505 y 0615 respectivamente).

## Referencias

- Amanullah** M, Kailasam C, Safiullah A, Selvam S, y Sivakumar K. 2007. Crop Simulation Growth Model in Cassava. *Research Journal of Agricultura and Biological Sciences* 3:255-9
- Baker** J, y Reddy V. 2001. Temperature Effects on Phenological Development and Yield of Muskmelon. *Annals of Botany* 87:605-13
- Barbanti** L, Monti A, y Venturi G. 2007. Nitrogen dynamics and fertilizer use efficiency in leaves of different ages of sugar beet (*Beta vulgaris*) at variable water regimes. *Annals of Applied Biology* 150:197-205
- Beckers** R. 2007. La remolacha azucarera tropical: Desarrollo sostenible económico, ecológico y social. *Innovación en biocombustibles*. Syngenta
- Bell** C, Milford G, y Leigh R. 1996. *Sugar beet*: en: Zamski, E., y Schaffer A. (eds) Photoassimilate Distribution in Plants and Crops: Source-Sink Relationships. Marcel Dekker INC., New York, pp 691-707.
- Bonhomme** R. 2000. Bases and limits to using degree day units. *European Journal of Agronomy* 13:1-10
- Bruzon** S. 2007. Curso sobre Aspectos Agronómicos de la Remolacha Azucarera *Beta vulgaris* L. y Caña de Azúcar *Saccharum officinarum*. *Fundación para el desarrollo del Quindío*:53Pp
- Demmers-Derks** H, Mitchell R, Mitchell V, y Lawlor D. 1998. Response of Sugar Beet (*Beta vulgaris* L.) Yield and Biochemical Composition to Elevated CO<sub>2</sub> and Temperature at two Nitrogen Applications. *Plant, Cell and Environment* 21:829-36
- Everaarts** A. 1999. Harvest Date Prediction for Field Vegetables. *Gartenbauwissenschaft* 64:20-5
- Gardner** FP, Pearce RB, y Mitchel RL. 1985. Carbon Fixation by Crop Canopies. *Physiology of Crop Plants*. Iowa State University Press:31-57
- Getz** H. 2000. *Sucrose accumulation and synthesis in sugar beet*: en: Gupta, A., y Kaur, N. (eds) Carbohydrate Reserves in Plants. Elsevier Sciences., Amsterdam, pp 55-77.

- Henke S**, Bubník Z, Hinková A, y Pour V. 2006. Model of a sugar factory with bioethanol production in program Sugar<sup>TM</sup>. *Journal of Food Engineering* 77:416-20
- Hermann K**, Meinhard J, Dobrev P, Linkies A, y Pesek B, et al. 2007. 1-Aminocyclopropane-1-carboxylic acid and abscisic acid during the germination of sugar beet (*Beta vulgaris* L.) - a comparative study of fruits and seeds. *Journal of Experimental Botany* 58:3047-60
- Hoffmann C**, y Märlander B. 2005. Composition of harmful nitrogen in Sugar Beet (*Beta vulgaris* L.) -amino acids, betaine, nitrate- as affected by Genotype and Environment. *European Journal of Agronomy* 22:255-65
- Holen C**, y Dexter A. 1996. A Growing Degree Day Equation for Early Sugar Beet Leaf Stages. *Sugarbeet Research and Extension Reports* 27:152-7
- Jeuffroy M-H**, y Ney B. 1997. Crop Physiology and Productivity. *Field Crops Research* 53:3-16
- Kenter C**, Hoffmann C, y Märlander B. 2006. Effects of weather variables on sugar beet yield development (*Beta vulgaris* L.). *European Journal of Agronomy* 24:62-9
- Kropff M**, Bastiaans L, y Lotz L. 1997. Enfoques de Sistemas en el Manejo de Malezas y el Diseño de Variedades de Cultivo Inhibidoras de Malezas. *Universidad Agrícola de Wageningen, Departamento de Producción Teórica y Ecología Productiva. Holanda*:93-108
- Lemaire S**, Maupas F, Cournède P-H, y Reffye Pd. 2009. *A morphogenetic crop model for sugar beer (Beta vulgaris L.):* In International Symposium on Crop Modelling and Decision Support., Nanjing, China, Pp 17.
- Li B**, Geiger D, y Shieh W-J. 1992. Evidence for Circadian Regulation of Starch and Sucrose Synthesis in Sugar Beet Leaves. *Plant Physiology* 99:1393-9
- Mäck G**, y Hoffmann CM. 2006. Organ-specific adaptation to low precipitation in solute concentration of sugar beet (*Beta vulgaris* L.). *European Journal of Agronomy* 25:270-9
- Mäck G**, Hoffmann CM, y Märlander B. 2007. Nitrogen compounds in organs of two sugar beet genotypes (*Beta vulgaris* L.) during the season. *Field Crops Research* 102:210-8

- Mahn** K, Hoffmann C, y Märländer B. 2002. Distribution of quality components in different morphological sections of sugar beet (*Beta vulgaris* L.). *European Journal of Agronomy* 17:29-39
- Meier** U. 2001. Estadios de las plantas mono y dicotiledóneas. *Centro Federal de Investigaciones Biológicas para Agricultura y Silvicultura, y Asociación Alemana de Agroquímicos. Segunda edición. Berlin y Braunschweig*:149 Pp
- Milford** G. 2006. *Plant Structure and Crop Physiology* en: Draycott, A. (eds) Sugar Beet. Blackwell publishing., Oxford, pp 30-47.
- Monreal** JA, Jimenez ET, Remesal E, Morillo-Velarde R, Garcia-Maurino S, y Echevarria C. 2007. Proline content of sugar beet storage roots: Response to water deficit and nitrogen fertilization at field conditions. *Environmental and Experimental Botany* 60:257-67
- NDAWN**. 2007. Sugarbeet Growth Stage Development and Growing Degree Day Accumulation. *Page of North Dakota Agricultural Weather Network*: <http://ndawn.ndsu.nodak.edu/help.html?topic=sugarbeetgdd>
- Ozolina** N, Pradedova E, y Salyaev R. 2005. The Dynamics of Hormonal Status of Developing Red Beet Root (*Beta vulgaris* L.) in Correlation with the Dynamics of Sugar Accumulation. *Biology Bulletin* 32:22-6
- Ramsperger-Gleixner** M, Geiger D, Hedrich R, y Sauer N. 2004. Differential Expression of Sucrose Transporter and Polyol Transporter Genes during Maturation of Common Plantain Companion Cells. *Plant Physiology* 134:147-60
- Richter** GM, Jaggard KW, y Mitchell RAC. 2001. Modelling radiation interception and radiation use efficiency for sugar beet under variable climatic stress. *Agricultural and Forest Meteorology* 109:13-25
- Rosillo**-Calle F, y Walter A. 2006. Global market for bioethanol: historical trends and future prospects. *Energy for Sustainable Development* 10:20-32
- Ruiz** RA, y Bertero HD. 2008. Light interception and radiation use efficiency in temperate quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) cultivars. *European Journal of Agronomy* 29:144-52
- Sauer** N. 2007. Molecular physiology of higher plant sucrose transporters. *FEBS Letters* 581:2309-17

- Smith D**, Inma-Bamber N, y Thorburn P. 2005. Growth and function of the sugarcane root system. *Field Crops Research* 92:169-83
- Spitters C**, Keulen Hv, y Kraaligen Dv. 1989. *A simple and universal crop growth simulator: SUCROP87*. En: Rabinge, R., Ward, S. y van Laar, H. (eds). Simulation and system management in crop protection. Pudoc, Wageningen. 107-22 pp.
- Taiz L**, y Zeiger E. 2006. Plant Physiology. *Sinauer Associates. Fourth Edition*:764Pp
- Tei F**, Aikman D, y Scaife A. 1996. Growth of Lettuce, Onion and Red Beet. 2. Growth Modelling. *Annals of Botany* 78:645-52
- Trudgill DL**, Honek A, Li D, y Straalen NM. 2005. Thermal time - concepts and utility. *Annals of Applied Biology* 146:1-14
- Tsialtas J**, y Maslari N. 2005. Leaf area estimation in a sugar beet cultivar by linear models. *Photosynthetica* 43:477-9
- Werker R**, Jaggard K, y Allison M. 1999. Modelling partitioning between structure and storage in sugar beet: Effects of drought and soil nitrogen. *Plant and Soil* 207:97-106
- Yang S**, Logan J, y Coffey DL. 1995. Mathematical formulae for calculating the base temperature for growing degree days. *Agricultural and Forest Meteorology* 74:61-74

**Anexo A. Información edafoclimática y libro de campo del cultivo en el Centro de Investigación ICA-Surbatá (Duitama) y de dos localidades de la región del valle del río Chicamocha**

<b>País</b>	COLOMBIA
<b>Localización</b>	Duitama (Boyacá)
<b>Latitud</b>	5°47'38,62"N
<b>Longitud</b>	73°4'28,95"O
<b>ASNМ</b>	2520
<b>MSL</b>	%A:28 - %L:30 - %Ar:42 (Arcilloso)
<b>pH del suelo</b>	5,7
<b>EC (ms/cm)</b>	0,56
<b>P disponible</b>	6 ppm
<b>K disponible</b>	1,9 (meq/100g)
<b>O.C. (%)</b>	4,40%
<b>Cultivo previo</b>	Papa
<b>Fecha de siembra</b>	18 de Marzo de 2009
<b>Fecha de emergencia</b>	25 de Febrero de 2009
<b>Fertilización 1</b>	60N:150P:30K + 1500 ton/ha Cal Dolomita / Hidratada
<b>Fertilización 2</b>	60N:30K
<b>Aplicación para malezas pre-emergencia</b>	Tramat (2,5 L/ha) + Pyramin (3 Kg/ha) + Dual Gold (0,3 L/ha) + Glifosato (2 L/ha)
<b>Aplicación para malezas pos-emergencia 1</b>	Betanal (1 L/ha)
<b>Aplicación para malezas pos-emergencia 2</b>	Betanal (1,5 L/ha) + Pyramin (0,3 Kg/ha)
<b>Aplicación para insectos</b>	Basudin (1 L/ha)
<b>Localización</b>	Toca (Boyacá)
<b>Latitud</b>	5°33'45,8"-N
<b>Longitud</b>	73°12'29,5"-W
<b>ASNМ</b>	2730
<b>MSL</b>	%A: 23% - %L:30 - %Ar:47
<b>pH del suelo</b>	5,3
<b>EC (ms/cm)</b>	0,12
<b>P disponible</b>	45,2
<b>K disponible</b>	1,23 meq.100gr
<b>O.C. (%)</b>	2,62%
<b>Cultivo previo</b>	Trigo
<b>Fecha de siembra</b>	7 de Agosto de 2008

<b>Fecha de emergencia</b>	14 de Agosto de 2008
<b>Fertilización</b>	100N:22P:11K:7MgO:15S
<b>Localización</b>	Soracá (Boyacá)
<b>Latitud</b>	5°29'51,5"
<b>Longitud</b>	73°20'34"
<b>ASNM</b>	2821
<b>MSL</b>	%A: 31% - %L:32 - %Ar:37
<b>pH del suelo</b>	5,7
<b>EC (ms/cm)</b>	0,89
<b>K disponible</b>	1,89 meq.100gr
<b>O.C. (%)</b>	6,28%
<b>Cultivo previo</b>	Remolacha Azucarera
<b>Fecha de siembra</b>	23 de Octubre de 2007
<b>Fecha de emergencia</b>	12 de Noviembre de 2007
<b>Fertilización</b>	130.5N:96P2O5:152K2O:14Ca:23,9Mg:25S:0,53B:0,47Zn

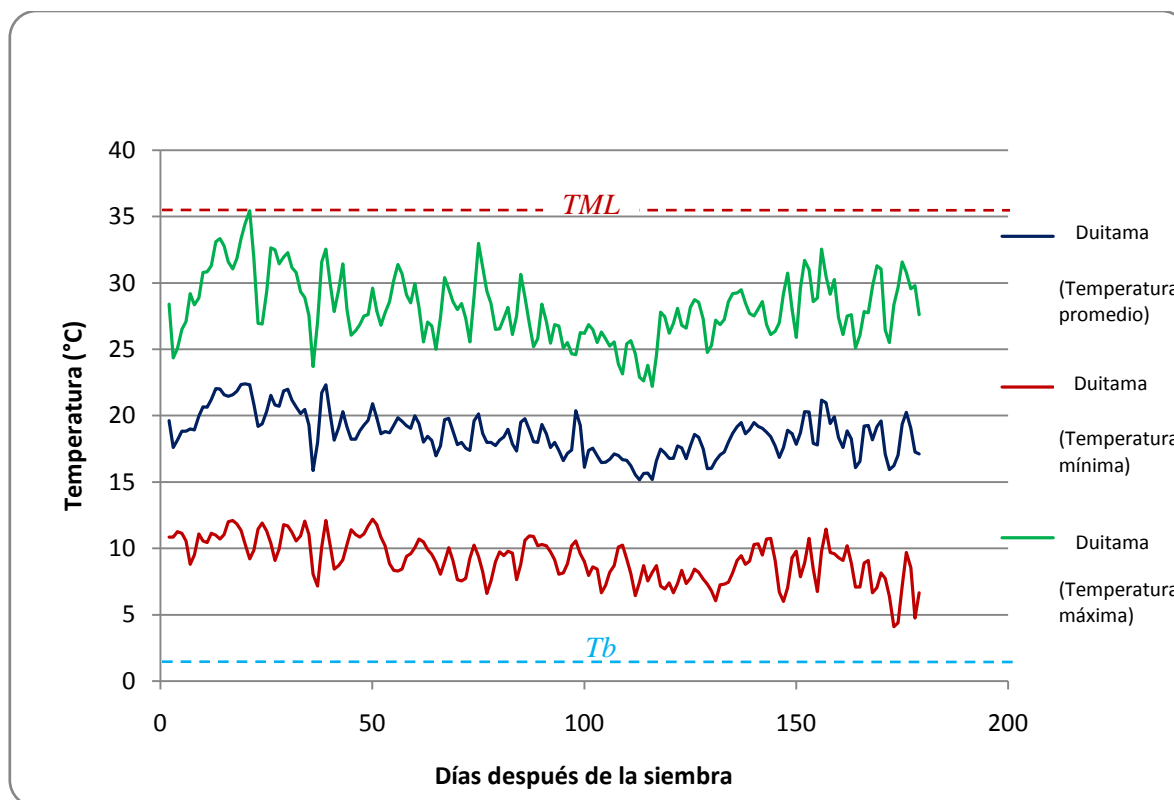


Figura 42. Temperatura mínima, promedio y máxima diaria en el ICA-Surbaratá (Duitama).

**Tabla 7. Horas de Brillo Solar y RFA en el ICA-Surbatá (Duitama) durante el experimento**

Fecha	Brillo Solar (h)	PAR (MJ)	Fecha	Brillo Solar (h)	PAR (MJ)
18/03/2009	1,3	11,36	20/04/2009	4,3	14,54
19/03/2009	1,3	11,35	21/04/2009	0	8,53
20/03/2009	0	9,32	22/04/2009	2,7	12,26
21/03/2009	3,3	14,45	23/04/2009	1,7	10,86
22/03/2009	0,7	10,40	23/04/2009	1,5	10,56
23/03/2009	1	10,86	24/04/2009	1,8	10,95
24/03/2009	1	10,85	25/04/2009	6	16,72
25/03/2009	1,6	11,77	26/04/2009	7,8	19,16
26/03/2009	3,7	15,01	27/04/2009	6,5	17,34
27/03/2009	4,2	15,77	28/04/2009	3,2	12,80
28/03/2009	4,9	16,83	29/04/2009	7,6	18,79
29/03/2009	3,1	14,04	30/04/2009	8,4	19,85
30/03/2009	6,6	19,40	01/05/2009	0,9	9,60
31/03/2009	3,4	14,47	01/05/2009	2,6	11,90
01/04/2009	3,9	15,22	02/05/2009	6,2	16,77
01/04/2009	1,6	11,68	03/05/2009	6,6	17,29
02/04/2009	6,6	19,30	04/05/2009	8,4	19,70
03/04/2009	8,7	22,48	05/05/2009	7,6	18,59
04/04/2009	9,5	23,67	06/05/2009	3,4	12,90
05/04/2009	8,7	22,41	07/05/2009	1,1	9,78
06/04/2009	6,6	19,19	08/05/2009	3,5	13,00
07/04/2009	1,5	11,43	08/05/2009	5,6	15,81
08/04/2009	1,3	11,11	09/05/2009	0,6	9,08
09/04/2009	2,4	12,76	10/05/2009	0,8	9,34
10/04/2009	4,5	15,90	11/05/2009	7,3	18,04
11/04/2009	7,2	19,93	12/05/2009	5,2	15,22
12/04/2009	6,7	19,15	13/05/2009	0	8,25
13/04/2009	7,8	20,76	14/05/2009	3,1	12,39
14/04/2009	8,1	21,17	15/05/2009	0,3	8,64
14/04/2009	8,7	22,03	16/05/2009	3,3	12,64
15/04/2009	2,9	13,35	17/05/2009	4,2	13,83
16/04/2009	7,6	20,31	18/05/2009	6,7	17,16
17/04/2009	1,8	11,67	19/05/2009	3,1	12,35
18/04/2009	2,9	13,28	19/05/2009	6,3	16,61
19/04/2009	1,8	11,63	20/05/2009		8,22
20/04/2009	2,8	13,08	21/05/2009	3,1	12,34
21/04/2009	6,1	17,90	22/05/2009	1,4	10,08
22/04/2009	7,1	19,33	23/05/2009	0,6	9,01
23/04/2009	5,4	16,80	24/05/2009	0,6	9,01
23/04/2009	4,4	15,31	25/05/2009	6,5	16,87
24/04/2009	5	16,15	26/05/2009	2,4	11,41
25/04/2009	3,7	14,23	27/05/2009	2	10,88
26/04/2009	7,9	20,28	28/05/2009	4	13,54
27/04/2009	0,6	9,69	29/05/2009	1,9	10,75
28/04/2009	3,5	13,85	30/05/2009	4,6	14,35
29/04/2009	1,9	11,52	31/05/2009	4,4	14,09
09/04/2009	0,8	9,91	31/05/2009	3,5	12,90
10/04/2009	1,9	11,47	01/06/2009	3,2	12,51
11/04/2009	4,2	14,73	02/06/2009	0,7	9,17
12/04/2009	1,4	10,71	03/06/2009	2,8	11,99
13/04/2009	3,4	13,53	04/06/2009	6,6	17,08
14/04/2009	2,9	12,80	05/06/2009	2,1	11,07
14/04/2009	4,3	14,75	06/06/2009	8,3	19,39
15/04/2009	7,9	19,80	07/06/2009	0,5	8,94
16/04/2009	6,1	17,23	08/06/2009	5,2	15,26
17/04/2009	7,1	18,60	09/06/2009	4,9	14,88
18/04/2009	1,9	11,26	09/06/2009	1,5	10,31
19/04/2009	3,7	13,76	10/06/2009	6,8	17,47
20/04/2009	2,8	12,47	11/06/2009	3,3	12,77

Fecha	Brillo Solar (h)	PAR (MJ)	Fecha	Brillo Solar (h)	PAR (MJ)
12/06/2009	4,7	14,68	06/08/2009	10,2	24,57
13/06/2009	2,9	12,26	07/08/2009	4,9	16,57
14/06/2009	5,7	16,07	08/08/2009	2,8	13,40
15/06/2009	4,6	14,60	09/08/2009	2,3	12,65
16/06/2009	3,5	13,13			
17/06/2009	7,5	18,60			
18/06/2009	4,3	14,26			
19/06/2009	0,8	9,49			
20/06/2009	5,7	16,22			
21/06/2009	3,5	13,23			
22/06/2009	6,4	17,24			
23/06/2009	10,3	22,64			
24/06/2009	3,7	13,57			
25/06/2009	6,8	17,88			
26/06/2009	7	18,19			
27/06/2009	4,6	14,90			
28/06/2009	3,9	13,95			
29/06/2009	3,6	13,56			
30/06/2009	0	8,56			
01/07/2009	6,2	17,25			
02/07/2009	4,6	15,04			
03/07/2009	2,4	11,98			
04/07/2009	10,3	23,13			
05/07/2009	0	8,63			
05/07/2009	3,5	13,60			
06/07/2009	5,2	16,04			
07/07/2009	1,7	11,10			
08/07/2009	5	15,82			
09/07/2009	6,7	18,28			
10/07/2009	5,1	16,02			
11/07/2009	4,1	14,62			
12/07/2009	4,3	14,94			
13/07/2009	6,5	18,14			
14/07/2009	7,8	20,05			
15/07/2009	4,7	15,61			
16/07/2009	5,4	16,65			
17/07/2009	7,5	19,73			
18/07/2009	5,3	16,57			
19/07/2009	4	14,71			
19/07/2009	7,4	19,70			
20/07/2009	1,6	11,25			
21/07/2009	7,8	20,37			
22/07/2009	4,9	16,14			
23/07/2009	3,6	14,25			
24/07/2009	6,2	18,12			
25/07/2009	2,3	12,38			
26/07/2009	10,2	24,11			
27/07/2009	4,1	15,09			
28/07/2009	5,2	16,75			
29/07/2009	8,4	21,55			
30/07/2009	6,8	19,20			
31/07/2009	4,5	15,79			
01/08/2009	1,2	10,86			
02/08/2009	8,3	21,54			
03/08/2009	10,2	24,43			
03/08/2009	6,7	19,19			
04/08/2009	6,5	18,92			
05/08/2009	7,1	19,85			

**Tabla 8. Temperaturas medias de dosel y edáfica en el ICA-Surbatá (Duitama) durante el experimento**

Fecha	Temperatura media del suelo (°C)	Temperatura media del dosel (°C)	Fecha	Temperatura media del suelo (°C)	Temperatura media del dosel (°C)
18/03/2009	18,75	20,9	20/04/2009	19,4	21,75
19/03/2009	18,5	18,35	21/04/2009	18,95	16,85
20/03/2009	18,2	16,85	22/04/2009	18,15	14,9
21/03/2009	18,4	19,45	23/04/2009	6,96	7,72
22/03/2009	18,4	18,2	23/04/2009	10,83	13,32
23/03/2009	18,1	19,45	24/04/2009	19,2	22,4
24/03/2009	17,8	18,55	25/04/2009	19,7	22,25
25/03/2009	17,65	19,3	26/04/2009	19,45	18,1
26/03/2009	18,1	20,65	27/04/2009	19,15	18,2
27/03/2009	18,2	20,7	28/04/2009	19,05	20
28/03/2009	18,55	20,6	29/04/2009	19,1	20,6
29/03/2009	18,4	21,85	30/04/2009	19,3	17,7
30/03/2009	18,5	22,25	01/05/2009	7,32	6,3
31/03/2009	18,5	21,8	01/05/2009	11,1	12,48
01/04/2009	9,1	11,025	02/05/2009	18,35	17,7
01/04/2009	9,25	10,35	03/05/2009	18,1	20
02/04/2009	18,45	21,55	04/05/2009	17,8	18,6
03/04/2009	18,65	21,6	05/05/2009	17,9	20,7
04/04/2009	19,3	22,1	06/05/2009	17,9	21,1
05/04/2009	19,85	22,6	07/05/2009	17,8	18,6
06/04/2009	20,35	22,2	08/05/2009	7,02	6,94
07/04/2009	20,3	22,45	08/05/2009	10,5	11,76
08/04/2009	20,2	19,25	09/05/2009	17,25	18,9
09/04/2009	19,2	19,15	10/05/2009	17,15	18,55
10/04/2009	19,05	19,65	11/05/2009	17,3	20
11/04/2009	19,2	21	12/05/2009	17,15	19,7
12/04/2009	19,6	22,05	13/05/2009	17,1	19,45
13/04/2009	19	19,55	14/05/2009	16,75	19,05
14/04/2009	7,64	8,36	15/05/2009	16,75	19,05
14/04/2009	11,79	13,5	16/05/2009	16,8	20,95
15/04/2009	20,05	21,9	17/05/2009	16,7	17,9
16/04/2009	20,05	22,1	18/05/2009	16,6	18,15
17/04/2009	19,65	20,25	19/05/2009	6,54	6,98
18/04/2009	19,6	21,1	19/05/2009	9,78	11,79
19/04/2009	19,85	19,2	20/05/2009	16,2	17,5
20/04/2009	19,4	21,75	21/05/2009	15,95	16,45
21/04/2009	18,95	16,85	22/05/2009	15,75	19
22/04/2009	18,15	14,9	23/05/2009	16,2	20,4
23/04/2009	6,96	7,72	24/05/2009	16,3	19,2
23/04/2009	10,83	13,32	25/05/2009	16,1	18,5
24/04/2009	19,2	22,4	26/05/2009	15,9	17,15
25/04/2009	19,7	22,25	27/05/2009	16,5	18,85
26/04/2009	19,45	18,1	28/05/2009	16,45	16,25
27/04/2009	19,15	18,2	29/05/2009	16,55	18,55
28/04/2009	19,05	20	30/05/2009	16,95	20,65
29/04/2009	19,1	20,6	31/05/2009	6,78	6,42
09/04/2009	19,2	19,15	31/05/2009	10,32	13,2
10/04/2009	19,05	19,65	01/06/2009	17,4	17,7
11/04/2009	19,2	21	02/06/2009	17,45	18,3
12/04/2009	19,6	22,05	03/06/2009	17,4	17,7
13/04/2009	19	19,55	04/06/2009	17,25	17,8
14/04/2009	7,64	8,36	05/06/2009	17,25	18,5
14/04/2009	11,79	13,5	06/06/2009	17	18,3
15/04/2009	20,05	21,9	07/06/2009	16,9	19,65
16/04/2009	20,05	22,1	08/06/2009	16,35	16,1
17/04/2009	19,65	20,25	09/06/2009	4	2,25
18/04/2009	19,6	21,1	09/06/2009	12,0375	16,35
19/04/2009	19,85	19,2	10/06/2009	16,6	20,4
20/04/2009	19,4	21,75	11/06/2009	16,65	19,15

Fecha	Temperatura media del suelo (°C)	Temperatura media del dosel (°C)	Fecha	Temperatura media del suelo (°C)	Temperatura media del dosel (°C)
12/06/2009	16,45	18,7	06/08/2009	18,55	19,2
13/06/2009	16,45	17,4	07/08/2009	18,35	18,35
14/06/2009	16,25	18,6	08/08/2009	18,45	18,5
15/06/2009	16,7	20,1	09/08/2009	18,45	16,95
16/06/2009	17,2	17,2	10/08/2009	17,55	16,75
17/06/2009	17,15	18	11/08/2009	17,95	18,45
18/06/2009	17,05	18	12/08/2009	18,15	19,35
19/06/2009	17	16,8	13/08/2009	18,3	17,95
20/06/2009	17,15	16,45	14/08/2009	18,05	17,75
21/06/2009	17,15	17,9	15/08/2009	18,05	19,7
22/06/2009	17,1	16,95	16/08/2009	18,85	20,9
23/06/2009	10,11	10,92	17/08/2009	7,11	7,05075
24/06/2009	12,1545	12,8845	17/08/2009	11,64625	12,61425
25/06/2009	16,6	17,55	18/08/2009	18,55	16,2
26/06/2009	16	17,25	19/08/2009	19	19,4
27/06/2009	16,4	17,85	20/08/2009	19,65	22,95
28/06/2009	16,3	16,1	21/08/2009	19,4	19
29/06/2009	16	16,85	22/08/2009	18,75	19,85
30/06/2009	16,2	16,15	23/08/2009	18,8	20
01/07/2009	16,4	17,3	24/08/2009	18,4	16,7
02/07/2009	16,2	16,95	25/08/2009	18,55	18,5
03/07/2009	16,3	17,05	26/08/2009	18,7	19,2
04/07/2009	16,3	16,35	27/08/2009	18,85	17,3
05/07/2009	4,347	3,1185	28/08/2009	18,4	14,9
05/07/2009	12,045	13,8335	29/08/2009	18,35	18,25
06/07/2009	16,55	15,5	30/08/2009	6,5975	7,315
07/07/2009	16,35	15,6	30/08/2009	11,96	12,87
08/07/2009	16,8	14,75	31/08/2009	18,7	18,35
09/07/2009	16,65	16,55	01/09/2009	19	18
10/07/2009	16,6	14,8	02/09/2009	19,65	20,35
11/07/2009	16,3	15,6	03/09/2009	19,45	18,85
12/07/2009	16,15	17,65	04/09/2009	19,3	15,35
13/07/2009	16,65	17,3	05/09/2009	18,25	16,55
14/07/2009	16,85	17,1	06/09/2009	18,6	15,9
15/07/2009	16,65	16,5	07/09/2009	19,2	18,15
16/07/2009	16,65	17,1	08/09/2009	19,9	20,6
17/07/2009	17,15	18,35	09/09/2009	20,35	19,9
18/07/2009	17,4	16,8	10/09/2009	20,1	18,2
19/07/2009	5,6595	4,092	11/09/2009	19,3	16,35
19/07/2009	11,725	12,6295	12/09/2009	19,15	17,9
20/07/2009	17,75	18,75	13/09/2009	18,2	8,65
21/07/2009	17,5	18,45			
22/07/2009	17,4	18,3			
23/07/2009	17,1	16,7			
24/07/2009	17,15	15,35			
25/07/2009	17,35	16,75			
26/07/2009	17,4	16,5			
27/07/2009	17,9	17,6			
28/07/2009	17,75	16,95			
29/07/2009	18,1	19,1			
30/07/2009	18,2	18,25			
31/07/2009	18,15	20,1			
01/08/2009	17,75	18,85			
02/08/2009	17,95	18,45			
03/08/2009	6,75	6,69375			
03/08/2009	11,5625	12,78125			
04/08/2009	18,9	19,5			
05/08/2009	18,75	18,9			

La información de horas luz para el cultivo en Duitama se obtuvo de la estación agro-meteorológica (AM) del IDEAM código 2403512 Surbatá-Bonza, mientras que la radiación RFA fue estimada a partir de la ecuación 10 (Spitters *et al.*, 1989). La información de temperatura y horas luz para las localidades de Toca y Soracá no se presenta en este anexo, éstas no fueron medidas directamente durante el cultivo (como en el caso de esta investigación), sino que fueron obtenidas de estaciones meteorológicas cercanas a dichas localidades.

Las temperaturas del experimento del ICA-Surbatá fueron registradas durante el 18 de marzo de 2009 y el 6 de Octubre de 2009 (*Figura 42*). Las temperaturas medias, mínimas y máximas no rebasaron el rango entre la  $T_b$  y la temperatura máxima límite, por lo que la temperatura disponible para el desarrollo y crecimiento del cultivo de remolacha azucarera no fue limitante para lograr los rendimientos esperados para las variedades estudiadas.

Adicional a la información edafoclimática, este anexo incluye a continuación la del libro de campo que se consignó durante el ciclo del cultivo, como la preparación de suelos en el experimento y los reactivos y sus cantidades específicas empleadas para la determinación de sacarosa en tejido radical de las variedades 0505 y 0615.

La preparación de suelo en Duitama se realizó aplicando las siguientes labores:

- 1) Desbrozado y retiro de residuos superficiales.
- 2) Aplicación con fumigadora de tractor herbicida generalizado Touchdown (Glifosato – 3 L/ha)
- 3) 1 pase de arado de disco (volteo).
- 4) 1 pase de rastra pesada (corte de arada de disco).
- 5) 2 pases de arado de cincel - largo y ancho (presencia de capa de arcilla endurecida)
- 6) 2 pases de rastra pesada (desterronamiento y pulimento del lote).
- 7) 1 pase de pulidor (incorporación de cales y fertilizantes).

Por su parte, los reactivos y cantidades absolutas usadas para la determinación de sacarosa en tejido radical de remolacha fueron: 5 L de Nitrógeno líquido, agua destilada, 150 mL de ácido sulfúrico concentrado, 80 g de fenol sólido, 0,56 g de EDTA disódico y 2,5 g de PVP (polivinil pirrolidona).

## Anexo B. Recolección de Información por unidad experimental para el experimento en el Centro de Investigación ICA-Surbatá (Duitama)

El formato que se presenta en la tabla 8 corresponde al empleado para la recolección de información morfofisiológica, de calidad y rendimiento del experimento en Duitama (Boyacá).

Tabla 9. Formato de registro de mediciones para cada planta

0505		0615	
Altura de planta (cm)			
Hoja 1 (cm)		<i>Largo</i>	<i>Ancho</i>
Hoja 2 (cm)			
Número de Hojas			
Expandidas		A medio expandir	Enrolladas
Longitud Máxima de la raíz carnosa (cm)		<i>fasciculada</i>	
Diámetro de la raíz carnosa (cm)		<i>Máximo</i>	
		<i>Medio</i>	
<i>Largo hoja (cm)</i>	<i>Ancho hoja (cm)</i>	<i>Largo pseudopecíolo (cm)</i>	<i>Ancho pseudopecíolo (cm)</i>
Color münsell TV de raíz carnosa			
Color münsell TV de parte aérea			
Área foliar (cm <sup>2</sup> )			
Peso seco hojas (g)			
Peso seco pseudopecíolos + hojas (g)			
Peso seco total (g)			
Estructura filotáxica adicional			

### Anexo C. Información de compactación del lote del ensayo en el Centro de Investigación ICA-Surbatá (Duitama)

Al principio de la investigación se realizó la medición por medio de penetrómetro de la compactación a lo largo del lote asignado, identificando de esta manera tres niveles de compactación que se puede agrupar en baja, leve y moderada (Figura 43). Lo cual fue tomado en cuenta para el diseño del experimento y el muestreo.

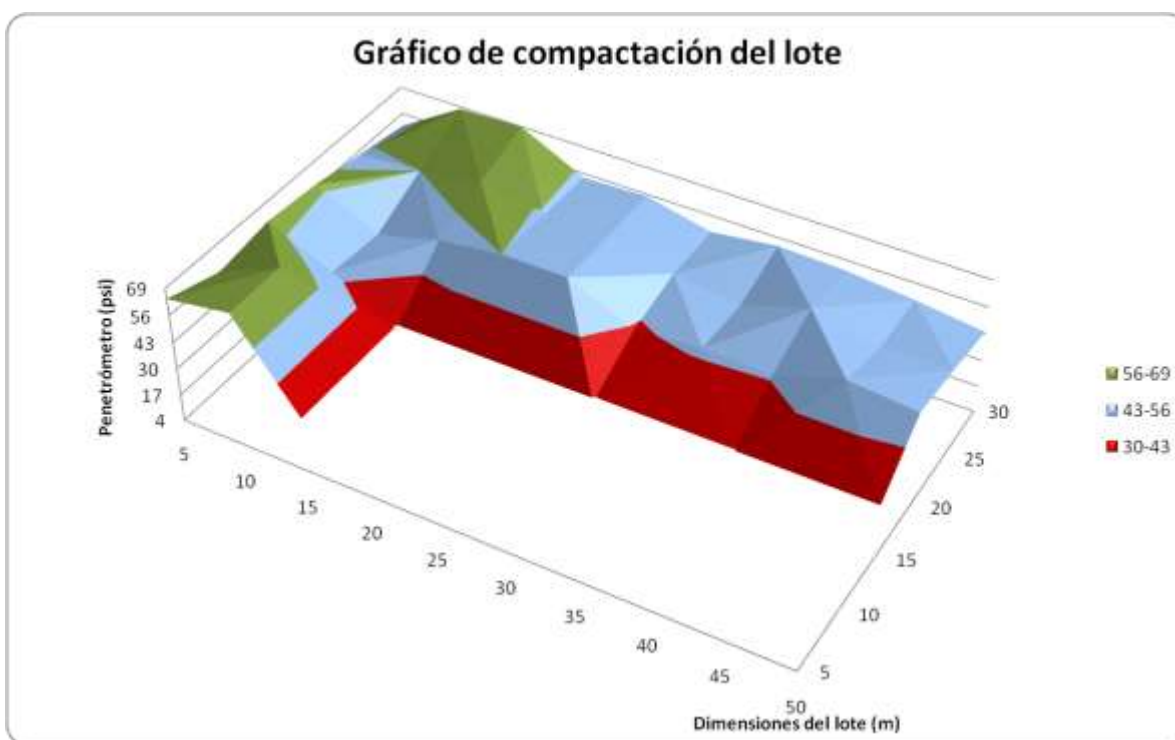


Figura 43. Perfil de compactación en el lote del ICA-Surbatá (Duitama) asignado para la siembra de las variedades 0505 y 0615 de remolacha azucarera.

**Anexo D. Información de Número de unidades de calor (°Cd) para el ciclo productivo (vegetativo) de la remolacha azucarera de variedades Templadas establecidas en Minnesota, US. Adaptado de Holen y Dexter, 1996; Meier, 2001; y Kenter *et al.*, 2006**

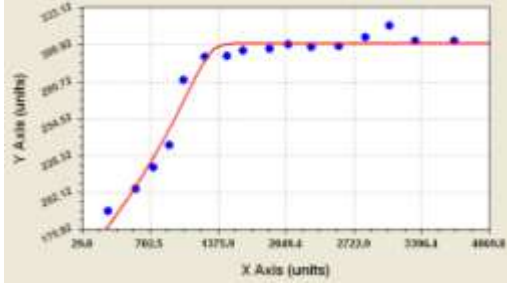
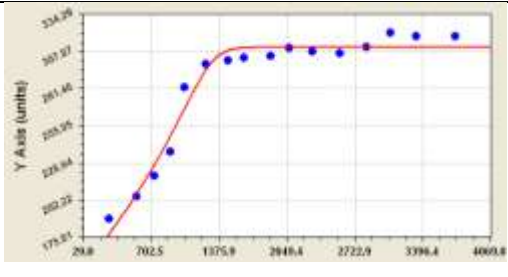
*Tabla 10. Escala de desarrollo elaborada por Holen y Dexter para el cultivo de remolacha azucarera, en variedades sembradas en Minnesota. Adaptada con información de Meier, 2001 y Kenter et al., 2006*

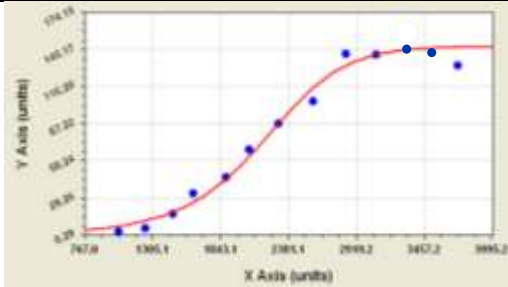
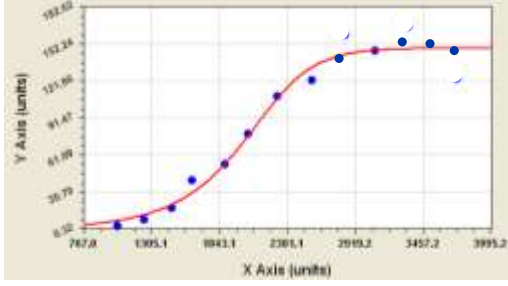
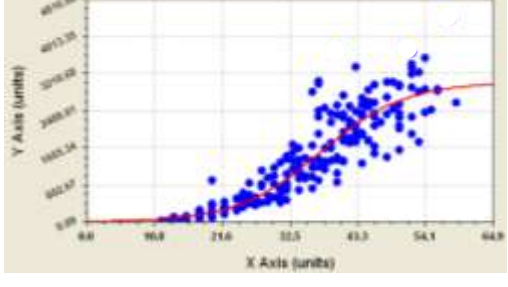
<b>BBCH</b>	<b>Escala de Holen y Dexter</b>	<b>Descripción</b>	<b>Tiempo cronológico [días]</b>	<b>Unidades de Calor [°C d]</b>	<b>Unidades de Calor Acumuladas</b>
<b>09</b>	<b>E</b>	<i>Emergencia</i>	8		2
<b>10-11</b>	<b>V1</b>	<i>Cotiledones visibles</i>	6,7	168	168
<b>12</b>	<b>V2</b>	<i>Dos hojas desplegadas</i>	5,2	61	229
<b>13</b>	<b>V3</b>	<i>Tres hojas desplegadas</i>	4	42	271
<b>14</b>	<b>V4</b>	<i>Cuatro hojas desplegadas</i>	3	33	304
<b>15</b>	<b>V5</b>	<i>Cinco hojas desplegadas</i>	2,6	27	331
<b>16</b>	<b>V6</b>	<i>Seis hojas desplegadas</i>	2,2	23	354
<b>17</b>	<b>V7*</b>	<i>Siete hojas desplegadas</i>	2,1	19	373
<b>18</b>	<b>V8*</b>	<i>Ocho hojas desplegadas</i>	1,9	17	390
<b>19</b>	<b>V9</b>	<i>Nueve hojas desplegadas</i>	1,7	14	404
<b>34-39</b>		<i>Cierre de calle</i>			750
<b>49</b>		<i>Tamaño cosechable de la raíz</i>			2800

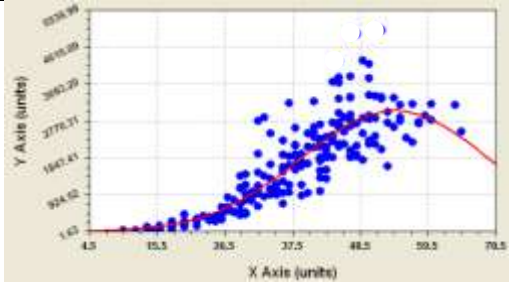


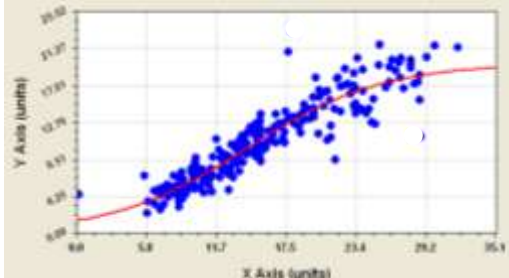
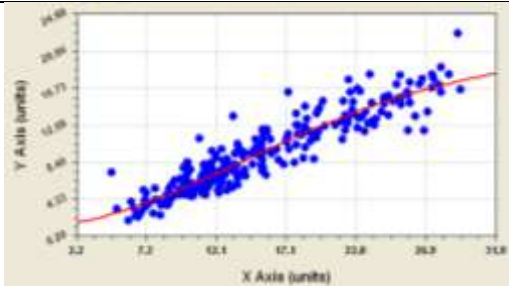
**Anexo E. Modelos matemáticos de variables morfofisiológicas, calidad y rendimiento del cultivo de remolacha azucarera, respecto al tiempo térmico y entre variables**

En la tabla 15 se presenta diferentes modelos para el rendimiento, calidad y variables morfofisiológicas que presentaron mejor ajuste para la matriz de variables planteada en la investigación (Anexo I, Anexo J, Anexo K y Anexo L). En la construcción de estas relaciones matemáticas se consideró el análisis de componentes principales (Anexo M) y coeficientes de correlación de *Pearson*.

*Tabla 11. Modelos matemáticos de estimación del momento oportuno de cosecha, calidad y ancho máximo de hoja. Las tendencias gráficas fueron tomadas de CurveExpert 1.4*

Variable dependiente	Variable independiente	Determinación de la variable independiente	Modelo matemático y coeficiente de correlación	Ecuación	Tendencia gráfica
Contenido de sacarosa (mgC <sub>12</sub> H <sub>22</sub> O <sub>11</sub> /g de tejido)	Tiempo térmico (°Cd)	Cálculo de grados día a través de temperaturas medias diarias	Richards r=0,984	$y = \frac{3,075 \times 10^2}{1 + e^{2,261 \times 10^1 - 1,746 \times 10^{-2} x} / 32,47}$	
			Richards r=0,983	$y = \frac{3,109 \times 10^2}{1 + e^{15,12 - 1,157 \times 10^{-2} x} / 21,34}$	

Variable dependiente	Variable independiente	Determinación de la variable independiente	Modelo matemático y coeficiente de correlación	Ecuación	Tendencia gráfica
Rendimiento (Ton/ha)	Tiempo térmico (°Cd)	Cálculo de grados día a través de temperaturas medias diarias	Richards r=0,990	$y = \frac{1,477 \times 10^2}{1 + e^{8,708 - 3,657 \times 10^{-3} x}}^{1/1,63}$	
			Richards r=0,982	$y = \frac{1,487 \times 10^2}{1 + e^{1,064 \times 10^1 - 4,691 \times 10^{-3} x}}^{1/1,933}$	
Rendimiento (Ton/ha)	Número de hojas	Conteo de Hojas	Logístico r=0,927	$y = \frac{3,023 \times 10^3}{1 + 2,614 \times 10^2 e^{-1,497 \times 10^{-1} x}}$	

			Gaussiano r=0,898 0615	$y = 3,032 \times 10^3 e^{-e^{54,03-15,23x}}$	
Rendimiento (Ton/ha)	Diámetro máximo de la raíz carnososa (cm)		Exponencial r=0,978 0505	$y = 1,288x^{2,744}$	Figura 32
			Exponencial r=0,990 0615	$y = 1,113x^{2,787}$	Figura 33
Ancho máximo de la hoja 11 (cm)	Longitud de la vena media de la hoja 11 (cm)		Logístico r=0,918 0505	$y = \frac{1,953 \times 10^1}{1 + 1,226 \times 10^1 e^{-1,77 \times 10^{-1} x}}$	
			Richards r=0,928 0615	$y = \frac{2,137 \times 10^2}{1 + e^{-1,568 \times 10^{-1} - 1,061 \times 10^{-1} x} \sqrt[2]{2,586 \times 10^{-1}}}$	

### Anexo F. Calibración del método de refractometría para los contenidos de sacarosa

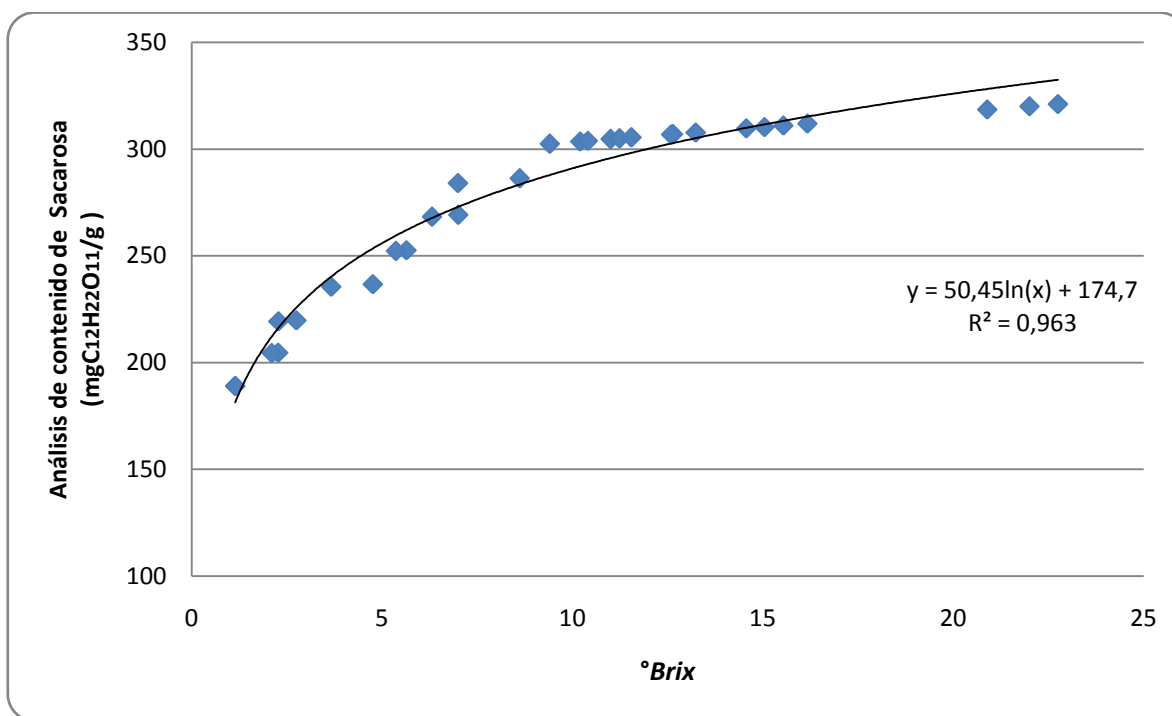


Figura 44. Calibración de refractometría por °Brix y el Contenido de Sacarosa

La determinación de sacarosa a través del refractómetro de grados *brix*, es un método práctico para la determinación de los contenidos de azúcar en tejido radical, que presentó alta correlación con el contenido de sacarosa determinado en el laboratorio ( $r^2=0,963$ ). Cabe notar que para el primer muestreo en el experimento se determinaron significativos niveles de azúcar con el refractómetro de grados *brix*, que sugiere además de la rápida traslocación de sacarosa hacia raíces, la buena sensibilidad del método, que es directamente proporcional a los contenidos de azúcar determinados en laboratorio, y que presenta para la misma muestra de calibración en el tiempo una correlación logarítmica entre los valores obtenidos mediante los dos métodos.

### Anexo G. Modelo de crecimiento simple para Remolacha Azucarera

El modelo diferencial de crecimiento para remolacha azucarera variedades 0505 y 0615 en función del IAF y la RFA, y se define de acuerdo al dominio como aparece en la ecuación 9.

Ecuación 9:

<i>Variedad 0505</i>	
$\partial W_t = 1,8.RFA_t \cdot e^{-0,038.IAF}$	valores de IAF, RFA cuando $0 \leq t < 74$
$\partial W_t(IAF, RFA): \partial W_t = 0,57.RFA_t \cdot e^{-0,319.IAF}$	valores de IAF, RFA cuando $75 \leq t < 152$
$\partial W_t = 0,015.RFA_t \cdot e^{-0,016.IAF}$	valores de IAF, RFA cuando $153 \leq t \leq 180$
<i>Variedad 0615</i>	
$\partial W_t = 2,04.RFA_t \cdot e^{-0,071.IAF}$	valores de IAF, RFA cuando $0 \leq t < 74$
$\partial W_t(IAF, RFA): \partial W_t = 0,48.RFA_t \cdot e^{-0,625.IAF}$	valores de IAF, RFA cuando $75 \leq t < 152$
$\partial W_t = 0,203.RFA_t \cdot e^{-0,194.IAF}$	valores de IAF, RFA cuando $153 \leq t \leq 180$

En la que  $\partial W_t$  es el incremento de peso seco diario por unidad de área, y tanto IAF como RFA son las variables independientes, con predicción sobre la tasa de crecimiento cuando las variedades se exponen a las mismas condiciones eco-fisiológicas del experimento de Duitama. En la que la RFA a la misma latitud puede expresarse en función de la variable “horas de luz” de acuerdo al sistema de ecuaciones del modelo de Angstrom que se muestra en la ecuación 10 (Spitters *et al.*, 1989).

Ecuación 10:

$$RFA = \left( Ra_{1i} + Ra_{2i} \right) \left[ 0,25 + \frac{0,5 \cdot h_i}{12 + \frac{24 \cdot a \cdot \sin \left( \tan \left( \frac{\pi}{180} \cdot 23,45 \cdot \cos \left( \frac{\pi \cdot l_i}{365} \right) \right) \cdot \tan \left( \frac{\pi}{180} \cdot l \right) \right)}{\pi} \right] \cdot 0,041868$$

sean  $Ra_{1i}$  y  $Ra_{2i}$ :

$$Ra_{1i} = \frac{1440}{\pi} \cdot 1,94 \cdot \left[ 1 + 0,033 \cdot \cos\left(\frac{2\pi l_i}{365}\right) \cdot \cos\left(23,5 \frac{\pi}{180} \cdot \text{sen}\left(2\pi \cdot \frac{284 + d_i}{365}\right)\right) \cdot \text{sen}\left(a \cos\left[-\tan(l\pi/180) \cdot \tan\left(23,5 \frac{\pi}{180} \cdot \text{sen}\left(2\pi \cdot \frac{284 + d_i}{365}\right)\right)\right]\right)\right]$$

$$Ra_{2i} = a \cos\left[-\tan(l\pi/180) \cdot \tan\left(23,5 \frac{\pi}{180} \cdot \text{sen}\left(2\pi \cdot \frac{284 + d_i}{365}\right)\right)\right] \cdot \text{sen}\left(\frac{l\pi}{180}\right) \cdot \text{sen}\left[23,5 \frac{\pi}{180} \cdot \text{sen}\left(2\pi \cdot \frac{284 + d_i}{365}\right)\right]$$

En las que  $d_i$  es el día del año,  $h_i$  son las “horas de luz” durante el día  $d_i$ , y  $l$  es la latitud en decimales; 5,794 es la latitud en decimales de 5°47'38.62"N de la localidad de Duitama en que se adelantó el experimento.

Finalmente, el modelo de distribución del peso seco diario por órgano se define con base en los resultados de crecimiento de la ecuación 9, reemplazando en la ecuación 11.

$$\text{Ecuación 11: } W_{0_i}(t) = \begin{cases} W_{0_{(t-1)}} + \alpha_0 \cdot \partial W_t \cdot \Delta t & \text{si } 0 \leq t < 74 \\ W_{0_{(t-1)}} + \alpha_0 \cdot \partial W_t \cdot \Delta t & \text{si } 75 \leq t < 152 \\ W_{0_{(t-1)}} + \alpha_0 \cdot \partial W_t \cdot \Delta t & \text{si } 153 \leq t \leq 180 \end{cases}$$

En la que  $W_{0_t}$  es el peso seco del órgano (v.gr. raíz, pecíolos, hojas) en el tiempo  $t$ , que está en función: de  $W_{0_{(t-1)}}$ , que es el peso seco del órgano en el tiempo  $t-1$ ; de  $\alpha_0$  que es el coeficiente de distribución de cada órgano, que toma la notación de  $\alpha_h$  para el caso de las hojas,  $\alpha_p$  para el caso de los pecíolos y  $\alpha_r$  para el caso de la raíz; de  $\partial W_t$  que es el incremento de peso seco diario por unidad de área (obtenido de la ecuación 9); y de  $\Delta t$  que corresponde al día.

Los valores de  $\alpha_0$  para cada órgano, de acuerdo etapas generales de desarrollo de hojas aparecen en la siguiente tabla.

**Tabla 12. Coeficientes de distribución de peso seco por órgano de remolacha azucarera**

Parámetro	Variedad 0505			Variedad 0615		
	0-1479°Cd 0-74 dds	1480-2800°Cd 75-152 dds	2801-3300°Cd 152-180 dds	0-1479°Cd 0-74 dds	1480-2800°Cd 75-152 dds	2801-3300°Cd 152-180 dds
$\alpha_h$	0,30865556	0,112893188	0,125014271	0,32909761	0,050826007	0,099108953
$\alpha_p$	0,21168675	0,096543854	0,125429519	0,21553817	0,068682326	0,088160289
$\alpha_r$	0,480072088	0,790531287	0,749556208	0,45660193	0,880491667	0,811637101

El modelo de crecimiento en particular no tuvo en cuenta las unidades de calor, ya que en la práctica las estaciones meteorológicas carecen de información de RFA por unidad de calor o grado día (requerido para el cálculo); en cambio, se manejan valores diarios.

#### **Anexo H. Modelo de tiempo térmico en STELLA para Remolacha Azucarera**

El modelo de tiempo térmico (TT) para remolacha azucarera (Ecuación 12), se construyó a partir de ecuaciones diferenciales que se encuentran representadas por las líneas de programación que se presentan a continuación, la documentación hecha en STELLA fue sustraída para efectos de visualización, pero puede consultarse en la interfaz del modelo en bajo nivel.

*Ecuación 12:*

$$TT_{Remolacha} = \sum_{i=1}^n \frac{T_{\max} - T_{\min}}{2} - 1,8^{\circ}C \quad (^{\circ}C)$$

*Líneas de programación en STELLA:*

CHOs\_Gross\_\_en\_Dosel(t) = CHOs\_Gross\_\_en\_Dosel(t -  $\partial t$ ) + (Fotosíntesis - R\_Crecimiento\_\_en\_hojas - R\_Mantenimnto\_en\_Hojas\_y\_Pecíolos - R\_Crecimiento\_en\_pecíolos - Asignación\_C\_a\_Azúcares) \*  $\partial t$

INIT CHOs\_Gross\_\_en\_Dosel = 0.150

Fotosíntesis(o) = ((IF(CO2\_difundido\_en\_hojas\_y\_pecíolos < Absorción\_de\_Quanta/10)  
THEN(CO2\_difundido\_en\_hojas\_y\_pecíolos\*Metabolismo\_\_C3)

ELSE((Absorción\_\_de\_Quanta/10)\*Metabolismo\_\_C3))\*CHOs\_Gross\_\_en\_Dosel)

R\_Crecimiento\_\_en\_hojas = CHOs\_Gross\_\_en\_Dosel\*0.1

R\_Mantenimiento\_en\_Hojas\_y\_Pecíolos = CHOs\_Gross\_\_en\_Dosel\*0.05

R\_Crecimiento\_\_en\_pecíolos = CHOs\_Gross\_\_en\_Dosel\*0.08

Asignación\_\_C\_\_a\_Azúcares(o) = CHOs\_Gross\_\_en\_Dosel\*Asignación\_\_Porcentual\_C

CO2\_difundido\_en\_hojas\_y\_pecíolos(t) = CO2\_difundido\_en\_hojas\_y\_pecíolos(t -  $\partial t$ ) + (CO2\_en\_\_capa\_límite - Fotosíntesis - Fotorrespiración) \*  $\partial t$

INIT CO2\_difundido\_en\_hojas\_y\_pecíolos = 0

CO2\_en\_\_capa\_límite = 3.53\*Densidad\_\_de\_Siembra\*IAF

Fotosíntesis(o) = ((IF(CO2\_difundido\_en\_hojas\_y\_pecíolos < Absorción\_\_de\_Quanta/10)  
THEN(CO2\_difundido\_en\_hojas\_y\_pecíolos\*Metabolismo\_\_C3)

ELSE((Absorción\_\_de\_Quanta/10)\*Metabolismo\_\_C3))\*CHOs\_Gross\_\_en\_Dosel)

Fotorrespiración= (IF(CO2\_difundido\_en\_hojas\_y\_pecíolos<Absorción\_de\_Quanta/10)  
 THEN(CO2\_difundido\_en\_hojas\_y\_pecíolos\*(1-Metabolismo\_C3))  
 ELSE((Absorción\_de\_Quanta/10)\*(1-Metabolismo\_C3)))  
 Peso\_Seco\_Hojas(t) = Peso\_Seco\_Hojas(t -  $\partial t$ ) + (R\_Crecimiento\_en\_hojas) \*  $\partial t$   
 INIT Peso\_Seco\_Hojas = 0  
 R\_Crecimiento\_en\_hojas = CHOs\_Gross\_en\_Dosel\*0.1  
 Peso\_Seco\_Pecíolos(t) = Peso\_Seco\_Pecíolos(t -  $\partial t$ ) + (R\_Crecimiento\_en\_pecíolos) \*  $\partial t$   
 INIT Peso\_Seco\_Pecíolos = 0  
 R\_Crecimiento\_en\_pecíolos = CHOs\_Gross\_en\_Dosel\*0.08  
 Sacarosa\_en\_dosel(t) = Sacarosa\_en\_dosel(t -  $\partial t$ ) + (Retraslocación\_de\_Sacarosa +  
 Asignación\_C\_a\_Azúcares - Traslocación\_de\_Sacarosa) \*  $\partial t$   
 INIT Sacarosa\_en\_dosel = 0  
 Retraslocación\_de\_Sacarosa (IN SECTOR: Crecimiento Radical de la Remolacha Azucarera)  
 Asignación\_C\_a\_Azúcares(o) = CHOs\_Gross\_en\_Dosel\*Asignación\_Porcentual\_C\_  
 Traslocación\_de\_Sacarosa (IN SECTOR: Crecimiento Radical de la Remolacha Azucarera)  
 Asignación\_Porcentual\_C\_ = 0.5  
 Balance\_Hormonal\_AIA\_ABA\_y\_GA = (AIA\*ABA)\*GA  
 Balance\_hormonal\_Cq\_y\_GA = Cq\*GA  
 Peso\_seco\_Dosel = Peso\_Seco\_Hojas+Peso\_Seco\_Pecíolos  
 ABA = GRAPH(Contador\_transformado)  
 (0.00, 0.08), (30.4, 0.045), (60.8, 0.045), (91.3, 0.11), (122, 0.24), (152, 0.375), (183, 0.695), (213,  
 0.6), (243, 0.55), (274, 0.265), (304, 0.155), (335, 0.09), (365, 0.055)  
 AIA = GRAPH(Contador\_transformado)  
 (0.00, 0.565), (30.4, 0.095), (60.8, 0.045), (91.3, 0.03), (122, 0.01), (152, 0.00), (183, 0.00), (213,  
 0.045), (243, 0.095), (274, 0.145), (304, 0.215), (335, 0.395), (365, 0.87)  
 Cq = GRAPH(Contador\_transformado)  
 (0.00, 0.98), (30.4, 0.96), (60.8, 0.87), (91.3, 0.695), (122, 0.39), (152, 0.31), (183, 0.235), (213,  
 0.235), (243, 0.285), (274, 0.465), (304, 0.575), (335, 0.535), (365, 0.36)  
 GA = GRAPH(Contador\_transformado)  
 (0.00, 0.56), (30.4, 0.5), (60.8, 0.445), (91.3, 0.435), (122, 0.495), (152, 0.72), (183, 0.89), (213,  
 0.98), (243, 0.985), (274, 0.85), (304, 0.58), (335, 0.225), (365, 0.05)  
 IAF = GRAPH(Contador\_transformado)  
 (0.00, 0.04), (15.7, 0.08), (31.3, 0.26), (47.0, 0.68), (62.6, 1.40), (78.3, 3.06), (93.9, 3.58), (110,  
 3.62), (125, 2.14), (141, 0.059), (157, 0.05), (172, 0.00), (188, 0.00), (203, 0.00), (219, 0.00), (235,

0.00), (250, 0.00), (266, 0.00), (282, 0.00), (297, 0.00), (313, 0.00), (329, 0.00), (344, 0.00), (360, 0.00)

Metabolismo\_C3 = GRAPH(Temperatura\_°C)

(10.0, 0.00), (12.0, 0.00335), (14.0, 0.0067), (16.0, 0.0302), (18.0, 0.535), (20.0, 0.652), (22.0, 0.69), (24.0, 0.676), (26.0, 0.58), (28.0, 0.235), (30.0, 0.00)

CHOs\_en\_raíces(t) = CHOs\_en\_raíces(t -  $\partial t$ ) + (Desdoblamiento\_de\_Sacarosa\_y\_asimilación - R\_Crecimiento\_\_en\_Raíces - R\_Mantenimiento\_\_en\_Raíces - Reasignación\_a\_Sacarosa) \*  $\partial t$

INIT CHOs\_en\_raíces = 0

Desdoblamiento\_de\_Sacarosa\_y\_asimilación(o) = Contenido\_de\_\_azúcar\_en\_raíces\*TAR

R\_Crecimiento\_\_en\_Raíces = CHOs\_en\_raíces\*0.1

Reasignación\_a\_Sacarosa(o) = (CHOs\_en\_raíces\*0.01)

Contenido\_de\_\_azúcar\_en\_raíces(t) = Contenido\_de\_\_azúcar\_en\_raíces(t -  $\partial t$ ) + (Traslocación\_\_de\_Sacarosa + Reasignación\_a\_Sacarosa - Situación\_Fitosanitaria\_Adversa\_Plagas\_Patógenos\_Daños - Retraslocación\_\_de\_Sacarosa - Desdoblamiento\_de\_Sacarosa\_y\_asimilación) \*  $\partial t$

INIT Contenido\_de\_\_azúcar\_en\_raíces = 0

Traslocación\_\_de\_Sacarosa = (Sacarosa\_\_en\_dosel\*Balance\_hormonal\_Cq\_y\_GA)

Reasignación\_a\_Sacarosa(o) = (CHOs\_en\_raíces\*0.01)

Situación\_Fitosanitaria\_Adversa\_Plagas\_Patógenos\_Daños= Contenido\_de\_\_azúcar\_en\_raíces\*0

Retraslocación\_\_de\_Sacarosa =  
(IF((Sacarosa\_\_en\_dosel/(Contenido\_de\_\_azúcar\_en\_raíces+Sacarosa\_\_en\_dosel))<0.05)  
THEN(Contenido\_de\_\_azúcar\_en\_raíces\*Balance\_Hormonal\_\_\_\_AIA\_ABA\_y\_GA) ELSE(0))

Peso\_seco\_\_en\_Raices(t) = Peso\_seco\_\_en\_Raices(t -  $\partial t$ ) + (R\_Crecimiento\_\_en\_Raíces) \*  $\partial t$

INIT Peso\_seco\_\_en\_Raices = 0.09

R\_Crecimiento\_\_en\_Raíces = CHOs\_en\_raíces\*0.1

TAR = GRAPH(Contador\_\_transformado)

(0.00, 0.1), (15.9, 0.1), (31.7, 0.1), (47.6, 0.1), (63.5, 0.1), (79.3, 0.1), (95.2, 0.1), (111, 0.097), (127, 0.0795), (143, 0.018), (159, 0.0055), (175, 0.0045), (190, 0.0045), (206, 0.0055), (222, 0.0055), (238, 0.006), (254, 0.005), (270, 0.0045), (286, 0.0055), (302, 0.006), (317, 0.006), (333, 0.0055), (349, 0.0055), (365, 0.006)

BBCH\_19(t) = BBCH\_19(t -  $\partial t$ ) + (Entr\_12\_\_Hojas - Entr\_\_Calle) \*  $\partial t$

INIT BBCH\_19 = 0

Entr\_12\_\_Hojas = IF(Intrr\_BBCH\_\_estocástico=0)

THEN(IF(Acumulación\_de\_UC<°Dia\_BBCH\_19) THEN(0) ELSE(1))

ELSE(IF(Intrr\_BBCH\_\_estocástico=1)

N(IF(Acumulación\_de\_UC<NORMAL(°Dia\_BBCH\_19,Var\_BBCH)) THEN(0) ELSE(1))

ELSE(0))

Entr\_\_Calle = IF(Intrr\_BBCH\_\_estocástico=0) THEN(IF(Acumulación\_de\_UC<°Dia\_BBCH\_34) THEN(0) ELSE(1)) ELSE(IF(Intrr\_BBCH\_\_estocástico=1) THEN(IF(Acumulación\_de\_UC<NORMAL(°Dia\_BBCH\_34,Var\_BBCH)) THEN(0) ELSE(1)) ELSE(0))

BBCH\_34(t) = BBCH\_34(t -  $\partial t$ ) + (Entr\_\_Calle - Entr\_30\_hojas) \*  $\partial t$

INIT BBCH\_34 = 0

Entr\_Calle = IF(Intrr\_BBCH\_\_estocástico=0) THEN(IF(Acumulación\_de\_UC<°Dia\_BBCH\_34) THEN(0) ELSE(1)) ELSE(IF(Intrr\_BBCH\_\_estocástico=1) THEN(IF(Acumulación\_de\_UC<NORMAL(°Dia\_BBCH\_34,Var\_BBCH)) THEN(0) ELSE(1)) ELSE(0))

Entr\_30\_hojas = IF(Intrr\_BBCH\_\_estocástico=0) THEN(IF(Acumulación\_de\_UC<°Dia\_BBCH\_V30) THEN(0) ELSE(1)) ELSE(IF(Intrr\_BBCH\_\_estocástico=1) THEN(IF(Acumulación\_de\_UC<NORMAL(°Dia\_BBCH\_V30,Var\_BBCH)) THEN(0) ELSE(1)) ELSE(0))

BBCH\_49(t) = BBCH\_49(t -  $\partial t$ ) + (Entr\_\_Madurez\_F) \*  $\partial t$

INIT BBCH\_49 = 0

Entr\_\_Madurez\_F = IF(Intrr\_BBCH\_\_estocástico=0) THEN(IF(Acumulación\_de\_UC<°Dia\_BBCH49) THEN(0) ELSE(1)) ELSE(IF(Intrr\_BBCH\_\_estocástico=1) THEN(IF(Acumulación\_de\_UC<NORMAL(°Dia\_BBCH49,Var\_BBCH)) THEN(0) ELSE(1)) ELSE(0))

BBCH\_V30(t) = BBCH\_V30(t -  $\partial t$ ) + (Entr\_30\_hojas - Entr\_\_Madurez\_F) \*  $\partial t$

INIT BBCH\_V30 = 0

Entr\_30\_hojas = IF(Intrr\_BBCH\_\_estocástico=0) THEN(IF(Acumulación\_de\_UC<°Dia\_BBCH\_V30) THEN(0) ELSE(1)) ELSE(IF(Intrr\_BBCH\_\_estocástico=1) THEN(IF(Acumulación\_de\_UC<NORMAL(°Dia\_BBCH\_V30,Var\_BBCH)) THEN(0) ELSE(1)) ELSE(0))

Entr\_\_Madurez\_F = IF(Intrr\_BBCH\_\_estocástico=0) THEN(IF(Acumulación\_de\_UC<°Dia\_BBCH49) THEN(0) ELSE(1)) ELSE(IF(Intrr\_BBCH\_\_estocástico=1) THEN(IF(Acumulación\_de\_UC<NORMAL(°Dia\_BBCH49,Var\_BBCH)) THEN(0) ELSE(1)) ELSE(0))

Intrr\_BBCH\_\_estocástico = 0

Var\_BBCH = 0.02

°Dia\_BBCH49 = 3300

°Dia\_BBCH\_19 = 900

°Dia\_BBCH\_34 = 1036

°Dia\_BBCH\_V30 = 1627

Absorción\_\_de\_Quanta = NORMAL(Quanta\_Histórica\_\_disponible,0.08)

Quanta\_Histórica\_\_disponible = GRAPH(Días\_del\_año\_2)

(1.00, 35.4) ... "*serie de datos históricos*", *mis cursivas*... (365, 35.3)

Acumulación\_de\_UC(t) = Acumulación\_de\_UC(t -  $\partial t$ ) + (Suma\_\_de\_UC - Vaciado\_\_de\_UC) \*  $\partial t$   
INIT Acumulación\_de\_UC = 0

Suma\_\_de\_UC = IF(Días\_del\_año < Día\_de\_\_siembra OR (Días\_del\_año > (Día\_de\_\_siembra+180)))  
THEN(0) ELSE(IF(Temperatura\_°C > Tb AND Temperatura\_°C < TML) THEN(Temperatura\_°C)  
ELSE(0))

Vaciado\_\_de\_UC = IF(Días\_del\_año > Día\_de\_\_Cosecha) THEN(Acumulación\_de\_UC) ELSE(0)

Días\_del\_año = COUNTER(1,366)

Día\_de\_\_Cosecha = Día\_de\_\_siembra+180

Día\_de\_\_siembra = 0

Régimen\_\_térmico = 2

Tb = 10

Temperatura\_°C = if Régimen\_\_térmico = 0 then NORMAL(°T\_Clima\_Frío, Varianza\_\_Térmica)  
else if Régimen\_\_térmico = 1 then NORMAL(°T\_Clima\_Cálido, Varianza\_\_Térmica) else  
NORMAL(°T\_Historica\_\_Duitama, Varianza\_\_Térmica)

TML = 30

°T\_Historica\_\_Duitama = GRAPH(Días\_del\_año)

(1.00, 18.0) ... "*serie de datos históricos*", *mis cursivas*... (365, 18.4)

R\_Mantenimiento\_\_en\_Raíces = CHOs\_en\_raíces\*0.01

OUTFLOW FROM: CHOs\_en\_raíces (IN SECTOR: Crecimiento Radical de la Remolacha  
Azucarera)

Contador\_\_transformado = IF(Día\_de\_\_siembra > Días\_del\_año\_2) THEN(0) ELSE  
(COUNTER(0,366))

Días\_del\_año\_2 = COUNTER(1,366)

Peso\_seco\_Total = Peso\_seco\_\_Dosel+Peso\_seco\_\_en\_Raíces

### Anexo I. Modelo matemático entre desarrollo y rendimiento en remolacha azucarera

El modelo logístico obtuvo el mejor ajuste entre el desarrollo en número de hojas completamente expandidas y el rendimiento para la variedad 0505, que se define por la ecuación 13, a continuación se presentan los parámetros de ajuste (*Tabla 13*).

*Ecuación 13:*

$$y = \frac{a}{1 + be^{-cx}}$$

En el que  $y$  es el rendimiento del cultivo (ton/ha) y  $x$  es el número de hojas de la variedad 0505.

Por otro lado el modelo Gaussiano obtuvo el mejor ajuste entre el desarrollo en número de hojas completamente expandidas y el rendimiento para la variedad 0615, que se define por la ecuación 14, a continuación se presentan los parámetros de ajuste.

*Ecuación 14:*

$$y = ae^{-e^{b-cx}}$$

En el que  $y$  es el rendimiento del cultivo (ton/ha) y  $x$  es el número de hojas de la variedad 0615.

***Tabla 13. Parámetros de ajuste del modelo logístico y gaussiano del desarrollo vs rendimientos parciales del cultivo de remolacha azucarera***

<b><i>Parámetro</i></b>	<b><i>Variedad 0505</i></b>	<b><i>Variedad 0615</i></b>
	<b><i>Modelo logístico</i></b>	<b><i>Modelo Gaussiano</i></b>
<i>a</i>	3,02289567368 x10 <sup>3</sup>	3,03152632458 x10 <sup>3</sup>
<i>b</i>	2,61418597712 x10 <sup>2</sup>	5,40306578028 x10 <sup>1</sup>
<i>c</i>	1,49692254656 x10 <sup>-1</sup>	1,52352247672 x10 <sup>1</sup>

### Anexo J. Modelo matemático de contenido de sacarosa entre el primer y segundo anillo cambial secundario en remolacha azucarera

El modelo Richards obtuvo el mejor ajuste para el contenido de sacarosa, que se define por la Ecuación 15, en la tabla 14 se presentan los parámetros de ajuste para las variedades 0505 y 0615 respectivamente.

*Ecuación 15:*

$$y = \frac{a}{1 + e^{-bx/d}}$$

En el que  $y$  es el contenido de sacarosa entre el primer y segundo anillo secundario ( $\text{mgC}_{12}\text{H}_{22}\text{O}_{11}/\text{g}$  de tejido) y  $x$  es el número de unidades de calor acumuladas ( $^{\circ}\text{Cd}$ ).

**Tabla 14. Parámetros de ajuste del modelo Richards para el contenido de sacarosa del cultivo de remolacha azucarera respecto a la acumulación de unidades de calor**

<i>Parámetro</i>	<i>Variedad 0505</i>	<i>Variedad 0615</i>
<i>a</i>	3,07490323371 x10 <sup>2</sup>	3,10860867438 x10 <sup>2</sup>
<i>b</i>	2,26081624794 x10 <sup>1</sup>	1,51216510992 x10 <sup>1</sup>
<i>c</i>	1,74617226862 x10 <sup>-2</sup>	1,15728366586 x10 <sup>-2</sup>
<i>d</i>	3,24741952578 x10 <sup>1</sup>	2,13364526962 x10 <sup>1</sup>

### Anexo K. Modelo matemático entre el ancho máximo de la hoja de remolacha azucarera y su longitud de la vena media

En esta investigación, se encontró una relación no lineal entre el diámetro máximo de la hoja de remolacha y su longitud de la vena media para las variedades 0505 y 0615. Mientras que para la variedad Rizor la literatura reporta una relación lineal como un método indirecto para la medición de área foliar (Tsialtas y Maslaris 2005).

Los modelos logístico y Richards presentaron el mejor ajuste para las variedades 0505 y 0615 respectivamente, que se muestran en las ecuaciones 16 y 17; la hoja seleccionada en ambas variedades para presentar esta relación fue la hoja 11 de cada unidad experimental en todos los muestreos durante el ciclo del cultivo.

*Ecuación 16:*

$$y = \frac{a}{1 + be^{-cx}}$$

En el que  $y$  es el ancho máximo de la hoja 11 (cm) y  $x$  es la longitud de la vena media (cm) en la variedad 0505.

*Ecuación 17:*

$$y = \frac{a}{1 + e^{b-cx}} \frac{1}{d}$$

En el que  $y$  es el ancho máximo de la hoja 11 (cm) y  $x$  es la longitud de la vena media (cm) en la variedad 0615.

A continuación se presenta la tabla con el valor de los parámetros de cada modelo.

**Tabla 15. Parámetros de ajuste del modelo logístico y Richards para el ancho máximo de la hoja 11 de remolacha azucarera y su longitud de la vena media**

<i>Parámetro</i>	<i>Variedad 0505</i>	<i>Variedad 0615</i>
	<i>Modelo logístico</i>	<i>Modelo de Richards</i>
$a$	$1,95273301787 \times 10^1$	$2,13658762756 \times 10^1$
$b$	$1,22581224676 \times 10^1$	$1,56849901044 \times 10^{-1}$

<i>c</i>	1,77019146606 x10 <sup>-1</sup>	1,06117553921 x10 <sup>-1</sup>
<i>d</i>		2,58561208061 x10 <sup>-1</sup>

---

**Anexo L. Modelo matemático para el rendimiento de remolacha azucarera (ton/ha) respecto a las unidades de calor (°Cd)**

El rendimiento de las variedades 0505 y 0615 se ajustó a la relación de Richards; en la literatura este modelo ha representado el rendimiento de otros cultivos cuyo órgano vegetativo cosechable es subterráneo.

*Ecuación 18:*

$$y = \frac{a}{1 + e^{b-cx} \frac{1}{d}}$$

En el que *y* es el rendimiento de las variedades 0505 y 0615 (ton/ha) y *x* es la acumulación de unidades de calor (°Cd).

A continuación se presenta la tabla con el valor de los parámetros de cada modelo.

**Tabla 16. Parámetros de ajuste del modelo Richards para el rendimiento del cultivo de remolacha azucarera respecto a la acumulación de unidades de calor**

<i>Parámetro</i>	<i>Variedad 0505</i>	<i>Variedad 0615</i>
<i>a</i>	1,47710737517 x10 <sup>2</sup>	1,48689891838 x10 <sup>2</sup>
<i>b</i>	8,70797507864	1,06432598312 x10 <sup>1</sup>
<i>c</i>	3,65695090630 x10 <sup>-3</sup>	4,69127716804 x10 <sup>-3</sup>
<i>d</i>	1,63062825608	1,93264642485

**Anexo M. Análisis de variables con respecto al crecimiento, desarrollo y rendimiento de las variedades de Remolacha Azucarera y Análisis de varianza**

*Salida de Análisis de varianza sobre el rendimiento de los cultivos de remolacha azucarera*

Se presentaron diferencias significativas entre el rendimiento de las variedades Hilleshög 0505 y 0615 de remolacha azucarera ( $p > 0,0110$ ). A continuación se presenta la salida de SAS para el análisis de varianza.

21:42 Thursday, March 18, 2010 1

Procedimiento ANOVA

Información del nivel de clase

Clase	Niveles	Valores
Var	2	v0505 v0615

Número de observaciones 122

21:42 Thursday, March 18, 2010 2

Procedimiento ANOVA

Variable dependiente: Rendimiento Rendimiento

Fuente	DF	Suma de cuadrados	Cuadrado de la media	F-Valor	Pr > F
Modelo	1	2093120.95	2093120.95	6.89	0.0110
Error	121	17912527.88	303602.17		
Total correcto	122	20005648.84			

R-cuadrado	Coef Var	Raiz MSE	Rendimiento Media
0.804626	22.83641	551.0011	2412.818

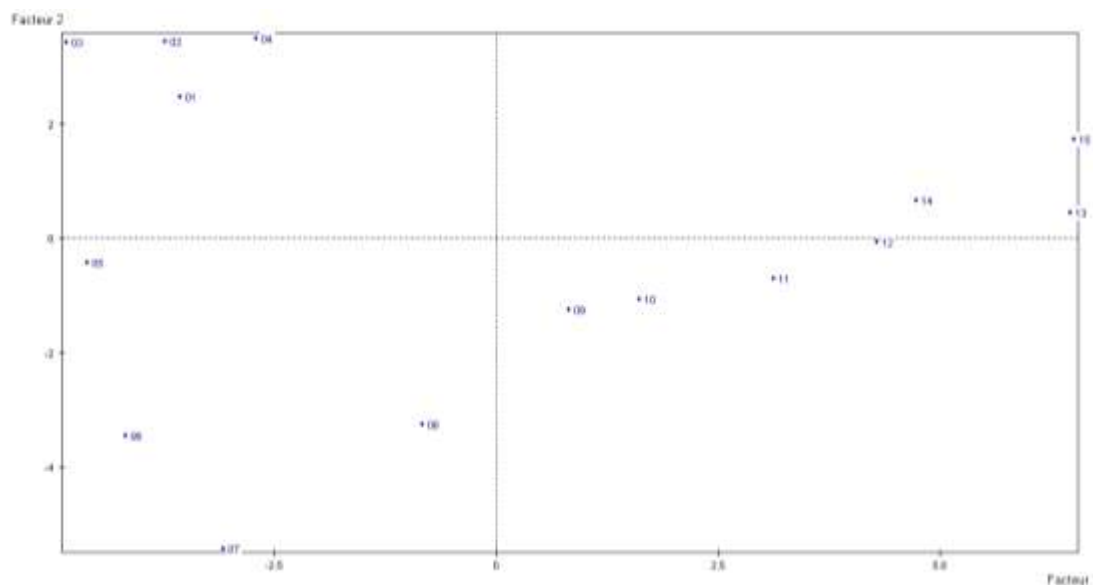
Fuente	DF	Anova SS	Cuadrado de la media	F-Valor	Pr > F
Var	1	2093120.952	2093120.952	6.89	0.0110

*Análisis de estadística multivariada en Spad 3.5 de las variables medidas durante el ciclo productivo*

Con la matriz de correlaciones de la salida de *Spad 3.5* se identificaron las variables de similar valor explicativo, seleccionando variables diagnósticas que fueron analizadas por componentes principales, en general e conservaron en el análisis aquellas que presentaron relación con la estimación de crecimiento, desarrollo y rendimientos.

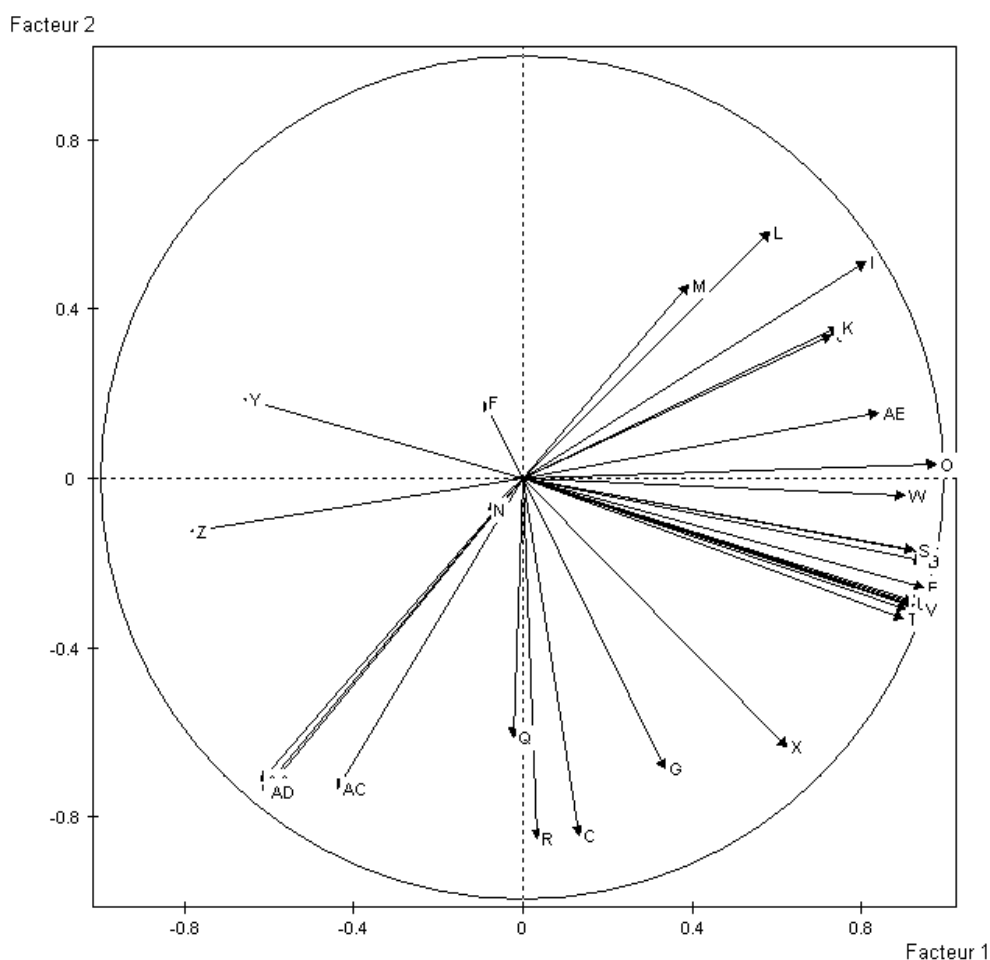
En cuanto al histograma de valores propios, se observó alta inercia, lo que indicó que la variable sintética incorporó adecuadamente el porcentaje de variación de los datos (la primera variable sintética agrupó mayor variabilidad); se presentó alta frecuencia de agrupamiento de las variables principalmente en dos planos factoriales.

Finalmente, la correlación de factores y variables en la salida de “variables activas”, mostró alta correlación sobre el primer plano, que corrobora que las variables estuvieron bien representadas por la variable sintética.



*Figura 45. Relación de tipo de variables medidas durante el ciclo de remolacha azucarera con respecto a los factores de orden de componentes principales en Spad 3.5.*

Las figuras anteriores muestran la relación de las variables medidas durante el ciclo de remolacha azucarera variedades 0615 y 0505 sobre los factores de orden de Spad 3.5 que produjeron menor variabilidad.



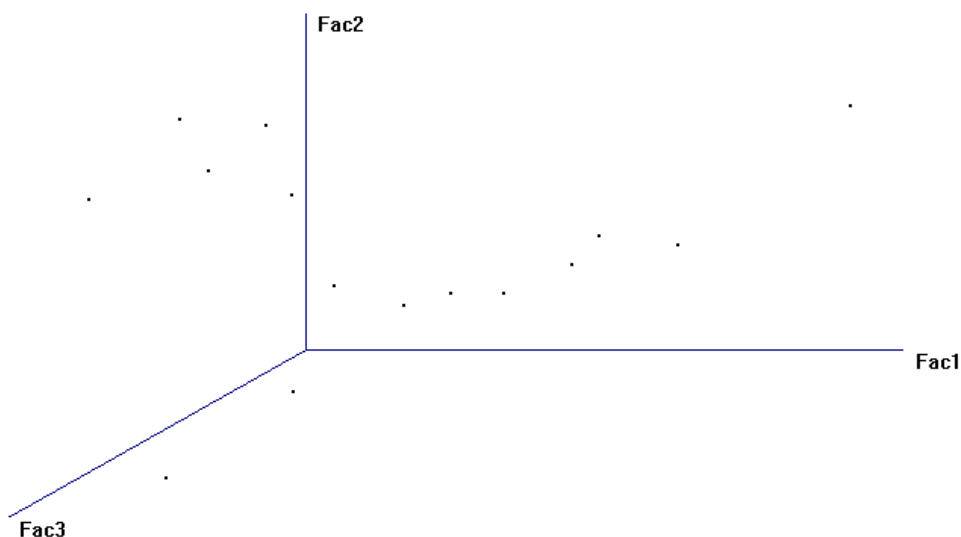
*Figura 46. Círculo unitario para las variables medidas durante el ciclo de remolacha azucarera con respecto a los factores de orden de componentes principales en Spad 3.5.*

En el círculo unitario se identifica dos grupos de variables –que correspondieron al comportamiento del cultivo–, de crecimiento y desarrollo de la parte aérea, y relacionadas con el rendimiento, las cuales con respecto al primer factor presentaron una contribución negativa y positiva respectivamente.

Por su parte las variables de peso seco de la parte aérea, peso seco total, número de pseudoanillos, número de hojas enrolladas, número de hojas próximas a expandir, altura de planta y grados *brix*, no estuvieron bien representadas en por componentes principales, por lo cual no es apropiado analizarlas a través de esta herramienta estadística. Condición que se consideró en el procesamiento de los datos para los diferentes análisis de crecimiento y desarrollo, debido a que este procedimiento estadístico es una herramienta empleada para la

clasificación de variables, que en esta investigación fue apoyada por la estimación del coeficiente de correlación de *Pearson*.

Las variables que más aportaron a la construcción del eje fueron el peso seco de la raíz, el diámetro medio y el diámetro máximo de la raíz carnosa; el peso seco de la raíz fue la variable que mejor representó al eje factorial.



*Figura 47. Representación de las variables medidas durante el ciclo de remolacha azucarera con respecto a los tres principales factores de orden de componentes principales en Spad 3.5.*

Se aprecia buena inercia gráfica de las variables representadas sobre las tres dimensiones de los tres factores de orden de componentes principales, esta buena representación permitió afirmar que fue apropiado hacer interpretación sobre las variables en el espacio.

