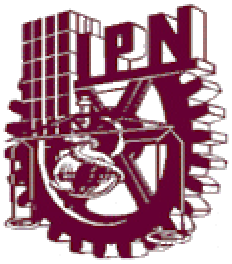


CENTRO DE INVESTIGACIÓN Y DE ESTUDIOS AVANZADOS DEL NSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL

UNIDAD ZACATENCO
DEPARTAMENTO DE CONTROL AUTOMÁTICO

Adaptación del modelo de crecimiento genérico SUCROS al ambiente MatLab^{Ò}, aplicación a un cultivo de maíz (híbrido HS-2).

Tesis que presenta:

Ing. Ignacio López Cerino*

Para obtener el grado de:

Maestro en Ciencias

En la especialidad de:

Control Automático

Directores de tesis:

Dr. Moisés Bonilla Estrada
M.C. Ramón Arteaga Ramírez

México, D.F. **Diciembre 2002**

* Becario del CONACYT

Dedico esta tesis a la Sra. Elvia Cerino López, ¡ gracias madre !

A mis hermanos Javier, Rafael y Marisol por apoyarme en esta aventura llamada vida.

AGRADECIMIENTOS

Al Dr. Moisés Bonilla Estrada por su ayuda, orientación y paciencia en el desarrollo de esta tesis y en mi formación.

Al M.C. Ramón Arteaga Ramírez por la ayuda y guía en el desarrollo del experimento de campo y de esta tesis.

A los sinodales, Dr. Rubén Garrido Moctezuma, Dr. Irineo L. López Cruz y al Dr. Juan Carlos Martínez García por los comentarios que hicieron para el mejoramiento de esta tesis.

A los compañeros del Depto. de Control Automático Hiram García, Daishi Murano, Alejandro Villaseñor, Marco Chavarria y Rafael Beltrán por el apoyo durante la maestría.

A la Universidad Autónoma Chapingo por las facilidades que nos dio para llevar a cabo el experimento de campo.

Al Departamento de control Automático por recibirme y ser parte de mi formación académica.

Al Centro de Investigación y Estudios Avanzados (CINVESTAV) por la oportunidad brindada de continuar mis estudios después de la universidad .

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por el apoyo económico que hizo posible dedicarme de tiempo completo a mi formación académica en la Maestría de Control Automático.

…gracias

Resumen

SUCROS (Simple and Universal Crop Growth Simulator) es un modelo que describe el crecimiento de un cultivo sobre la base de los procesos básicos, tal como asimilación de CO_2 y respiración, influenciada por las condiciones ambientales.

SUCROS originalmente está escrito en FST (FORTRAN Simulation Translator).

En este trabajo de tesis, SUCROS es adaptado al ambiente MatLab® – Simulink®, justificado porque MatLab® es un poderoso lenguaje para proveer un ambiente flexible de computación y Simulink® es una herramienta interactiva para modelado, simulación y análisis dinámico de sistemas multidominio. Esto permite construir diagramas de bloques, simular el comportamiento del sistema y su rendimiento, así como la interacción con el mundo externo de la computadora.

El programa está dividido en bloques, cada bloque realiza el cálculo de determinados valores que son utilizados por el bloque siguiente. A continuación se mencionan los bloques: 1) Estado de desarrollo del cultivo, 2) asimilación de CO_2 en la hoja, 3) asimilación bruta diaria de CO_2, 4) producción de carbohidratos, 5) mantenimiento, 6) particionado de materia seca, 7) crecimiento de órganos de la planta y translocación, 8) desarrollo de hojas, 9) producción de materia seca, 10) datos del tiempo, 11) comprobación del balance de carbón.

Los estados de desarrollo y los parámetros varían para cada cultivo específico. Para el caso del maíz los estados de desarrollo se obtuvieron a partir de un experimento de campo. En este trabajo se manejaron tres estados de desarrollo: el número 0 es la fecha de la emergencia de la planta, el 1 es asignado a la fecha de la antesis (emergencia de los estigmas) y el estado 2 es cuando se alcanza la madurez fisiológica.

El experimento de campo consistió en la siembra de un cultivo de maíz con riego suficiente, fertilización adecuada a partir de un análisis de suelo y labores de cultivo (preparación de la tierra, surcado y barbechado) de forma mecanizada, en un campo experimental de la Universidad Autónoma Chapingo, contando además con una estación meteorológica en el mismo terreno, importante para la obtención de los datos climatológicos requeridos en el programa.

Del programa SUCROS ajustado para el maíz, se obtiene peso seco de hojas, raíces, órganos de almacenamiento, de tallos, así como índice de área de hoja.

ÍNDICE

ÍNDICE DE PROGRAMAS Y SUBRUTINAS. 4

ÍNDICE DE FIGURAS 6

ÍNDICE DE FOTOS. 9

DEFINICIÓN DE LAS ABREVIACIONES USADAS. 10

INTRODUCCIÓN 13

PARTE I 17

CAPÍTULO 1. MODELO SUCROS 17

CAPÍTULO 2. ETAPAS DEL MODELO SUCROS. 19

2.1 MODELO DE CRECIMIENTO ANUAL PRINCIPAL. 19
2.1.1 Fases de crecimiento. 19
2.1.2 Término por pérdida debido a la respiración por mantenimiento. 19
2.2 FACTORES CLIMÁTICOS. 24
2.2.1 Progreso diario de la radiación global incidente. 24
2.2.1.1 Radiación difusa – directa. 24
2.2.2 Temperatura. 24
2.2.3 Humedad. 24
2.2.4 Velocidad del viento. 25
2.2.5 Curso de la temperatura anual. 25
2.3 FLUJO DE ASIMILADOS Y RESPIRACIÓN. 27
2.3.1 Crecimiento y respiración. 27
2.3.2 Respiración por crecimiento y composición química. 27
2.3.3 Respiración por mantenimiento. 27
2.4 DESARROLLO Y CRECIMIENTO. 30
2.4.1 Estados de desarrollo. 30
2.4.2 Identificación del estado de desarrollo. 30
2.4.3 Razón de desarrollo y factores ambientales. 32
2.4.3.1 Temperatura. 32
2.4.3.2 Vernalización (requerimientos de baja temperatura). 32
2.4.3.3 Longitud del día. 32
2.4.4 Distribución de materia seca y estado de desarrollo. 32
2.4.4.1 Asignación de asimilados. 32
2.4.5 Crecimiento de área de hoja. 33
2.5 RADIACIÓN EN CULTIVOS. 39
2.5.1 Modelo de cultivo con hojas horizontales negras. 39
2.5.2 Hojas negras que no están horizontales. 39
2.5.3 Hojas horizontales que no son negras. 39
2.5.4 Distribución de absorción de luz sobre el dosel de la hoja. 39
2.5.4.1 Radiación difusa. 39
2.5.4.2 Radiación directa. 40
2.5.5 Agrupamiento. 40
2.6 BALANCE DE ENERGÍA Y TRANSPIRACIÓN EN HOJAS. 44
2.6.1 Balance de energía de una hoja que no transpira. 44

2.6.2 Radiación térmica (onda larga). *44*
2.6.3 Evaporación de una superficie húmeda. *44*
2.6.4 Transpiración de hojas. *44*
2.7 ASIMILACIÓN DE CO_2 EN HOJAS 49
2.7.1 La curva de respuesta de la fotosíntesis – luz. *49*
2.7.2 El proceso de luz y oscuridad en la asimilación de CO_2. ..... *49*
2.7.3 Limitación por bajo CO_2 ..... *49*
2.7.4 Limitación por baja iluminación. *50*
2.7.5 Temperatura *50*

PARTE II **54**

CAPÍTULO 3. MEDICIONES DE CAMPO. **54**

3.1 ACTIVIDADES PARA LAS MEDICIONES DE CAMPO. 54
3.1.1 Determinación de peso fresco. *55*
3.1.2 Determinación de peso seco. *55*
3.1.3 Determinación de área de hoja *55*
3.1.4 Determinación de las etapas fenológicas de la planta. *55*
3.2 GRAFICAS DE DATOS DE CAMPO (U. A. CHAPINGO). 63
3.3 REGISTRO METEOROLÓGICO. 66

CAPÍTULO 4. MODELO DE CRECIMIENTO PARA UNA PRODUCCIÓN POTENCIAL DEL CULTIVO DEL MAÍZ (HÍBRIDO HS-2). **68**

4.1 CONDICIONES INICIALES. 71
4.2 DESARROLLO DEL CULTIVO. 72
4.3 ASIMILACIÓN DE CO_2 EN LA HOJA. 73
4.4 ASIMILACIÓN BRUTA DIARIA DE CO_2. 75
4.5 PRODUCCIÓN DE CARBOHIDRATOS. 76
4.6 MANTENIMIENTO. 77
4.7 PARTICIONADO DE MATERIA SECA. 79
4.8 CRECIMIENTO DE ÓRGANOS DE LA PLANTA Y TRANSLOCACIÓN. 80
4.9 DESARROLLO DE HOJAS. 83
4.10 PRODUCCIÓN DE MATERIA SECA. 85
4.11 DATOS DEL TIEMPO. 87
4.12 COMPROBACIÓN DEL BALANCE DE CARBÓN. 89
4.13 CONTROL DEL PROGRAMA. 90
4.14 SUBRUTINAS 91
4.14.1 SUBRUTINA GLA *91*
4.14.2 SUBROUTINA TOTASS *92*
4.14.3 SUBROUTINA ASSIM. *93*
4.14.4 SUBROUTINA ASTRO. *95*

CAPÍTULO 5. MODIFICACIONES Y AJUSTES DEL PROGRAMA SUCROS PARA EL MAÍZ (HÍBRIDO HS-2). **96**

5.1 PROCEDIMIENTO UTILIZADO PARA EL AJUSTE DEL PROGRAMA SUCRO. 96
5.1.1 Consideraciones. *96*
5.1.2 Ecuación de Gompertz. *99*
5.1.3 Ecuación exponencial. *101*

5.1.4 Influencia de los grados días de desarrollo en las ecuaciones de Gompertz y exponencial. *103*
5.1.5 Modificaciones a las condiciones iniciales en función de GDD. *105*
5.2 DESARROLLO DEL CULTIVO. 106
5.3 ASIMILACIÓN DE CO_2 EN HOJAS. 107
5.4 ASIMILACIÓN DE CO_2 DIARIA BRUTA 107
5.5 PRODUCCIÓN DE CARBOHIDRATOS 108
5.6 MANTENIMIENTO. 108
5.7 PARTICIÓN DE MATERIA SECA. 108
5.8 CRECIMIENTO DE LOS ÓRGANOS DE LA PLANTA Y TRANSLOCACIÓN. 109
5.9 DESARROLLO DE HOJAS. 109
5.10 PRODUCCIÓN DE MATERIA SECA. 111
5.11 DATOS ATMOSFÉRICOS. 111
5.11.1 Cálculo de los pesos de la temperatura máxima y mínima. *111*
5.12 REVISIÓN DEL BALANCE DE CARBÓN. 111
5.13 TABLA DE RESUMEN DE VALORES. 111
RESULTADOS Y DISCUSIONES 114
CONCLUSIONES Y PERSPECTIVA 116
BIBLIOGRAFÍA 118
ANEXO. DIAGRAMAS Y LISTADOS DE LOS EJERCICIOS DEL CAPÍTULO 2. 122

Índice de programas y subrutinas.

PROGRAMA 4.1. CÁLCULO DEL DESARROLLO DEL CULTIVO (BLOQUE B1). 72
PROGRAMA 4.2. ASIMILACIÓN DE HOJAS (BLOQUE B2). 73
PROGRAMA 4.3. ASIMILACIÓN DE CO_2 DIARIA BRUTA (BLOQUE B3). 75
PROGRAMA 4.4. ASIMILACIÓN DE CARBOHIDRATOS (BLOQUE B4). 76
PROGRAMA 4.5. REQUERIMIENTOS PARA MANTENIMIENTO DE LOS ÓRGANOS (HOJAS, TALLOS, RAÍCES, Y GRANOS) (BLOQUE B5). 77
PROGRAMA 4.6. PARTICIÓN DE MATERIA SECA (BLOQUE B6). 79
PROGRAMA 4.7. CRECIMIENTO DE ÓRGANOS DE LA PLANTA Y TRANSLOCACIÓN (BLOQUE B7)- 80
PROGRAMA 4.8. DESARROLLO DE HOJA (BLOQUE B8). 83
PROGRAMA 4.9. PRODUCCIÓN DE MATERIA SECA (BLOQUE B9). 85
PROGRAMA 4.10. DATOS DE TIEMPO ATMOSFÉRICO (BLOQUE B10). 87
PROGRAMA 4.11. REVISIÓN DEL BALANCE DE CARBÓN (BLOQUE B11). 89
PROGRAMA 4.12. GLA, CÁLCULO DEL ÁREA DE HOJA. 91
PROGRAMA 4.13. TOTASS, CÁLCULO DE LA ASIMILACIÓN BRUTA TOTAL DIARIA. 93
PROGRAMA 4.14. ASSIM, INTEGRACIÓN DE LA ASIMILACIÓN DEL DOSEL. 94
PROGRAMA 4.15. ASTRO, CÁLCULO DE LA LONGITUD DEL DÍA ASTRONÓMICO. 95
PROGRAMA 0.1. CÁLCULO DE BIOMASA, USANDO LA ECUACIÓN EXPOLINEAL Y LA COMPARA CON EL CRECIMIENTO. 122
PROGRAMA 0.2. GRÁFICA DE L VS TIEMPO LO=0.5 Y LO=0.05. 123
PROGRAMA 0.3. GRÁFICA DE L VS W. 123
PROGRAMA 0.4. ECUACIÓN EXPOLINEAL TRUNCADA 124
PROGRAMA 0.5. CURSO CLIMÁTICO ANUAL. 124
PROGRAMA 0.6. CURSO DE LA TEMPERATURA DIURNA. 125
PROGRAMA 0.7. CÁLCULO DE LA BIOMASA ESTRUCTURAL Y DE ASIMILADOS. 126
PROGRAMA 0.8. DESARROLLO DE LA COLZA, SUMA DE TEMPERATURA HASTA LA FLORACIÓN. ... 126
PROGRAMA 0.9. DESARROLLO DE LA COLZA, INCLUYENDO VERNALIZACIÓN. 126
PROGRAMA 0.10. DESARROLLO DE LA COLZA, INCLUYENDO TEMPERATURA DÍA/NOCHE. 127
PROGRAMA 0.11. DESARROLLO DE LA COLZA, INCLUYENDO VERNALIZACIÓN, ALTERNANDO TEMPERATURA DÍA/NOCHE 127
PROGRAMA 0.12. DESARROLLO DE LA COLZA, INCLUYENDO VERNALIZACIÓN (SIN FOTOPERÍODO). 128
PROGRAMA 0.13. DESARROLLO DE LA COLZA, INCLUYENDO VERNALIZACIÓN Y FOTOPERÍODO. . 129
PROGRAMA 0.14. CRECIMIENTO DEL CULTIVO CON UNA VARIABLE SLA. 130
PROGRAMA 0.15. SIMULACIÓN DE UN PERFIL DE RADIACIÓN DESCENDENTE. 131
PROGRAMA 0.16. PERFIL DE LA RADIACIÓN INCLUYENDO EL EFECTO DE LA REFLEXIÓN DEL SUELO 131
PROGRAMA 0.17. ASIMILACIÓN DEL DOSEL INSTANTÁNEO, USANDO UNA SUBRUTINA DE FOTOSÍNTESIS PARA HOJAS HORIZONTALES. 132
PROGRAMA 0.18. PERFIL DE RADIACIÓN PARA HOJAS NEGRAS, RADIACIÓN CERCA DEL INFRARROJO Y RADIACIÓN FOTOSINTÉTICA (PAR). EL ÁNGULO DE DISTRIBUCIÓN DE LA HOJA ES HORIZONTAL. 134
PROGRAMA 0.19. TRANSPIRACIÓN DE UNA SOLA HOJA. 134
PROGRAMA 0.20. TRANSPIRACIÓN DE UNA SOLA HOJA, COMPARACIÓN DEL MÉTODO DE SIMULACIÓN DINÁMICA CON LA ECUACIÓN DE COMBINACIÓN DE PENMAN-MONTEITH. 135

PROGRAMA 0.21. TRANSPIRACIÓN DE UNA SOLA HOJA A TEMPERATURA FIJA. 136
PROGRAMA 0.22. DEPENDENCIA DE LA TRANSPIRACIÓN DE UNA SOLA HOJA EN LA RESISTENCIA ESTOMATAL, CUANDO LA RESISTENCIA DE LA HOJA ES CALCULADA DE ACUERDO AL BALANCE DE ENERGÍA. 136
PROGRAMA 0.23. SIMULACIÓN DINÁMICA SIMPLIFICADA DEL BALANCE DE ENERGÍA DE LA HOJA, PARA TRES RESISTENCIAS ESTOMATAL CARACTERÍSTICAS. 137
PROGRAMA 0.24. SIMULACIÓN DINÁMICA DEL BALANCE DE ENERGÍA DE LA HOJA, PARA TRES RESISTENCIAS. EL EFECTO DE LA RADIACIÓN TÉRMICA ES AGREGADO, ASÍ COMO EL FACTOR EN EL QUE EL COEFICIENTE DE DIFUSIÓN DEL VAPOR DE AGUA ES MÁS GRANDE QUE EL DEL CALOR. 138
PROGRAMA 0.25. CURVA DE RESPUESTA FOTOSÍNTESIS - LUZ. 139
PROGRAMA 0.26. RESPUESTA FOTOSÍNTESIS - TEMPERATURA. 139
PROGRAMA 0.27. RESPUESTA FOTOSÍNTESIS - LUZ CON DIFERENTE CONCENTRACIÓN DE CO_2. 140
PROGRAMA 0.28. RESPUESTA FOTOSÍNTESIS - TEMPERATURA, ESTIMACIÓN DE LA RESISTENCIA DEL MESÓFILO. 140

Índice de figuras

FIGURA 2.1.1. BIOMASA SIMULADA (G MATERIA SECA M^{-2}) COMO UNA FUNCIÓN DEL TIEMPO, CALCULADA ACORDE A LA ECUACIÓN EXPOLINEAL (W), ACORDE AL CRECIMIENTO EXPONENCIAL PURO (WEXP), Y ACORDE A EL CRECIMIENTO LINEAL PURO (WLIN). 20
FIGURA 2.1.2. GRAFICA DE L CONTRA TIEMPO, DONDE L_O=0.5 Y L_O=0.05. 20
FIGURA 2.1.3. GRÁFICA DE L(M^2/M^2) CONTRA W(G/M^2) USANDO EL MODELO DEL PROGRAMA 0.3. 21
FIGURA 2.1.4. LAI TIENE EL MISMO CURSO DE TIEMPO COMO ANTES, PERO LA BIOMASA ESTA CAMBIANDO A UN GRAN NIVEL. 21
FIGURA 2.1.5. CORRIDAS CON SLA=0.01, 0.02, Y 0.05 22
FIGURA 2.1.6. CORRIDAS CON LWR=0.2, 0.5 Y 1 22
FIGURA 2.1.7. CORRIDAS CON TR=150, 160, 190, Y 250 23
FIGURA 2.1.8. CORRIDAS CON TR = 190, Y RM = 0.05, 0.1, 0.14, Y 0.25 23
FIGURA 2.2.1. CORRIDAS PARA OTRAS LATITUDES. 25
FIGURA 2.2.2. CURSO DE TEMPERATURA DIURNA PARA VERANO. 26
FIGURA 2.2.3. CURSO DE TEMPERATURA DIURNA PARA INVIERNO. 26
FIGURA 2.3.1. RAZÓN DE CRECIMIENTO RELATIVO DEL TOTAL DE MATERIA SECA (RGR) COMO UNA FUNCIÓN DE TEMPERATURA. 28
FIGURA 2.3.2. CANTIDAD DE ASIMILADO COMO UN RESULTADO DEL FLUJO DE ASIMILACIÓN MENOS EL CONSUMO POR CRECIMIENTO Y MANTENIMIENTO. 29
FIGURA 2.3.1. RETROALIMENTACIÓN INTRODUCIDA PARA DISMINUIR EL VALOR DEL FACTOR DE CONVERSIÓN DE LA RADIACIÓN PROMEDIO. 29
FIGURA 2.4.1. ESTADO DE DESARROLLOS. 33
FIGURA 2.4.2. ESTADO DE DESARROLLOS A DIFERENTE TEMPERATURA 34
FIGURA 2.4.3. ESTADO DE DESARROLLO A IGUAL Y DIFERENTE DÍA/NOCHE SIN VERNALIZACIÓN (PROGRAMA 0.8, PROGRAMA 0.10). 35
FIGURA 2.4.4. ESTADO DE DESARROLLO A IGUAL Y DIFERENTE DÍA/NOCHE CON VERNALIZACIÓN (PROGRAMA 0.9, PROGRAMA 0.11). 35
FIGURA 2.4.5. ESTADO DE DESARROLLO A IGUAL Y DIFERENTE DÍA/NOCHE SIN VERNALIZACIÓN (PROGRAMA 0.8, PROGRAMA 0.10). 36
FIGURA 2.4.6. ESTADO DE DESARROLLO A IGUAL Y DIFERENTE DÍA/NOCHE CON VERNALIZACIÓN (PROGRAMA 0.10, PROGRAMA 0.11). 36
FIGURA 2.4.7. GRÁFICA DE EMERGENCIA 37
FIGURA 2.4.8. GRÁFICA DE LA EMERGENCIA CON Y SIN LA INFLUENCIA FOTOPERIÓDICA. 37
FIGURA 2.4.9. GRÁFICAS DE TIME-LAI Y TIME-SLA 38
FIGURA 2.4.10. GRÁFICAS DE BIOM-SLA. 38
FIGURA 2.5.1. COMPARACIÓN DE FLUJOS DESCENDENTE PARA DELT=1 Y 0.5. 40
FIGURA 2.5.1. COMPARACIÓN DE FLUJOS DESCENDENTE DELT=0.1 Y 0.01. 41
FIGURA 2.5.2. PERFIL DE LA RADIACIÓN. 41
FIGURA 2.5.3. GRÁFICA DE ROEFF CONTRA LAI PARA EL RANGO DE LAI DESDE 0 A 5 42
FIGURA 2.5.4. TABLA CON VALORES DIFERENTE PARA AMAX Y EFF. 42
FIGURA 2.5.5. GRÁFICA DE LA ASIMILACIÓN DEL DOSEL VS LAI. 43
FIGURA 2.5.6. PERFIL DE LA RADIACIÓN PARA HOJAS NEGRAS HORIZONTALES. 43
FIGURA 2.6.1. SIMULACIÓN PARA HOJA HORIZONTAL ENCIMA DEL DOSEL. 45
FIGURA 2.6.2. GRÁFICA DEL PROGRAMA 0.20. 45

FIGURA 2.6.3. GRÁFICA DE LHL COMO UNA FUNCIÓN DE RL. 46
FIGURA 2.6.4. GRÁFICA DE LHL COMO UNA FUNCIÓN DE RL Y DE TL VS RL. 47
FIGURA 2.6.5. GRÁFICA DE LA TEMPERATURA DE LA HOJA CONTRA EL TIEMPO..... 47
FIGURA 2.6.6. GRÁFICA DEL MEJORAMIENTO DE LOS MODELOS. 48
FIGURA 2.7.1. COMPORTAMIENTO DE LA FOTOSÍNTESIS. 50
FIGURA 2.7.2. RESPUESTA A LA LUZ SIMPLE PARA CARACTERÍSTICAS FOTOSINTÉTICAS SIMPLES... 51
FIGURA 2.7.3. RESPUESTA DE TEMPERATURA PARA UNA INTENSIDAD DE LUZ DADA..... 52
FIGURA 2.7.4. GRÁFICA QUE DA LA CURVA DE RESPUESTA DE LA LUZ..... 52
FIGURA 2.7.5. GRÁFICA DE RESPUESTA DE CO_2..... 53
FIGURA 3.2.1 GRÁFICA DEL PESO FRESCO TOTAL DE LA PLANTA CON RESPECTO AL TIEMPO (DATOS DE CAMPO, U. A. CHAPINGO). 63
FIGURA 3.2.2. GRÁFICA DEL PESO FRESCO DE LA HOJA CON RESPECTO AL TIEMPO (DATOS DE CAMPO, U. A. CHAPINGO). 64
FIGURA 3.2.3. GRÁFICA DEL PESO SECO DE LA PLANTA CON RESPECTO AL TIEMPO (DATOS DE CAMPO, U. A. CHAPINGO). 64
FIGURA 3.2.4. GRÁFICA DE LA LONGITUD DEL TALLO CON RESPECTO AL TIEMPO (DATOS DE CAMPO, CHAPINGO). 65
FIGURA 3.2.5. GRÁFICA DEL ÁREA DE HOJA CON RESPECTO AL TIEMPO (DATOS DE CAMPO, CHAPINGO). 65
FIGURA 3.2.6. GRÁFICA DEL ÍNDICE DE ÁREA DE HOJA CON RESPECTO AL TIEMPO (DATOS DE CAMPO, CHAPINGO). 66
FIGURA 3.3.1. TABLA DE LA RADIACIÓN SOLAR DIARIA COMO FUNCIÓN DEL DÍA DEL AÑO (DATOS DE CAMPO DE LA ESTACIÓN METEOROLÓGICA DE LA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA CHAPINGO, 2001). 66
FIGURA 3.3.2. TABLA DE LA TEMPERATURA MÁXIMA DIARIA COMO FUNCIÓN DEL DÍA DEL AÑO (DATOS DE CAMPO DE LA ESTACIÓN METEOROLÓGICA DE LA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA CHAPINGO, 2001). 67
FIGURA 3.3.3. TABLA DE LA TEMPERATURA MÍNIMA DIARIA COMO FUNCIÓN DEL DÍA DEL AÑO (DATOS DE CAMPO DE LA ESTACIÓN METEOROLÓGICA DE LA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA CHAPINGO, 2001). 67
FIGURA 4.0.3.3.1. PROGRAMA DE SIMULACIÓN SUCROS MODIFICADA PARA EL MAÍZ (HÍBRIDO HS-2) EN LA REGIÓN DE LA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA CHAPINGO. 70
FIGURA 4.3.1. TABLA DEL FACTOR DE ENVEJECIMIENTO DEL DOSEL (GOUDRIAAN, 1994, P. 187). 74
FIGURA 5.1.1. SUSTITUCIÓN DEL LAI CALCULADO POR SUCROS POR EL OBTENIDO EN LAS MEDICIONES DE CAMPO..... 97
FIGURA 5.1.2. INTERPOLACIÓN DE LA CURVA DE LA EVOLUCIÓN DEL PESO SECO CON RESPECTO AL TIEMPO DEL EXPERIMENTO DE CAMPO CONTRA UNA CURVA GOMPERTZ..... 98
FIGURA 5.1.3. INTERPOLACIÓN DE LA CURVA DE PESO FRESCO CONTRA EL ÁREA DE HOJA CON UNA CURVA EXPONENCIAL. 98
FIGURA 5.1.4. EVOLUCIÓN DEL ÍNDICE DE ÁREA DE HOJA CON RESPECTO AL TIEMPO COMO RESPUESTA DE SISTEMAS CONECTADOS EN CASCADAS (GUMPERTZ, EXPONENCIAL Y FACTOR DIVISOR). 99
FIGURA 5.1.5. GRÁFICA DE W VS T. 100
FIGURA 5.1.6. LINEALIZACIÓN DE W..... 100
FIGURA 5.1.7. ECUACIÓN DE GOMPERTZ EN FORMA DE BLOQUES. 101
FIGURA 5.1.8. OBTENCIÓN DE LOS VALORES DE K Y DE A POR MEDIO DE GRÁFICA. 101
FIGURA 5.1.9. ECUACIÓN EXPONENCIAL EN FORMA DE BLOQUE PARA CALCULAR EL ÁREA DE HOJA. 102

FIGURA 5.1.10. GRÁFICA DE GDD Y SU INTERPOLACIÓN CON UNA TEMPERATURA BASE DE 10° C. 103
FIGURA 5.1.11. ECUACIONES EN FORMA DE BLOQUE PARA EL CÁLCULO DEL ÁREA DE HOJA AFECTADO POR LOS GRADOS DÍAS DE DESARROLLO (GDD). 105
FIGURA 5.2.1. TABLA DE LA RAZÓN DE DESARROLLO DVR EN FASE PRE-ANTESIS COMO FUNCIÓN DE LA TEMPERATURA (DVRVT), BASADO EN GOUDRIAAN, 1994, P. 187, MODIFICADO PARA EL MAÍZ (HÍBRIDO HS-2). 106
FIGURA 5.2.2. TABLA DE LA RAZÓN DE DESARROLLO (DVR) EN FASE POST-ANTESIS COMO FUNCIÓN DE LA TEMPERATURA (DVRRT), BASADO EN GOUDRIAAN, 1994, P. 187, MODIFICADO PARA EL MAÍZ (HÍBRIDO HS-2). 106
FIGURA 5.3.1. TABLA DEL FACTOR DE CONTEO POR EFECTO DE LA TEMPERATURA DEL DÍA (AMTMP) SOBRE AMX COMO FUNCIÓN DE LA TEMPERATURA DIARIA PROMEDIO DEL DÍA (DDTMP), BASADO EN GOUDRIAAN, 1994, P. 187, MODIFICADO PARA EL MAÍZ (HÍBRIDO HS-2). 107
FIGURA 5.7.1. TABLA DE LA FRACCIÓN DE MATERIA SECA DE BROTES ASIGNADAS A HOJAS (FLVTB), COMO FUNCIÓN DEL ESTADO DE DESARROLLO(DVS), PENNING DE VRIES, ET AL (1989), TABLA 18, P. 89. 108
FIGURA 5.7.2. TABLA DE LA FRACCIÓN DE MATERIA SECA DE BROTES ASIGNADAS A TALLOS(FSTTB), COMO FUNCIÓN DEL ESTADO DE DESARROLLO (DVS), PENNING DE VRIES, ET AL (1989), TABLA 18, P. 89. 109
FIGURA 5.7.3. TABLA DE LA FRACCIÓN DE MATERIA SECA TOTAL ASIGNADA A BROTES (FSHTB), COMO FUNCIÓN DEL ESTADO DE DESARROLLO (DVS), PENNING DE VRIES, ET AL (1989), TABLA 18, P. 89 109
FIGURA 5.9.1. TABLA DE LA RAZÓN DE SENESCENCIA RELATIVA (RDRT)(PENNING DE VRIES, ET AL (1989), TABLA 15, P. 82) 110
FIGURA 5.13.1. COMPARACIÓN DEL ÍNDICE DE ÁREA DE HOJA (LAI), DATOS Y DEL PROGRAMA .. 114
FIGURA 5.13.2. GRÁFICAS QUE MUESTRAN LA LONGITUD DE TALLO Y EL PESO DEL TALLO (DATO DE CAMPO). 115
FIGURA 5.13.3. GRÁFICAS COMPARATIVAS DEL PESO DE LA HOJA. 115

Índice de fotos.

FOTO 1. PREPARACIÓN DE LA TIERRA. SE VOLTEA LA TIERRA Y SE HACEN LOS SURCOS (18 DE MAYO DEL 2001). 56
FOTO 2. DESPUÉS DEL SEMBRADO SE REALIZA EL PRIMER RIEGO (22 DE MAYO DEL 2001). 56
FOTO 3. ETAPA 0. EMERGENCIA DE LA PLANTA AL DÍA 30 DE MAYO DEL 2001. 57
FOTO 4. PLANTA DE MAÍZ (HÍBRIDO HS-2) AL MES DE SER SEMBRADA (28 DE JUNIO DEL 2001). .. 57
FOTO 5. PLANTA DE MAÍZ (HÍBRIDO HS-2) AL SEGUNDO MES DE SIEMBRA (30 DE JULIO DEL 2001), PARTE SUPERIOR: PLANTA ENTERA; PARTE INFERIOR: PLANTA DESMENUZADA. 58
FOTO 6. PLANTA DE MAÍZ (HÍBRIDO HS-2) AL DÍA 02 DE AGOSTO DEL 2001, PUEDE VERSE QUE YA ESTÁ FORMADA LA ESPIGA. 59
FOTO 7. ESTADO 1. PLANTA DE MAÍZ (HÍBRIDO HS-2) AL DÍA 16 DE AGOSTO DEL 2001. AQUÍ PODEMOS VER QUE LA ESPIGA ESTÁ PRESENTE ASÍ COMO EL PRIMER ÓRGANO DE ALMACENAMIENTO. 60
FOTO 8. EN ESTA FOTO SE MUESTRA COMO LOS ESTIGMAS ESTÁN POR SALIR DE LAS ESPATAS (PLANTA DE MAÍZ (HÍBRIDO HS-2) AL DÍA 16 DE AGOSTO DEL 2001) (ESTADO 1). 61
FOTO 9. CULTIVO DEL MAÍZ (HÍBRIDO HS-2) AL CUARTO MES DE SEMBRADO (27 DE SEPTIEMBRE DEL 2001), EMPIEZA A OBSERVARSE SENESCENCIA DE LAS HOJAS. 61
FOTO 10. MAZORCAS DE UNA MISMA PLANTA, LOS GRANOS ESTÁN EN SU ETAPA LECHOSA (27 DE SEPTIEMBRE DEL 2001). 62
FOTO 11. ETAPA 2. EL CRECIMIENTO SE HA DETENIDO COMPLETAMENTE, VARIAS DE LAS HOJAS YA ESTÁN SECAS Y LOS GRANOS ESTÁN MAZOSOS. 62
FOTO 12. SE PUEDE OBSERVAR QUE LA MAZORCA ESTÁ COMPLETAMENTE FORMADA, LOS GRANOS LLENOS Y MAZOSOS (ETAPA DE DESARROLLO 2, 15 DE OCTUBRE 2001). 63

Definición de las abreviaciones usadas.

AMAX	Razón de asimilación actual de CO_2 en saturación de luz para hojas individuales	[kg CO_2/ha_{hoja}h]
AMDVS	Factor de relación por efecto del estado de desarrollo sobre AMX	[-]
AMDVST	Tabla de AMDVS como una función de DVS	[-,-]
AMTMP	Factor de consideración por efecto de la temperatura diaria sobre AMX	[-]
AMTMPT	Tabla de AMTMP como función de DDTMP	[-,°C]
AMX	Razón de asimilación potencial de CO2 en saturación de luz para hojas individuales	[kg CO_2/ha_{hoja}h]
AOB	Variable intermedia	[-]
ASIN	Arcsen de la función	[-]
ASRQ	Requerimiento de asimilados (CH_2O) para producción de materia seca	[kg CH_2O/kgMS]
ASRQLV	Requerimiento de asimilados para producción de materia seca en hojas	[kg CH_2O/kgMS_{hoja}]
ASRQST	Requerimiento de asimilados para producción de materia seca en tallos	[kg CH_2O/kgMS_{tallos}]
ASRQSO	Requerimiento de asimilados para producción de materia seca en órganos de almacenamiento	[kg CH_2O/kg$MS_{órg.alm}$]
ASRQRT	Requerimiento de asimilados para producción de materia seca en raíz	[kg CH_2O/kg$MS_{raíz}$]
ATMTR	Coeficiente de transmisión atmosférica	[-]
CFLV	Fracción de masa de carbón en las hojas	[kgC/kg MS]
CFRT	Fracción de masa de carbón en las raíces	[kgC/kg MS]
CFSO	Fracción de masa de carbón en los órganos de almacenamiento	[kgC/kg
CFST	Fracción de masa de carbón en los tallos	[kgC/kg MS]
CHKDIF	Diferencia entre carbón agregado a el cultivo desde la inicialización y el total neto de flujo integrado de carbón, relativo a su suma	[-]
CHKIN	Carbón en el cultivo acumulado desde el inicio de la simulación	[kgC/ha]
CHKFL	Suma de flujos de carbón integrado dentro y fuera del cultivo	[kgC/ha]
COSLD	Amplitud del seno de la altura solar	[-]
CO2RT	Factor de producción de CO_2 para crecimiento de raíces	[kgCO_2/kg MS]
CO2LV	Factor de producción de CO_2 para crecimiento de hojas	[kgCO_2/kg MS]
CO2ST	Factor de producción de CO_2 para crecimiento de tallos	[kgCO_2/kg MS]
CO2SO	Factor de producción de CO_2 para crecimiento de órganos de almacenamiento	[kgCO_2/kg MS]
DAVTMP	Temperatura promedio diaria	[°C]
DAY	Número del día desde el 1° enero (día del año)	[d]
DAYL	Longitud del día	[h/d]
DTGA	Asimilación bruta total diaria	[kgCO_2/ha/d]
DSO	Radiación extraterrestre diaria	[J/m^2/s]
DDTMP	Temperatura del día (salida y puesta del sol) promedio diaria	[°C]
DEC	Declinación del sol	[radianes]
DELT	Intervalo de tiempo de integración	[d]
DLAI	Razón de muerte del área de hoja	[ha/ha d]
DLV	Razón de muerte de hojas	[kg$_{hoja}$/ha d]
DOY	Número del día desde el 1° enero (día del año)	[d]
DOYEM	Día del año de emergencia del cultivo	[d]
DSO	Radiación extraterrestre diaria	[J/m^2d]
DSINB	Integración de SINB sobre el día	[sd^{-1}]
DSINBE	Como DSINB, pero con una corrección para transmisión atmosférica baja a elevación solar baja	[sd^{-1}]
DTEFF	Temperatura efectiva diaria	[°C]
DTGA	Asimilación bruta total diaria de CO_2 del cultivo	[kg CO_2/ha_{tierra}h]
DTMAX	Temperatura máxima diaria	[°C]
DTMIN	Temperatura mínima diaria	[°C]
DTR	Radiación solar diaria	[J/m^2 d]
DTRT	Tabla de DTR como función del día del año	[J/m^2 d, d]
DVR	Razón de desarrollo	[d^{-1}]

DVRRT	Tabla de DVR en fase de post-antesis como función de temperatura	[d^{-1}, °C]
DVRVT	Tabla de DVR en fase de pre-antesis como función de temperatura	[d^{-1}, °C]
DVS	Estado de desarrollo del cultivo	[-]
EAI	Índice de área de espiga	[ha_{espiga}/ha_{tierra}]
EAR	Razón de área/peso de espigas	[ha/kg]
EFF	Factor de conversión de luz inicial para hojas individuales	[kg CO_2/ha_{hoja}h][J/m^2 hojas]$^{-1}$
EMERG	Parámetro para indicar la emergencia	[-]
FGROS	Razón de asimilación instantánea del dosel completa	[ha_{suelo}/h]
FLV	Fracción total de materia seca asignada a las raíces	[-]
FLVTB	Tabla de FLV como función de DVS	[-]
FRT	Fracción total de materia seca asignada a las raíces	[-]
FRTRL	Fracción del peso del tallo eventualmente translocado a órganos de almacenamiento	[-]
FSH	Fracción total de materia seca asignada para los brotes	[-]
FSHTB	Tabla de FSH como función de DVS (estado de desarrollo del cultivo)	[-]
FSO	Fracción de materia seca de brote asignad a órganos de almacenamiento	[-]
FST	Fracción de materia seca de brote asignados a tallos	[-]
FSTTB	Tabla de FST como función de DVS	[-]
GLA	Subrutina de FORTRAN para calcular GLAI	
GLAI	Razón de crecimiento neto del índice de área de hoja	[ha_{hoja}/ha_{tierra} d]
GLV	Razón de crecimiento de materia seca de hojas	[kgMS/ha_{tierra} d]
GPHOT	Asimilación bruta total diaria de CH_2O del cultivo	[kg CH_2O/ha_{tierra} d]
GRT	Razón de crecimiento de materia seca de raíces	[kgMS/ha_{tierra} d]
GSO	Razón de crecimiento de materia seca de órganos de almacenamiento	[kgMS/ha_{tierra} d]
GST	Razón de crecimiento de materia seca de tallos	[kg MS/ha_{tierra} d]
GTW	Razón de crecimiento bruto de materia seca del cultivo, incluyendo translocación	[kgMS/ha_{tierra} d]
HI	Índice de cosecha	[$kg_{org.\ alm.}$/kg TADRW]
HOUR	Hora seleccionada durante el día	[h]
IDVS	Estado inicial de desarrollo	[kg/ha]
ILAI	Índice de área de hoja inicial	[ha_{hoja}/ha_{tierra}]
KBL	Coeficiente de extinción para componente directo de flujo PAR directo	[ha_{tierra}/ha_{hoja}]
KDF	Coeficiente de extinción para hojas	[ha_{tierra}/ha_{hoja}]
KDRT	Coeficiente de extinción para flujo PAR directo total	[ha_{tierra}/ha_{hoja}]
LAO	Área de hoja inicial (en emergencia de campo)	[m^2/plant]
LAI	Índice de área de hoja usada por la fotosíntesis	[ha/ha]
LAIC	Índice de área de hoja arriba seleccionada en lo alto del dosel	[ha_{hoja}/ha_{tierra}]
LAICR	Índice de área de hoja critica más allá del cual la muerte ocurre por auto-sombreo	[ha_{hoja}/ha_{tierra}]
LATT	Latitud de la estación meteorológica	[grados]
MAINLV	Coeficiente de respiración de mantenimiento de las hojas	[kgCH_2O/kgMSd]
MAINRT	Coeficiente de respiración de mantenimiento de las raíces	[kgCH_2O/kgMSd]
MAINSO	Coeficiente de respiración de mantenimiento de las órganos de almacenamiento	[kgCH_2O/kgMSd]
MAINST	Coeficiente de respiración de mantenimiento de los tallos	[kgCH_2O/kgMSd]
MAINT	Razón de respiración de mantenimiento del cultivo	[kg CH_2O/had]
MAINTS	Razón de respiración de mantenimiento del cultivo a temperatura de referencia	[kg CH_2O/had]
MNDVS	Factor de consideración para efecto del estado de desarrollo del cultivo (DVS) sobre la respiración de mantenimiento	[-]
NPL	Densidad de planta	[plant/m^2]
PAR	Flujo instantáneo de radiación fotosintéticamente activo	[W/m^2]
PARDF	Flujo instantáneo de radiación difusa (PAR)	[W/m^2]
PARDR	Flujo instantáneo de radiación directa (PAR)	[W/m^2]
RDD	Radiación global diaria	[kJ/m^2 d]
RDR	Índice de muerte relativa	[d^{-1}]

RDRDV	Razón de muerte relativa debido al desarrollo del envejecimiento	[d^{-1}]
RDRSH	Razón de muerte relativa debido al auto sombreo en alta LAI	[d^{-1}]
RDRT	Tabla de RDR como función de DAVTMP	[d^{-1} °C]
REAI	Razón de crecimiento del índice de área de espiga	[ha/ha d]
REDF	Factor de consideración por efecto de la temperatura sobre AMAX	[-]
REFH	Coeficiente de reflexión para PAR difuso	[-]
REFS	Coeficiente de reflexión para PAR directo	[-]
RGRL	Razón de crecimiento relativo de la hoja	[ha/ha]
RDR	Razón de muerte (senescencia) relativa de hojas	[d^{-1}]
SC	Constante solar	[J/m^2s]
SCP	Coeficiente de dispersión de hojas para PAR	[-]
SINB	Seno de la altura solar	[-]
SINLD	Compensación de la temporada del seno de la altura solar	[-]
SLA	Área de hoja específica	[ha/kg]
SCP	Coeficiente de dispersión de hojas por PAR	[-]
TADRW	Total de peso seco sobre la tierra	[kg/ha]
TAI	Índice de área total	[ha/ha_{tierra}]
TBASE	Temperatura base para el crecimiento del área de hoja juvenil	[°C]
TDRW	Biomasa total	[kg MS/ha]
TDTGA	Asimilación total bruta de CO_2 del cultivo	[kg CO_2/ha_{tierra}]
TEFF	Factor de consideración por efecto de la temperatura sobre la respiración de mantenimiento	[-]
TMAXT	Tabla de temperatura máxima diaria como función del día del año	[°C, d]
TMINT	Tabla de temperatura mínima diaria como función del día del año	[°C, d]
TNASS	Asimilación total neta de CO_2	[kg CO_2/ha]
TRANSL	Razón de translocación de materia en tallo a órganos de almacenamiento	[kgMS/ha d]
TREF	Temperatura de referencia	[°C]
VISDF	Flujo difuso absorbido por unidad de área de hoja (a profundidad LAIC)	[W/m^2]
VIST	Flujo directo total absorbido por unidad de área de hoja (a profundidad LAIC)	[W/m^2]
VISD	Componente directo absorbido de flujo directo por unidad de área de hoja (a profundidad LAIC)	[W/m^2]
VISSHD	Flujo total absorbido por hojas sombreadas por unidad de área de hoja (a profundidad LAIC)	[W/m^2]
VISPP	Flujo de luz absorbido por hojas perpendiculares sobre rayos directos	[W/m^2]
WD	Peso de DTMIN	[-]
WLV	Peso seco de las hojas (verdes+muertas)	[kg/ha]
WLVD	Peso seco de las hojas muertas	[kg/ha]
WLVDI	Peso seco inicial de las hojas muertas	[kg/ha]
WLVG	Peso seco de hojas verdes	[kg/ha]
WLVI	Peso seco inicial de las hojas	[kg/ha]
WRT	Peso seco de las raíces	[kg/ha]
WRTI	Peso inicial de las raíces	[kg/ha]
WSO	Peso seco de los órganos de almacenamiento	[kg/ha]
WSOI	Peso seco inicial de órganos de almacenamiento	[kg/ha]
WST	Peso seco de los tallos	[kg/ha]
WSTI	Peso seco inicial de los tallos	[kg/ha]

Introducción

Los cultivos básicos pertenecen a las familias Gramineae y Leguminoseae. Dentro de la primera familia el cultivo más importante es el maíz. El cultivo del maíz es de importancia especial dado que constituye la base de la alimentación en América Latina y ocupa el tercer lugar en la producción mundial (después del trigo y el arroz).

Hay que señalar que México no es auto suficiente en la producción de granos básicos. En 1999 se importaron 5.5 millones de toneladas de maíz. (El Financiero, 2000, El Financiero, 1999). El departamento de Agricultura de Estados Unidos (USDA) considera que México se perfila como un importador cada vez mas agresivo de granos, del año 2000 al 2009 (36% de aumento en maíz). El USDA asegura que la importaciones repuntaran considerando que la capacidad de la producción agrícola de México "permanecerá limitada por la escasez de agua y tierra, así como por los bajos niveles de tecnología" (El Financiero, 2000).

El proceso de crecimiento de las plantas de los cultivos es un proceso dinámico que se desarrolla en el tiempo. Durante este proceso como en el caso de cualquier otro proceso dinámico existen varios factores que afectan la dinámica del proceso. Estos factores se pueden clasificar en dos grupos: (1) El primero consiste de factores cuya naturaleza no están a nuestro alcance, como es el caso del clima. La variación del clima afecta al desarrollo de las plantas de una manera arbitraria; la intensidad e influencia de las variaciones climáticas dependerá del tipo de cultivo, de la zona agrícola, y de la agricultura practicada (temporal, riego o protegida). (2) En el segundo grupo entran los factores cuya aplicación depende de nosotros, como es el caso del riego y de los fertilizantes.

Uno de los avances más notables en la tecnología agrícola se ha dado gracias al uso de modelos matemáticos que describen el comportamiento fisiológico (Thornley, 1976; Thornley et al, 1990; Faquhar et al, 1980; Faquhar et al, 1982; Faquhar et al, 1989; Jones, 1992; Maksymowych, 1973; Lange et al, 1982) y fenológico (Hunt, 1982; Penning de Vries et al, 1982) de las plantas (ver Scientia Horticulturae vol 74, 1998) para una reseña de modelos matemáticos en las plantas, puesto que esto ha permitido tanto la utilización de técnicas modernas del control como también la aplicación de métodos avanzados de optimización (Hashimoto et al, 1991; Day, et al, 1996; Munack, et al, 1997).

Con respecto a los modelos de crecimiento de cultivos en condiciones de campo abierto se ha investigado preferentemente al trigo (planta C3). Aunque existen modelos de crecimiento genéricos comerciales, SUCROS (Van Keulen et al), SUCROS'87 (Spitters et al, 1989), o SUCROS'97 (Laar et al, 1997), para modelar el crecimiento del maíz, es necesario generar información muy especializada

que este modelo requiere (Singh et al, 1995). En esta tesis lo que se lleva a cabo, es estudiar el modelo SUCROS (Simple and Universal CROp Growth Simulator) y hacer la correspondiente estimación de parámetros y validación del mismo para maíz en México. Las perspectivas que se pueden continuar a partir de este trabajo son las siguientes:

1. Desarrollar nuevos modelos que mejor se ajusten a las variedades nacionales. Una referencia interesante para los aspectos básicos de modelización del crecimiento de cultivos es Goudriaan (1994).
2. La simulación de las variables del tiempo atmosférico, tiene su importancia sobre las actividades del hombre. Para la agricultura, determinar el impacto de los meteoros sobre esta, por ejemplo la lluvia, las bajas temperaturas (heladas), el viento que en forma conjunta en el espacio y tiempo definen el potencial económico de la región.
3. La obtención de los modelos permitirá aplicar las técnicas avanzadas de análisis matemático, la utilización de técnicas modernas del control y la aplicación de métodos avanzados de optimización.

Quizás el punto más importante de la simulación es relacionar la simulación con la predicción de las variables meteorológicas (de tiempo atmosférico) para la planeación agrícola, en México.

En el caso de la agricultura en ambientes abiertos, es importante llevar un monitoreo de las variables agrometeorológicas que tienen un impacto importante en el crecimiento y desarrollo de los cultivos.

Una componente importante del desarrollo de este proyecto es la obtención de modelos matemáticos que describan el comportamiento fisiológico y fenológico durante el desarrollo del cultivo del maíz. En México existe una gran necesidad de la tecnificación del campo. Y el gobierno mexicano está impulsando esta tecnificación del campo dando créditos (alianza para el campo) para integrar técnicas modernas y más eficientes en la productividad agrícola.

Un componente importante para lograr lo anterior es el desarrollar y disponer de tecnología propia, que sea desarrollada para las condiciones de nuestro campo, que los productores dominen y que técnicos mexicanos puedan coadyuvar o participar cuando surjan problemas en el uso de la tecnología.

La hipótesis principal de este proyecto de tesis es que la dinámica del desarrollo, de los cultivos del maíz, puede ser descrito mediante modelos matemáticos. Esta descripción por modelos dinámicos permite la aplicación de técnicas avanzadas del control automático.

En el caso de modelos demasiados complicados o con un alto grado de incertidumbre siempre existirá la posibilidad de aplicar técnicas de control del tipo computacional, debido a que los sistemas agrícolas tienen un carácter estable y sus tiempo de respuesta son relativamente grandes en comparación a la velocidad de cálculo de los sistemas de computo actuales.

Objetivos.

El objetivo principal de este proyecto de tesis es:

Generar un programa de cómputo que permita la simulación del crecimiento del cultivo del maíz (híbrido HS-2) en función de las variables climáticas de un lugar, en nuestro caso aplicado a la región del campo experimental de la U. A. Chapingo.

Metas principales.

Las metas a cumplir son las siguientes:

1. Estudiar el modelo de crecimiento genérico SUCROS.
2. Adaptar el modelo de simulación SUCROS a un ambiente MatLab® – Simulink®.
3. Obtener parámetros de la literatura, estimar parámetros y ajustar el modelo de simulación SUCROS para el cultivo básico del Maíz (híbrido HS-2).

Esto se puede justificar porque:

- Es importante contar con modelos para el análisis matemático, así como de que existen buenos modelos universales aplicados en la práctica.
- MatLab® es un programa de computación de matemática integrada, visualización, y un poderoso lenguaje para proveer un ambiente flexible para computación. Simulink® es una herramienta interactiva para modelado, simulación, y análisis dinámico de sistemas multidominio.
- El cultivo del maíz constituye la base de la alimentación en América Latina y ocupa el tercer lugar en la producción mundial (después del trigo y el arroz).

Para lograr el objetivo de un buen ajuste del programa de simulación, se llevó a cabo un experimento de campo con un cultivo en las condiciones más propicias, esto lo vemos en el capítulo 3, donde se da información del experimento y los resultados obtenidos.

El trabajo de tesis está constituido de la siguiente forma: en el capítulo 1 hacemos una descripción del programa de simulación SUCROS, que es y para

que sirve. En el capítulo dos vemos las etapas del modelo SUCROS y presentamos una selección de ejercicios de Goudriaan (1994) con la finalidad de tener un primer acercamiento y antecedentes cuando veamos el programa completo, aquí hemos empezado a escribir los programas en el ambiente MatLab® - Simulink®, para una ampliación del tema sugerimos al lector referirse a Goudriaan (1994). A continuación tenemos el capítulo tres, el cual hemos dicho que es donde exponemos el experimento de campo y sus resultados que nos servirán para modificar y ajustar el programa que estamos trabajando. El capítulo cuatro, explica las etapas del modelo de simulación SUCROS, y aquí es donde hemos cambiado el antiguo tipo de programación basado en FORTRAN Simulation Translator (FST) a la programación basada en un ambiente flexible para computación técnica con herramientas interactivas para modelado, simulación, y análisis dinámico de sistemas multidominio la cual permite construir diagramas de bloque, simular el comportamiento del sistema y su rendimiento, así como permitir interacción con motores y mecanismos. En el primer punto de este capítulo (4.1) vemos las condiciones iniciales con las que trabajaremos, y en el 4.2 empezamos el cálculo del programa con la determinación de los estados de desarrollo del cultivo, a continuación vemos en el 4.3 como se realiza la asimilación de CO_2 en las hojas y en otro bloque (4.4) vemos la asimilación bruta diaria de CO_2. El punto 4.5 muestra la producción de carbohidratos y en el bloque siguiente (4.6) vemos como se calcula la energía necesaria para el mantenimiento de la bioestructura existente. El particionado de materia seca se realiza solamente con el estado de desarrollo (4.7) y con ello podemos calcular el crecimiento de los órganos de la planta y translocación (4.8). En el punto 4.9 podemos ver como se da el desarrollo de las hojas a través del índice de área de hoja. El punto 4.10 calcula la producción de materia seca. En el punto 4.11 se hace una interpolación en funciones para obtener los datos del tiempo atmosférico que necesita el programa y por último en el 4.12 tenemos el cálculo de la comprobación del balance de carbón, el cual nos indicará si existe alguna omisión de un término en alguna parte del programa.

En el capítulo 5 se dan ha conocer las modificaciones y ajustes del programa que se hicieron para el cultivo del maíz (híbrido HS-2) específicamente.

Por último tenemos los resultados donde podremos ver las comparaciones y las conclusiones a que se llegan.

PARTE I

Capítulo 1. Modelo SUCROS

SUCROS (Simple and Universal Crop Growth Simulator) es un modelo que describe el crecimiento del cultivo sobre la base de los procesos básicos, tal como asimilación de CO_2 y respiración, influenciada por las condiciones ambientales. La habilidad predictiva del modelo no siempre está al nivel de las expectaciones. Podría ser realizada, de otra forma, que cada parámetro de estimación y formulación de proceso tiene su propia inexactitud, y esos errores pueden acumularse en la predicción del rendimiento final. Por lo tanto, la predicción de rendimiento es una idea secundaria del modelo. Su idea primaria es incrementar la percepción en el sistema estudiado por integración cuantitativamente al presente conocimiento en un modelo de simulación dinámico. Para estudiar el comportamiento del modelo, lo mejor es la percepción en el sistema real (Goudriaan, 1994).

SUCROS simula el crecimiento potencial de un cultivo, *i.e.* su acumulación de materia seca bajo suficiente suministro de agua y nutrientes en un ambiente libre de plagas, enfermedades y malezas bajo condiciones dominantes del tiempo atmosférico.

El crecimiento del cultivo puede ser limitado por varios factores, tal como escasez de agua, o nutrientes, o reducido por plagas y enfermedades. Por esta razón, versiones de modelos diferentes han sido desarrollados para cubrir la situación actual (Goudriaan, 1994).

La razón de acumulación de materia seca es una función de la radiación, temperatura y características del cultivo. Las bases para el cálculo es la razón de asimilación de CO_2 (fotosíntesis) del dosel. Esa razón es dependiente de la energía radiante absorbida por el dosel, el cual es una función de la radiación entrante y el área de hoja del cultivo. De la radiación absorbida y las características fotosintéticas de las hojas individuales, la razón diaria de asimilación bruta de CO_2 del cultivo es calculada.

SUCROS originalmente está escrito en FST (FORTRAN Simulation Translator), un programa desarrollado por D. W. G. van Kraalingen & C. Rappoldt. El modelo podía ser ejecutado sobre computadoras VAX, IBM PC-AT's, o compatibles y con computadoras Apple-Macintosh. FST requiere, antes de iniciar el programa, una definición de las llamadas de subrutinas que son usadas en el programa. Todas las variables en las llamadas de subrutinas han sido definidas como

entradas o salidas de variables. Después de la definición de las llamadas de las subrutinas, el programa inicia con el TITLE del programa.

La descripción anterior del programa de simulación FORTRAN, es para dar una idea de las desventajas, que ahora en la actualidad implicaría el tener un programa en este lenguaje. En forma de resumen, podríamos enumerar las siguientes desventajas:

1. Poca amigabilidad del programa para interactuar y realizar cambios.
2. Incompatibilidad con las nuevas plataformas de software (trabaja sobre DOS).
3. Es difícil la interacción entre el programa FORTRAN y el mundo externo a la computadora.

En este trabajo de tesis, SUCROS está escrito en MatLab® - Simulink®. La justificación de ello es debido a que MatLab® es un programa de computación de matemática integrada, visualización, y un poderoso lenguaje para proveer un ambiente flexible para computación técnica. Simulink® es una herramienta interactiva para modelado, simulación, y análisis dinámico de sistemas multidominio. Permite construir diagramas de bloque, simular el comportamiento del sistema y su rendimiento, así como permitir interacción con el mundo externo de la computadora. El modelo puede ser ejecutado sobre cualquier modelo de computadora que soporte MatLab® ver. 6.0.

Una explicación amplia del programa de simulación SUCROS se encuentra en Goudriaan (1994), se explica con profundidad el porqué de cada una de las variables, así como el origen de cada ecuación. Para profundizar en el programa de simulación SUCROS, referimos al lector a la bibliografía citada. En este trabajo de tesis, se ha desarrollado una serie de ejercicios seleccionados de Goudriaan (1994), con la finalidad de que el lector pueda:

- tener antecedentes de los subprogramas,
- entender mejor el funcionamiento del programa SUCROS por etapas,
- tener una simulación en MatLab® de las soluciones.

Estos ejercicios están numerados de acuerdo a la sección que corresponden, y entre paréntesis hace mención al programa que se utilizó para encontrar la solución y la página de la tesis en que se encuentra. Al principio del enunciado de cada ejercicio se ha anotado el capitulo y número de ejercicio que corresponde a Goudriaan (1994).

Capítulo 2. Etapas del modelo SUCROS.

2.1 Modelo de crecimiento anual principal.

Dentro del ciclo de vida de cultivos anuales, tres fases de crecimiento pueden ser distinguidos: una fase exponencial, una fase de crecimiento total, y una fase de madurez y senescencia.

2.1.1 Fases de crecimiento.

Durante la primera fase de crecimiento, exponencial, mucho del espacio alrededor de las plantas no ha sido ocupado. No hay mutuo sombreo aún y la contribución de la nueva hoja es idéntica a las existentes. La razón de crecimiento relativo es constante.

Las hojas gradualmente iniciarán un sombreo unas a otras, y casi un LAI (índice de área de hoja) de 3 m^2 (hoja) m^{-2}(tierra). Ahora la fase de crecimiento exponencial ha pasado a la fase de crecimiento lineal.

La fase de crecimiento final, senescencia, inicia cuando la luz interceptada decrece otra vez.

2.1.2 Término por pérdida debido a la respiración por mantenimiento.

Es posible considerar separadamente la razón de crecimiento bruta, y la pérdida por respiración.

La formulación más simple y más frecuente usada por pérdida debido a la respiración de mantenimiento es un término proporcional a la cantidad de biomasa acumulada. El valor del coeficiente de mantenimiento específico (donde "específico" significa "masa-relacionada") es aproximadamente de 0.01 a 0.03 g g^{-1} d^{-1}.

A continuación se presentan los ejercicios de esta sección, estos ejercicios están numerados de acuerdo a la sección que corresponden, y entre paréntesis hace mención al programa que se utilizó para encontrar la solución y la página de la tesis en que se encuentra. Al principio del enunciado de cada ejercicio se ha anotado el número de ejercicio, la referencia bibliográfica y el número de página que corresponde a la solución en la referencia bibliográfica. Los ejercicios fueron hechos en ambiente Simulink®.

Ejercicio 2.1.1 (Programa 5.1, p. 122)

(Ejercicio 2.3, Goudriaan, 1994, p. 19, 20). Crecimiento exponencial puro (inicializado a W=10 g/m^2, y r_m=0.1 g/gd) y crecimiento lineal puro (intersectando el eje del tiempo (d) en $t=t_b$, razón igual para C_m). TIEMPOFINAL=155.

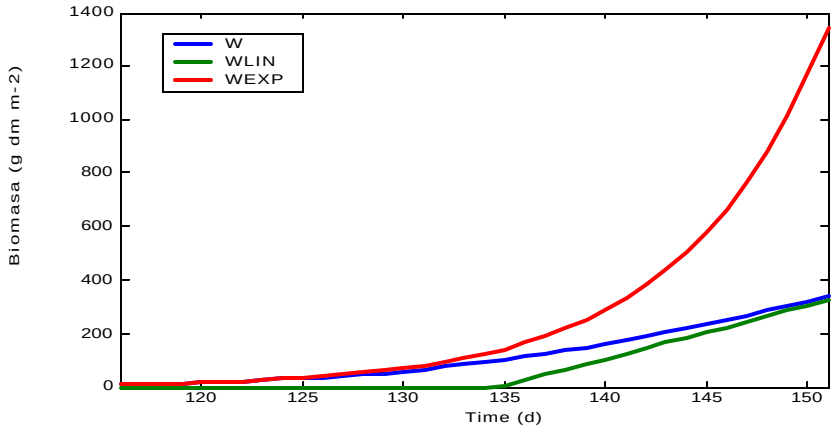


Figura 2.1.1. Biomasa simulada (g materia seca m^{-2}) como una función del tiempo, calculada acorde a la ecuación expolineal (W), acorde al crecimiento exponencial puro (WEXP), y acorde a el crecimiento lineal puro (WLIN).

Ejercicio 2.1.2 (Programa 5.2, p. 122)

(Ejercicio 2.5, Goudriaan, 1994, p. 21). Dibuje una grafica del índice de área de hoja (L, m^2_{hoja}/m^2_{tierra}) contra el tiempo con el valor especificado de los coeficientes y un área de hoja inicial (L_0) de 0.05. Haga uso del factor de la razón de crecimiento relativo (r_m, d^{-1}).

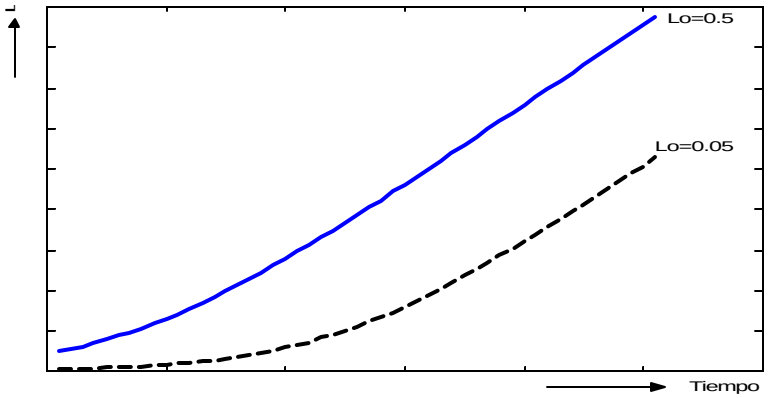


Figura 2.1.2. Grafica de L contra tiempo, donde L_o=0.5 Y L_o=0.05.

Por la manera de la Figura 2.1.2, la curva dibujada para L_o=0.5 es buena. El efecto es que la curva de crecimiento esta cambiando en el avance.

Ejercicio 2.1.3 (Programa 5.3, p. 123)

(Ejercicio 2.7, Goudriaan, 1994, p. 23). Graficar L contra W.

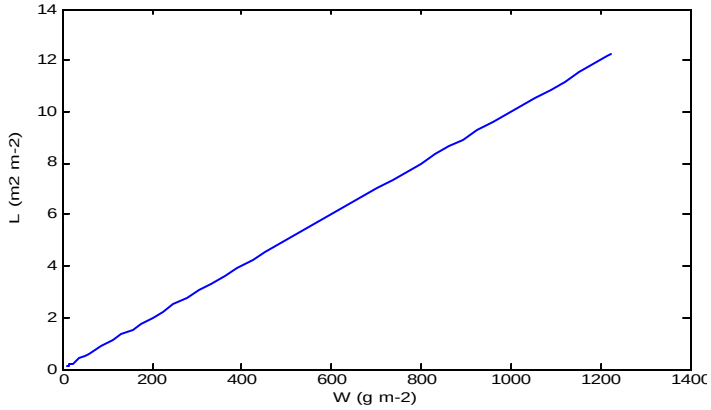


Figura 2.1.3. Gráfica de L(m^2/m^2) contra W(g/m^2) usando el modelo del Programa 5.3.

Ejercicio 2.1.4, (Programa 5.1, p. 122)

(Ejercicio 2.13, Goudriaan, 1994, p. 25, 26). b) Inicializar: IBIOM=1000, ILAI=0.1. Este gran valor inusual de biomasa con respecto al área de hoja ilustra la independencia de razones de crecimiento de biomasas en la formulación usada. Comparar el tiempo de cursos de BIOM y LAI con los de la primera corrida.

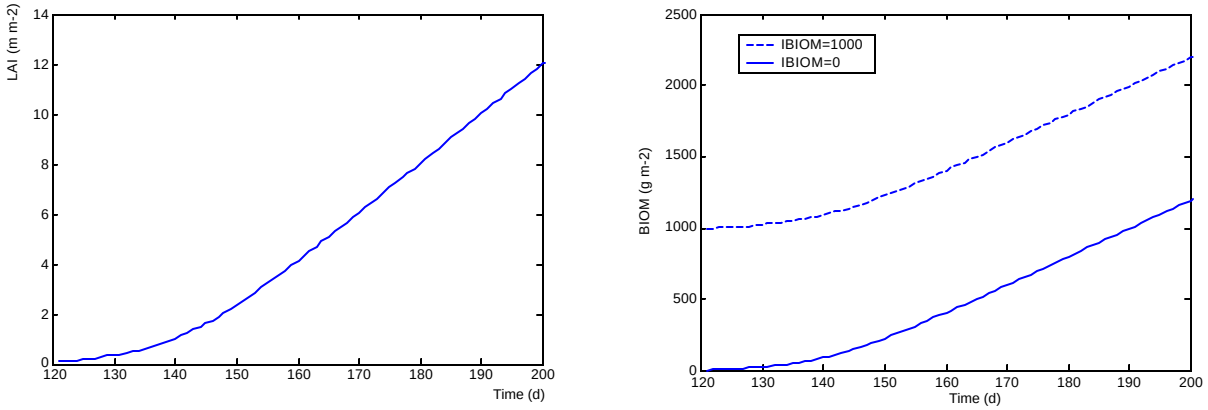


Figura 2.1.4. LAI tiene el mismo curso de tiempo como antes, pero la biomasa esta cambiando a un gran nivel.

c) Reinicie IBIOM en 10, y defina con la ecuación ILAI=LWR*SLA*IBIOM.
Haga recorridos con el área de hoja específica SLA=0.01, 0.02, Y 0.05, respectivamente.

Revisar los efectos de esos cambios en las fases lineal y exponencial.

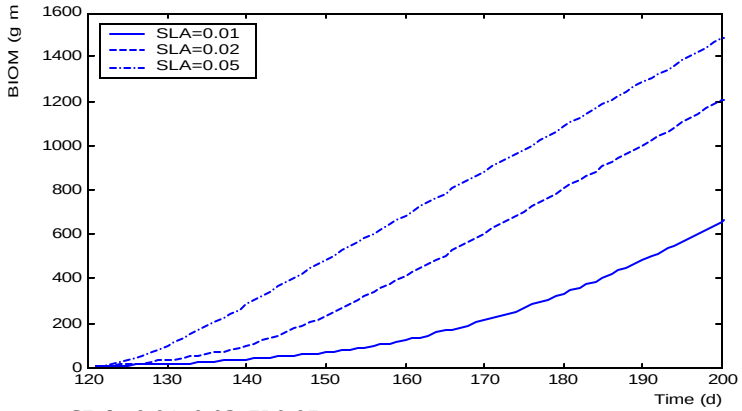


Figura 2.1.5. Corridas con SLA=0.01, 0.02, Y 0.05

d) Reinicie SLA fijado en 0.02 y hacer corridas con la razón de peso de hoja LWR=0.2, 0.5 y 1, respectivamente.

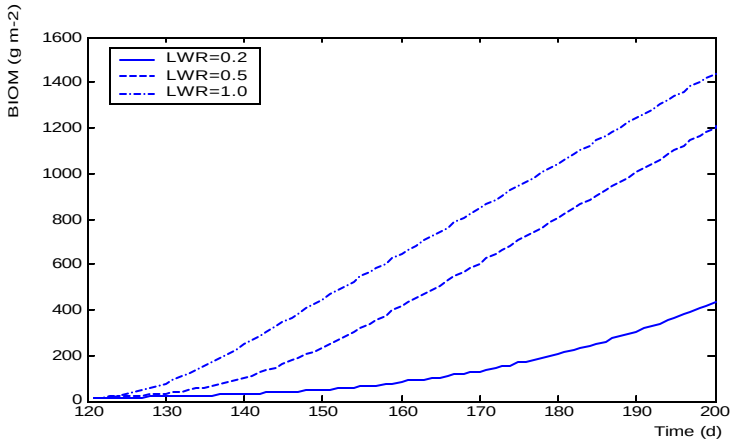


Figura 2.1.6. Corridas con LWR=0.2, 0.5 Y 1

Ejercicio 2.1.5, (Programa 5.4, p. 122)

(Ejercicio 2.14, Goudriaan, 1994, p. 26). b) Hacer corridas con el momento de madurez TR=150, 160, 190, y 250 (d), respectivamente.

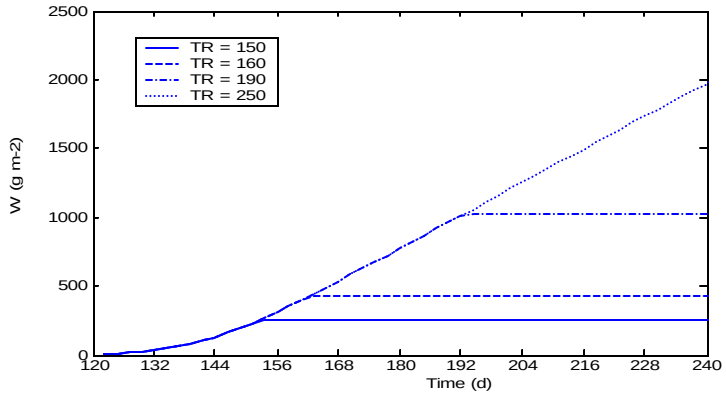


Figura 2.1.7. Corridas con TR=150, 160, 190, y 250

c) Hacer corridas con TR = 190, y la razón de crecimiento relativo RM = 0.05, 0.1, 0.14, Y 0.25 (d^{-1}) respectivamente. ¿Está W al final siempre igual a la razón de crecimiento máximo o potencial, CM*(TR-TB) [$g\ m^{-2}d^{-1}$]?

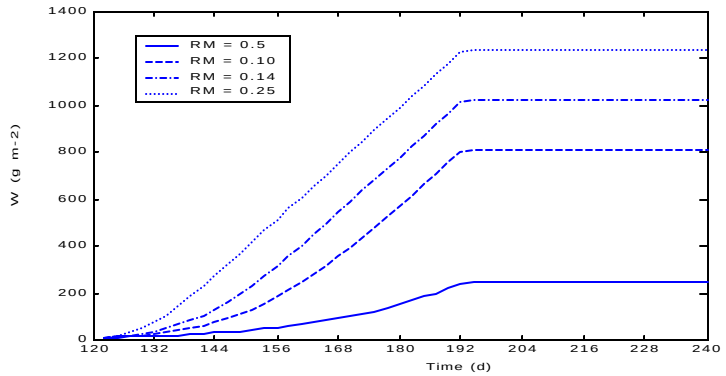


Figura 2.1.8. Corridas con TR = 190, y RM = 0.05, 0.1, 0.14, Y 0.25

W siempre será igual a CM*(TR-TB) porque TB es dependiente de RM.

2.2 Factores climáticos.

2.2.1 Progreso diario de la radiación global incidente.

La radiación global del sol (aproximadamente entre 350 y 2000 *nm* longitud de onda) incidente sobre la superficie de la tierra, es el producto de la radiación incidente fuera de la atmósfera y la transmitividad atmosférica, la cual obviamente depende de los grados de nubosidad.

2.2.1.1 Radiación difusa – directa.

La parte difusa de la radiación incidente viene de las nubes o del cielo azul, *i.e.* de muchas direcciones simultáneamente. La parte directa viene directamente de la dirección del sol. Este factor trivial es de mucha importancia para la distribución de luz en el dosel de la planta y, por tanto, la distribución entre radiación difusa y directa es importante. Cuando el cielo es claro, la fracción difusa es pequeña, y hay una gran diferencia en la intensidad de iluminación entre hojas iluminadas y sombreadas.

2.2.2 Temperatura.

El promedio del ciclo diario puede ser descrito razonablemente bien cuando la temperatura mínima y máxima es conocida. La exactitud con la cual esto debería ser hecho depende del propósito. Si requerimos una representación razonable de ambos, fase y forma, tendremos una progresión senoidal durante el día y una curva exponencial decreciente en la noche (Parton & Logan, 1981; van Engelen &Geurts, 1983). La transición de una curva a la siguiente, toma lugar al amanecer y al atardecer (temperatura mínima).

2.2.3 Humedad.

La humedad relativa (RH) como un porcentaje puede ser calculado como sigue:

$$RH = (e_a / e_s)*100$$

Donde e_a y e_s son la presión de vapor actual y la saturada (expresada en mbar o en Pa.), respectivamente. Si e_a es razonablemente estable y e_s se incrementa significativamente con la temperatura, la humedad relativa exhibe una depresión mínima a la mitad del día. Un segundo índice de humedad usado frecuentemente es el déficit de presión de vapor (VPD), expresado como sigue:

$$VPD = e_s - e_a$$

Esta índica la cantidad de presión de vapor que falta en el aire si queremos llevarlo al nivel de saturación.

2.2.4 Velocidad del viento.

La velocidad del viento también exhibe una progresión diaria. En la superficie de la tierra. En la superficie, la máxima velocidad del viento es alcanzada en forma general al momento de la máxima temperatura. Durante la noche la velocidad del viento es relativamente estable, y durante el día la progresión es casi senoidal.

2.2.5 Curso de la temperatura anual.

Conocemos la variación anual en la temperatura media del aire. Es algunas veces útil el conocer este ciclo anual en detalle.

Ejercicio 2.2.1 (Programa 5.5, p. 124)

(Ejercicio 3.6, Goudriaan, 1994, p. 44, 45). Realizar corridas para otras latitudes, e.g. para LATT=30, 0 Y –50. Sustituya en el modelo todas las latitudes por LATT, y haga LATT un parámetro. Observe la fase opuesta de la radiación potencial (RDPOT) y longitud del día en el hemisferio sur, y el pico bimodal en la radiación diaria en el ecuador.

Remover la salida para la radiación actual (RDACT).

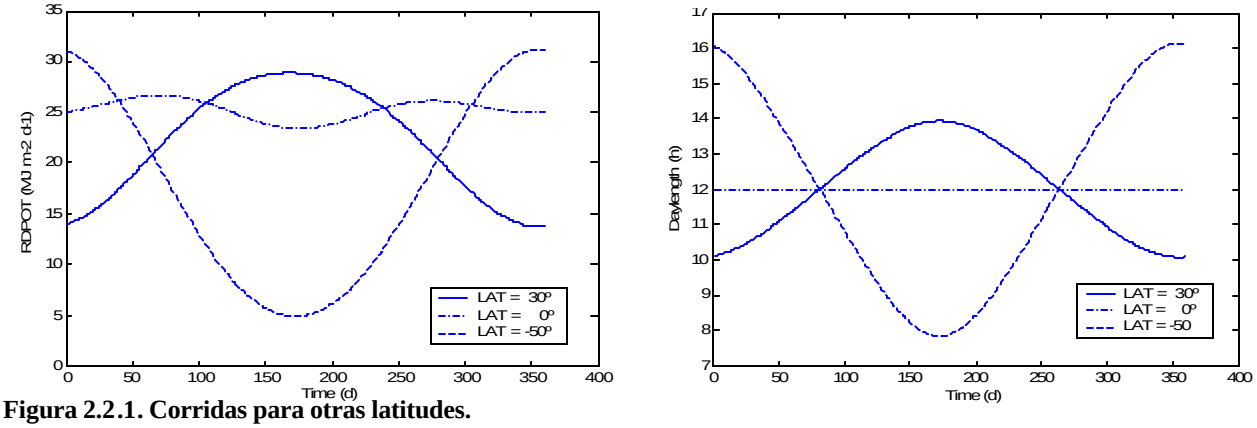


Figura 2.2.1. Corridas para otras latitudes.

Ejercicio 2.2.2, (Programa 5.6, p. 125)

(Ejercicio 3.7, Goudriaan, 1994, p. 45, 46). Curso de temperatura diurna.

a) ¿Para cual estación es este programa? ¿Son TMAX y TMIN razonables?

El tiempo de inicio de la simulación es puesto al día del año 151 (31 Mayo).

PARAMETROS TMAX = 25, TMIN = 10.

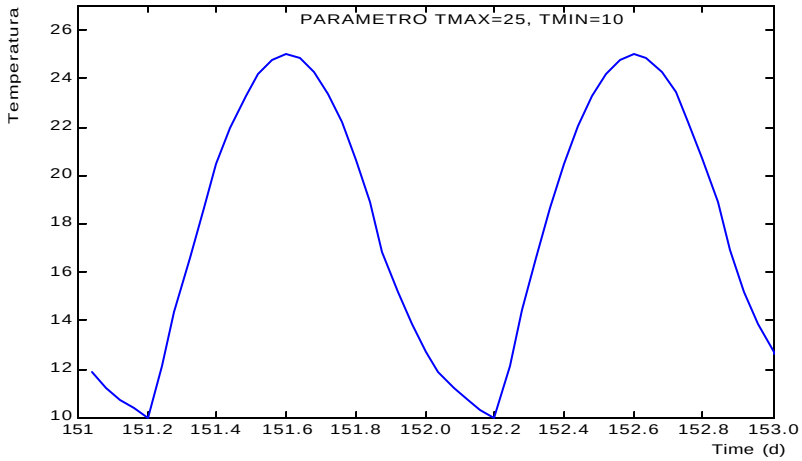


Figura 2.2.2. Curso de temperatura diurna para verano.

b) Haga un corrido con otra situación, tal como para el invierno (DAY=358) en vez de verano.
Adoptar TMIN y TMAX acordemente.

PARAMETRO TMAX = 5, TMIN = -2, TIEMPO INICIO = 358

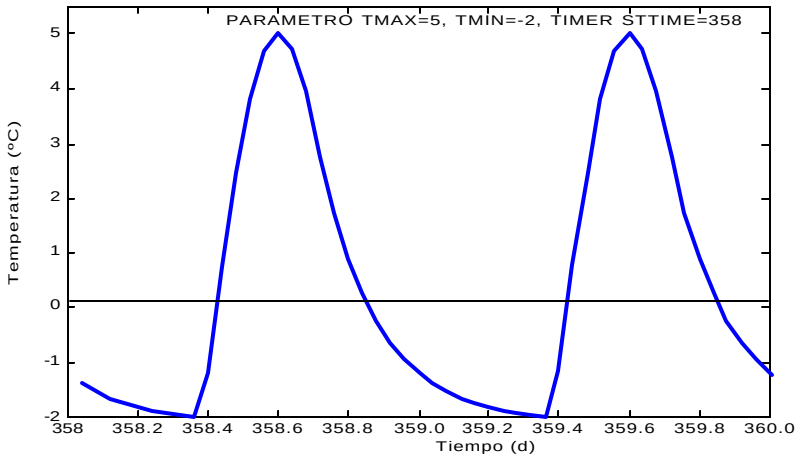


Figura 2.2.3. Curso de temperatura diurna para invierno.

2.3 Flujo de asimilados y respiración.

2.3.1 Crecimiento y respiración.

La respiración de crecimiento puede ser dividida en dos componentes. El primer componente sobre la necesidad de cubrir el requerimiento de energía para los procesos de conversión de ellos mismos, y el segundo componente es el resultado del rechazo de moléculas bioquímicas, los productos de la síntesis contienen carbón que resulta después de la formación de la materia estructural. La pérdida de peso combinado como un resultado de los procesos de pérdida de agua (condensación), y de pérdida de CO_2 (respiración de crecimiento) es aproximadamente 30% del promedio del material vegetativo. Para cubrir el costo de construcción y energía de un gramo de biomasa estructural, cerca de un 1.43 g de glucosa es requerido. Esta cantidad de glucosa contiene 0.4 * 1.43 = 0.572 g de carbón, del cual 0.45 g de carbón (45%) es construido dentro del material estructural. Por lo tanto, la diferencia ó 0.122 g C han desaparecido vía respiración por crecimiento en la forma de CO_2. El peso de este CO_2 respiratorio es de 44/12 * 0.122 ó 0.447 g CO_2.

2.3.2 Respiración por crecimiento y composición química.

Cada componente químico del tejido de la planta requiere una cantidad diferente de glucosa para su producción. La eficiencia del proceso de producción es prácticamente independiente de las condiciones ambientales, y únicamente depende de la naturaleza del componente actual formado. Lo mismo es verdad para la cantidad de CO_2 (respiración) formado y para el contenido de carbón eventual.

Si el requerimiento de glucosa para la formación del tejido en general será calculado, primero la proporción de los componentes en el material a ser formado deberá ser conocida.

2.3.3 Respiración por mantenimiento.

El mantenimiento es necesario para regenerar los componentes desintegrados. Aún la preservación del potencial eléctrico sobre las membranas de la célula requiere energía. Dado que las enzimas son las que principalmente se desintegran, y son ellas el material principal que contienen proteína, es razonable suponer que el coeficiente de mantenimiento es parcialmente relacionado a el contenido de proteína y, por lo tanto, también al contenido de nitrógeno.

Otra porción de la respiración por mantenimiento será conectada con la biomasa como un todo. La desintegración incrementa con la temperatura. Sobre un rango limitado de 5 a cerca de 30 °C la forma de la relación de la respiración con la temperatura es casi exponencial, lo cual significa que la respiración es incrementada por el mismo factor para un incremento de temperatura dado, irrespectivo del nivel de temperatura mismo.

Ejercicio 2.3.1 (Programa 5.7, p. 126)

(Ejercicio 4.5, Goudriaan, 1994, p. 63-65). Tabular la razón de crecimiento relativo del total de materia seca (RGR) como una función de temperatura (°C). Inicializar la biomasa (BIOM) a 10 gm^{-2}. También comparar el curso del tiempo de los niveles de asimilados.

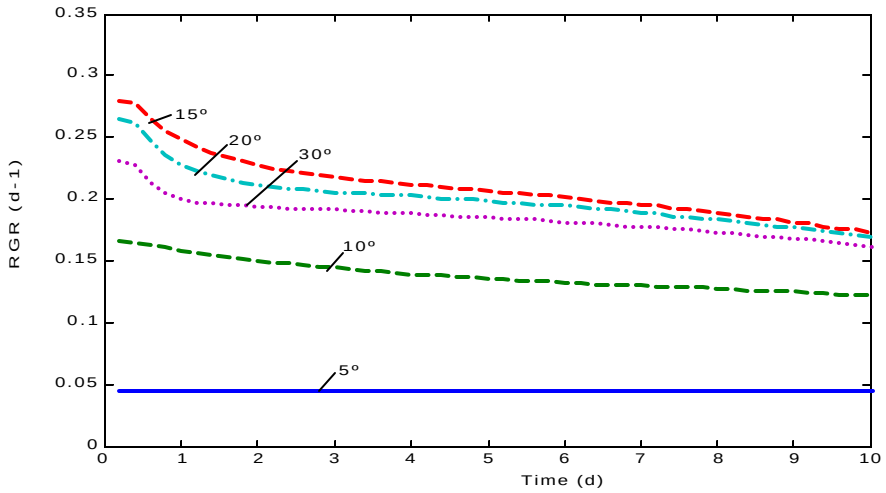


Figura 2.3.1. Razón de crecimiento relativo del total de materia seca (RGR) como una función de temperatura.

Ejercicio 2.3.2 (Programa 5.7, p. 126)

(Ejercicio 4.11, Goudriaan, 1994, p. 66, 67). Este modelo simula la cantidad de asimilado como un resultado del flujo de asimilación menos el consumo por crecimiento y mantenimiento. Cada factor que estimula consumo para una gran extensión en vez de asimilación causará la declinación de la cantidad de asimilado. La temperatura es como un factor. Hacer corridos con el modelo. ¿Cuál es la dependencia de la temperatura del valor inicial de la razón de crecimiento relativo RGR? (ver la salida en el tiempo cero). ¿Y cual es el valor para el fin de la corrida de la simulación? Una pregunta para el nivel de reserva RESL. ¿Que pasará si ponemos la temperatura (TA) a 5 ^{0}C?

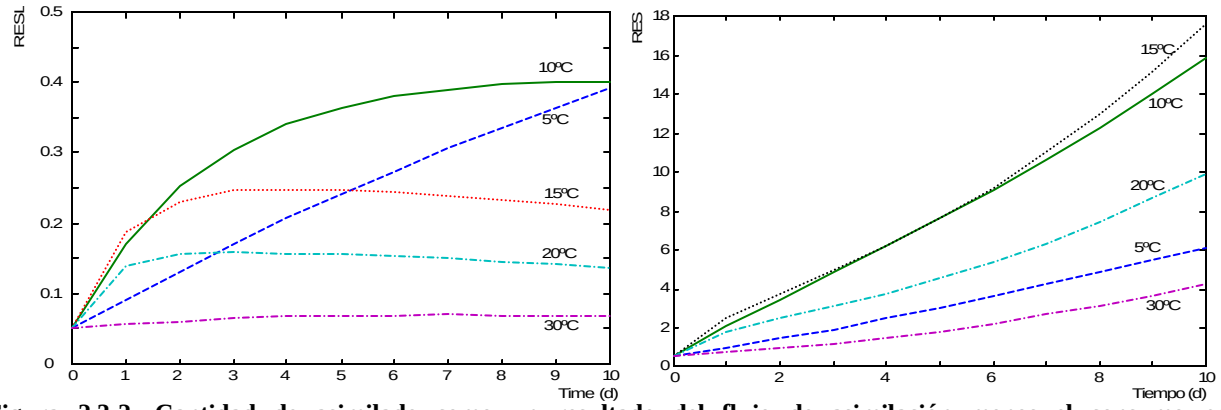


Figura 2.3.2. Cantidad de asimilado como un resultado del flujo de asimilación menos el consumo por crecimiento y mantenimiento.

b) Puede ser bueno que la asimilación sea reducida para altos niveles de reserva. En este programa, una retroalimentación podría ser introducida para disminuir el valor del factor de conversión de la radiación promedio, ARCF (g/J), por ejemplo, para reducir ARCF linealmente a 0 sobre el rango de 0.2 a 0.25 para RESL. Introducir una reducción haciendo una función de RESL. ¿Esto estabiliza el nivel de reserva?

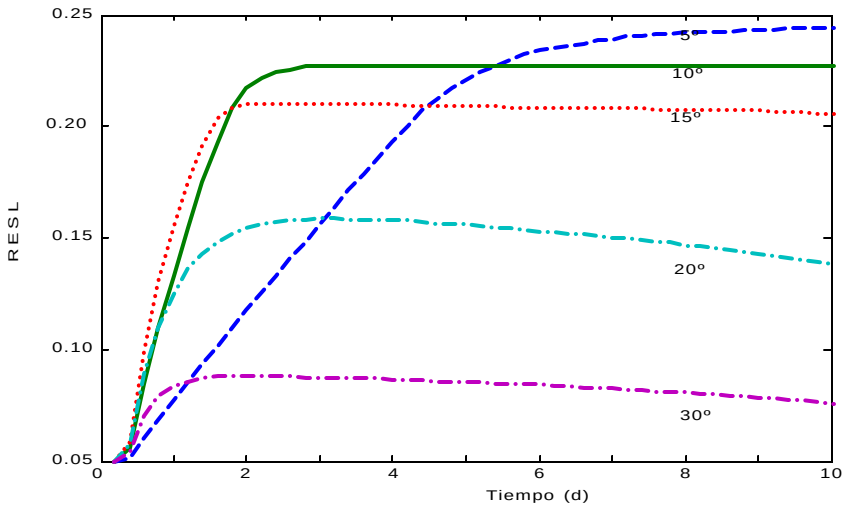


Figura 2.3.1. Retroalimentación introducida para disminuir el valor del factor de conversión de la radiación promedio.

2.4 Desarrollo y crecimiento.

El crecimiento puede ser definido en términos simple, tal como un incremento en peso o en altura, ambos de lo cual son variables que son fácilmente medidas.

2.4.1 Estados de desarrollo.

A fin de ser capaz de medir el desarrollo de la planta, las escalas de desarrollo han sido designado lo cual, sin embargo, son diferente para cada especie de planta. En Penning de Vries & van Laar (1982), el desarrollo inicia con el valor 0; la antesis alcanza el valor de 1 y en el estado de madurez el valor alcanzado es de 2.

2.4.2 Identificación del estado de desarrollo.

Básicamente existen 3 estados:

Estado 0; donde se da la emergencia de la planta.
Estado 1; esto es hasta antes de la antesis.
Estado2; cuando se alcanza la madurez fisiológica de la planta.

Para el caso del cultivo del maíz, la descripción de los estados de desarrollo se describe en detalle a continuación (Solórzano, 1994; Hanway, 1971).

Estado 0. La planta emerge del suelo. El embrión en la semilla tiene 5 hojas y las raíces primarias han sido iniciadas. Después de la siembra, las semillas absorben agua y la planta joven comienza a crecer. La radícula se alarga más rápidamente. Seguida por la plúmula (planta joven o vástago) y las raíces seminales. La radícula emerge de la parte terminal de la semilla, opuesta al vástago. Dos o cinco raíces, seminales emergen del extremo de la semilla cerca del vástago. Todas las raíces, excepto la radícula, tienden a crecer en un ángulo de 25 a 30 grados respecto a la horizontal. La radícula puede ser forzada en cualquier dirección (excepto hacia arriba) por orientación de la semilla.

El primer entrenudo elongado levanta la planta hacia la superficie del suelo. Cuando el ápice del coleoptilo emerge de la superficie del suelo hacia la luz, la elongación del primer entrenudo cesa y las hojas comienzan a emerger del coleoptilo. Bajo condiciones de calor y humedad, el ápice del coleoptilo emerge en 4 ó 5 días después de la siembra, pero bajo condiciones de frío o de sequía, pueden requerirse dos semanas o más.

En la emergencia, el punto de crecimiento de la planta y todos los nudos del tallo están a 1 – 1½ pulgadas debajo de la superficie del suelo.

Estado 1. Emergencia de los estigmas, antesis, 66 días después de la emergencia.

Las hojas y la espiga han emergido totalmente en dos o tres días. El alargamiento de los entrenudos del tallo ha cesado. El pedúnculo de la mazorca (asta) y las espatas casi han completado su crecimiento. El olote y los estigmas crecen rápidamente. Lo óvulos se agrandan. Los estigmas de los óvulos cercanos al ápice de la mazorca no han aún emergido. Todos los estigmas continuarán alargándose hasta que sean fertilizados.

Estado 2. Madurez fisiológica, 60 días después de la aparición de los estigmas.

La acumulación de materia seca ha cesado; pero el grano continuará perdiendo humedad después de esta etapa. Algunas hojas ya no están verdes.

En la Foto 9 vemos como la mayoría de las plantas ya están completamente floreando por lo que deducimos que el día 16 de agosto a los 77 días de la emergencia se da el estado 1 de la planta del maíz, 11días después de la recomendaciones de Hanway (1971), esto puede deberse a la variedad de la planta. Para el estado 2, la madurez fisiológica se da 60 días después de la aparición de los estigmas, esto se puede ver en la Foto 11 y en la Foto 12.

La emergencia hasta la floración (la pre–antesis, DVRV), y desde la floración hasta la madurez (la post – antesis, DVRR), es como se calcula en forma separada la razón de desarrollo. La temperatura es el principal factor climatológico que afecta la razón de desarrollo. De esta forma, DVRV y DVRR son definidos como funciones de temperatura diaria promedio (DAVTMP, °C).

El desarrollo es un proceso irreversible de cambio en el estado de un organismo, el cual generalmente progresa acorde a más o menos fijado y al modelo de especie específico.

Desarrollo y crecimiento son procesos diferentes. El crecimiento puede ocurrir sin algún progreso en el estado de desarrollo.

Para la determinación de los estados de desarrollo para otros cultivos, recomendamos al lector “Guías fenológicas para cultivos básicos, oleaginosas, sacaríferos, tubérculos y fibras” de Solórzano (1994).

2.4.3 Razón de desarrollo y factores ambientales.

2.4.3.1 Temperatura.

En general, es la temperatura la que tiene el más grande efecto sobre la razón de desarrollo, sin embargo, no es posible la medición directa de la razón de desarrollo.

La razón de desarrollo está relacionada linealmente a groso modo a la temperatura sobre un rango amplio.

2.4.3.2 Vernalización (requerimientos de baja temperatura).

En unas pocas especies, la vernalización es necesaria antes de la floración. El grado de vernalización controla la razón de desarrollo que eventualmente lleva a la floración.

2.4.3.3 Longitud del día.

La sensitividad a la longitud del día habilita a las plantas a sincronizar su desarrollo con el clima. Una gran diversidad en sensitividad a la longitud del día existe, no únicamente entre diferentes especies de plantas, sino también entre variedades de la misma especie.

La sensitividad a la longitud del día de la razón de desarrollo es particularmente importante durante el periodo de la emergencia a la inducción de la floración (en la práctica esto es el inicio de la elongación del tallo).

En la literatura, la sensitividad de la longitud del día absoluta y cuantitativa es distinguida, como plantas de día corto y largo.

2.4.4 Distribución de materia seca y estado de desarrollo.

2.4.4.1 Asignación de asimilados.

En este método, la temperatura tiene un efecto sobre la distribución de peso eventual vía la duración de los estados de desarrollo.

Un detalle importante es que el particionado es usualmente formulado en términos de crecimiento (aumento de peso seco estructural), y no en términos de asignación de asimilados. Esto es entendido porque los datos para el esquema son derivados de cosechas periódicas regulares. Los factores de particionado para el crecimiento y para los asimilados requeridos

correspondiente no son los mismos, debido a la composición química de los diferentes órganos.

2.4.5 Crecimiento de área de hoja.

Las hojas son los mejores órganos de fotosintetizado, y el cálculo de PAR interceptado está fuertemente basado en el área de la superficie. La correcta simulación de curso del tiempo de LAI es el primer requerimiento para la correcta simulación del crecimiento del cultivo como un todo.

Ejercicio 2.4.1 (Programa 5.8, Programa 5.9, p. 126, 126)

(Ejercicio 5.5, Goudriaan, 1994, p. 83-85). Usar VERN para dar el factor de multiplicación para la razón de desarrollo (DEVR). Simular el estado de desarrollo 1 a 5 en corridas donde la temperatura del aire (TA) se incrementa desde 4 a 10 ^{0}C. También mantener la pista de la suma de la temperatura normal (con T_b=2 ^{0}C).

Programa 5.8

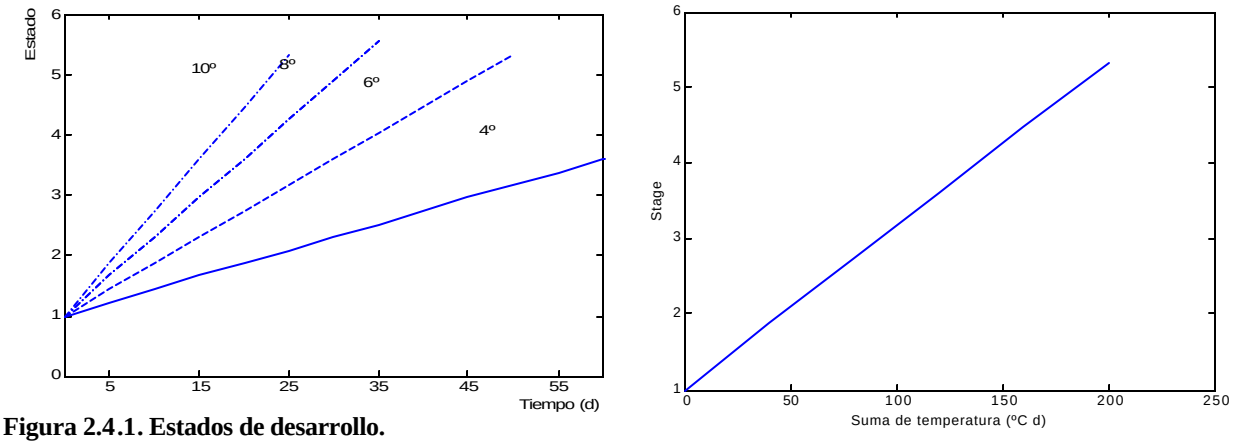


Figura 2.4.1. Estados de desarrollo.

Programa 5.9

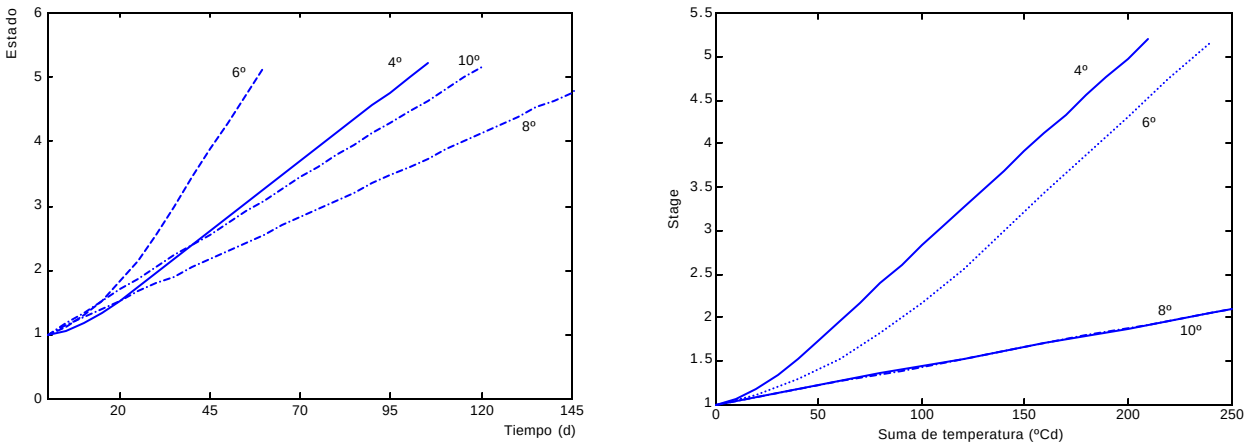


Figura 2.4.2. Estados de desarrollo a diferente temperatura.

La introducción de requerimientos de vernalización disturba el decremento monotónico en la duración del desarrollo con incremento de la temperatura.

Ejercicio 2.4.2 (Programa 5.10, Programa 5.11, p. 127, 127)

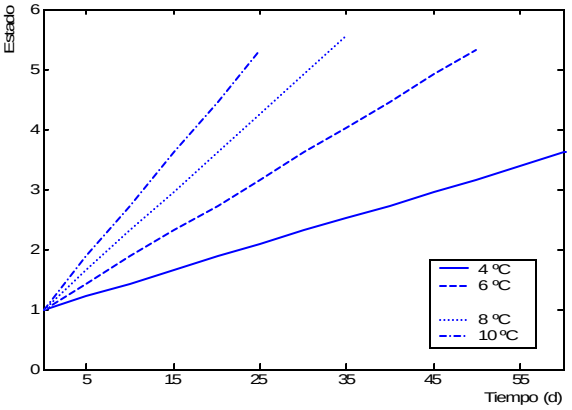
(Ejercicio 5.6, Goudriaan, 1994, p. 85-88). Repetir la simulación con un ritmo día/noche. Poner $TA_{day}=TA_{mean}+5$ y $TA_{night}=TA_{mean}-5$, ambos durante 12 horas. Comparar el resultado.

La fluctuación de la temperatura día/noche acelera la razón de desarrollo cuando la temperatura media no es alterada. Este efecto no es particularmente fuerte cuando la temperatura es cercana a la temperatura base para el desarrollo.

La excepción a esta regla (con vernalización, temperatura media 4º C) puede ser explicada por ambos, temperatura de día y noche, siendo afuera el rango aceptable para vernalización.

Sin vernalización.

Temperatura igual día/noche



Temperatura diferente día/noche

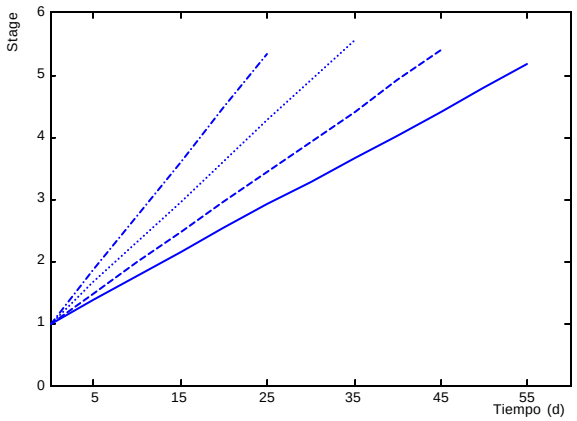
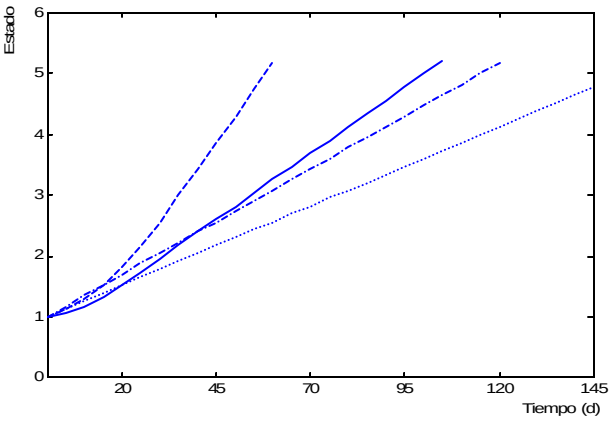


Figura 2.4.3. Estado de desarrollo a igual y diferente día/noche sin vernalización (Programa 5.8, Programa 5.10).

Con vernalización.

Temperatura igual día/noche



Temperatura diferente día/noche

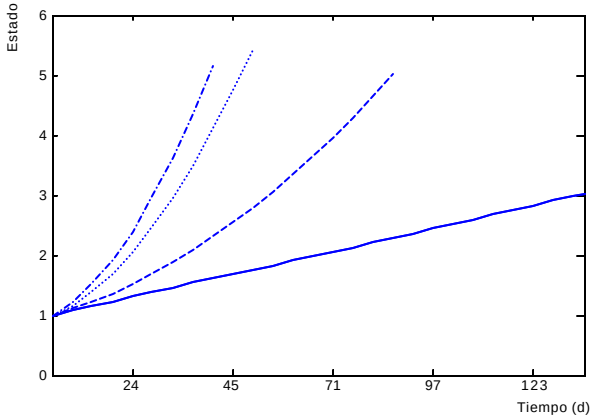


Figura 2.4.4. Estado de desarrollo a igual y diferente día/noche con vernalización (Programa 5.9, Programa 5.11).

Sin vernalización:

Temperatura día/noche igual. Temperatura día/noche diferente.

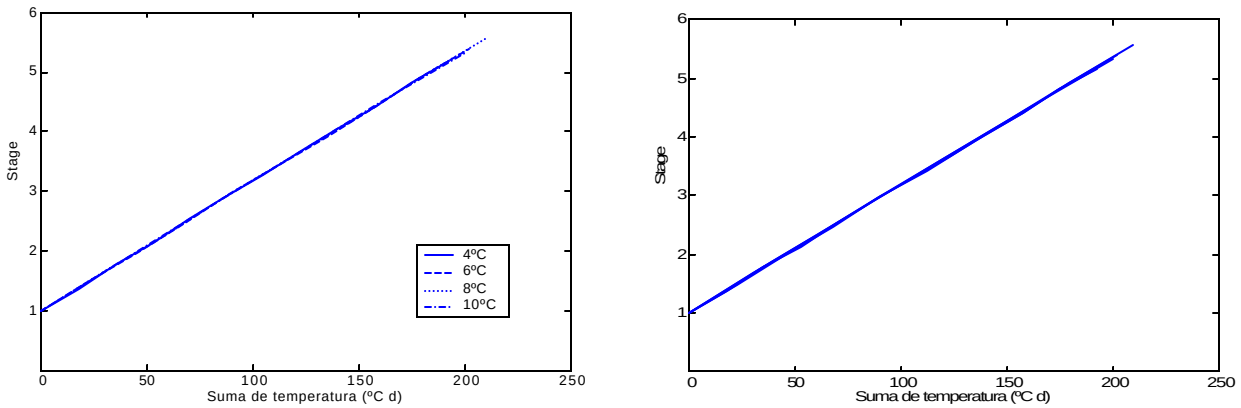


Figura 2.4.5. Estado de desarrollo a igual y diferente día/noche sin vernalización (Programa 5.8, Programa 5.10).

Con vernalización:

Temperatura día/noche igual Temperatura día/noche diferente

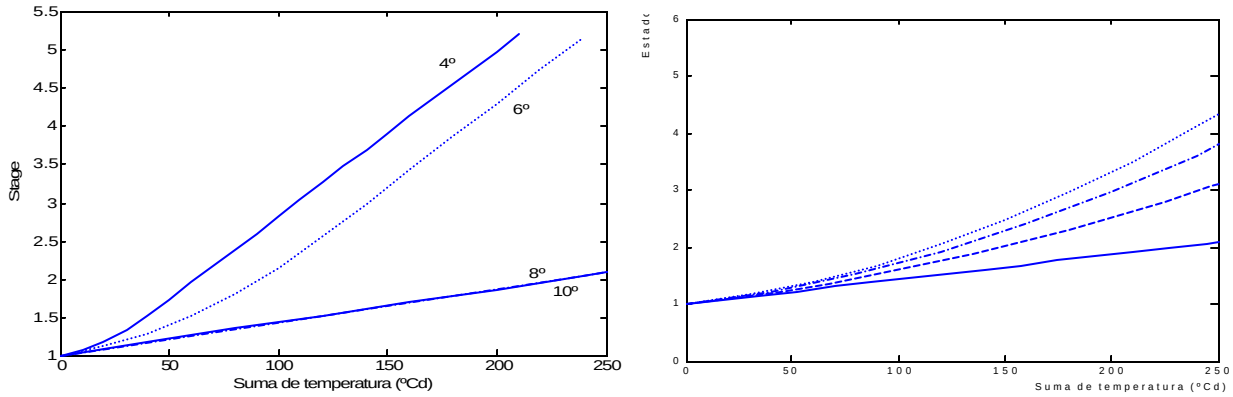


Figura 2.4.6. Estado de desarrollo a igual y diferente día/noche con vernalización (Programa 5.10, Programa 5.11).

Ejercicio 2.4.3 (Programa 5.12, p. 128)

(Ejercicio 5.7, Goudriaan, 1994, p. 88, 89). En el Programa 5.11, seguimos el desarrollo hasta el estado 15. Dependiendo del estado, una razón de desarrollo diferente es elegida. Hacer un corrido con diferentes tiempos de inicio de simulación. 245 (Emergencia al final de Agosto) y 275 (Fin de Septiembre). ¿Cuan grande es la diferencia resultante en el tiempo de maduración (estado 15). Graficar estado contra tiempo.

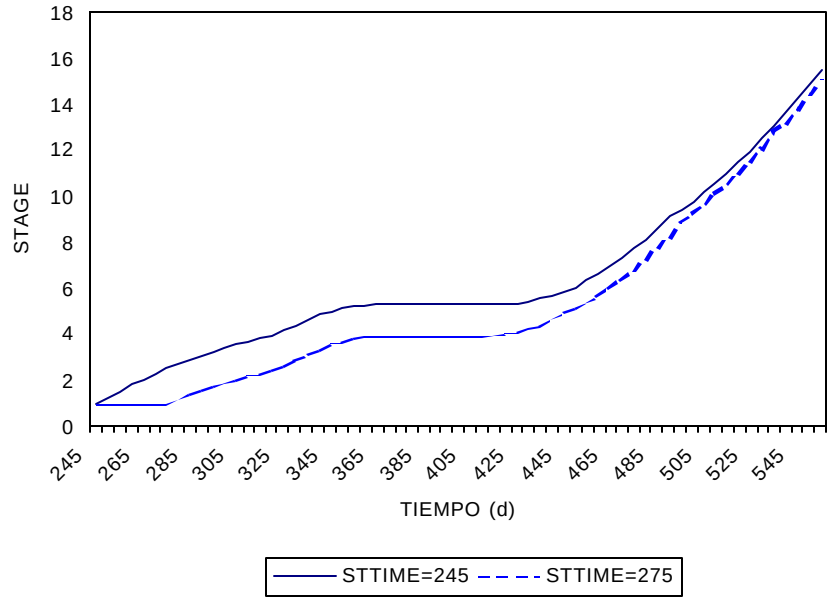


Figura 2.4.7. Gráfica de emergencia

La emergencia al final de Septiembre resulta en una maduración de 3 días después.

Ejercicio 2.4.4 (Programa 5.13, p. 129)

(Ejercicio 5.8, Goudriaan, 1994, 90, 91). Usar la subrutina TEMP para simular la longitud del día (ver Programa 5.13) y agregue cambios en fecha de emergencia sobre la fecha de floración y madurez para la simulaciones con y sin la influencia fotoperíodica.

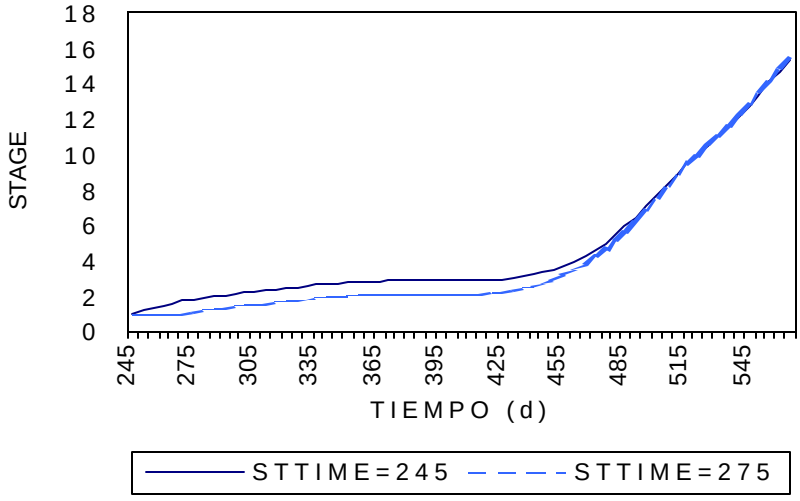


Figura 2.4.8. Gráfica de la emergencia con y sin la influencia fotoperiódica.

Ejercicio 2.4.5 (Programa 5.14, p. 130)

(Ejercicio 5.9, Goudriaan, 1994, p. 91, 92). Hacer ahora del área de hoja específica de hojas nuevas (SLANEW, m^2g^{-1}) una función variable de LAI, de la siguiente forma:

SLANEW = INTERPOLAR(SLATB, LAI)
FUNCIÓN SLATB = 0., 0.02, 5., 0.04, 100,0.04

Es necesario introducir pesos de hojas WLV como un nuevo estado variable, para el cálculo de SLA. Dar SLA como una salida del modelo. Hacer gráficas de TIME-LAI, TIME-SLA y BIOM-SLA.

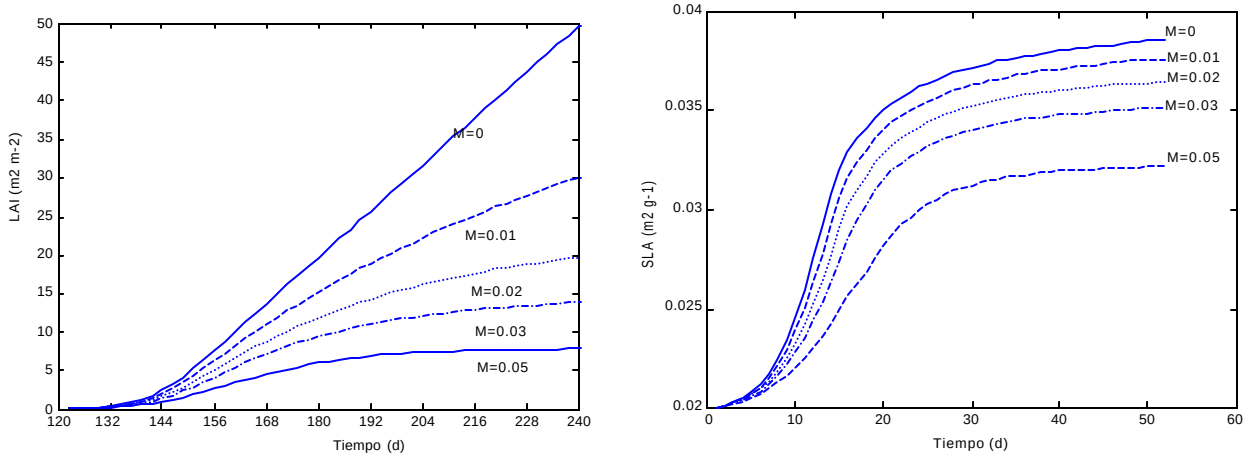


Figura 2.4.9. Gráficas de TIME-LAI y TIME-SLA

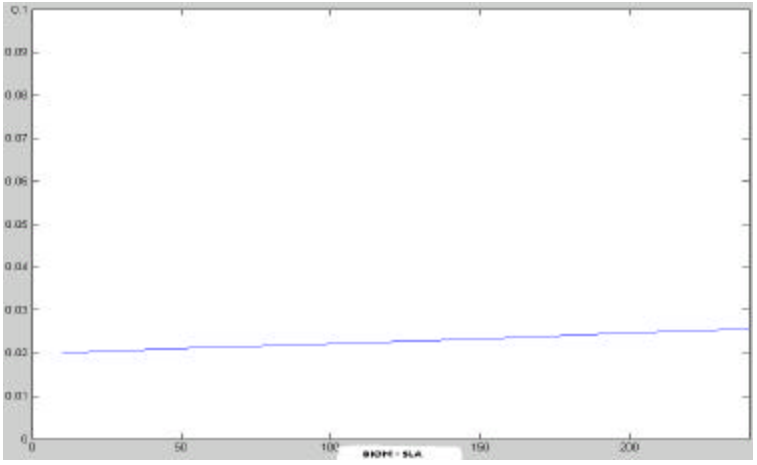


Figura 2.4.10. Gráficas de BIOM-SLA.

2.5 Radiación en cultivos.

2.5.1 Modelo de cultivo con hojas horizontales negras.

El área de proyección de una hoja horizontal sobre la superficie del suelo (el cual también es considerado horizontal) es siempre igual a su propia superficie, como quiera que sea la dirección de la proyección. Una delgada capa de hoja horizontal no traslapada con un área de ΔL m^2 de hoja por m^2 de área de tierra, por lo tanto, también intercepta una fracción ΔL de la radiación entrante.

2.5.2 Hojas negras que no están horizontales.

En esta situación, el área de la sombra que se proyecta sobre la superficie del suelo, generalmente no será igual al área de la superficie de la hoja misma. Esto significa que la fracción de radiación interceptada por una capa con área de hoja ΔL no será igual de grande de ΔL misma, pero si será proporcional a ella. Este factor de proporcionalidad, depende de la dirección de la radiación y de la orientación de las hojas.

2.5.3 Hojas horizontales que no son negras.

Cuando las hojas no son negras, algo de la radiación será transmitida y agregada al flujo descendiente. Podemos por lo tanto, esperar que la radiación penetrará más profundamente, y que el coeficiente de extinción será menor que 1, el cual es el valor para las hojas negras. En suma, algo de la radiación será dispersada en la dirección ascendente, el cual dejará el dosel como radiación reflejada. Por lo tanto, ambos, flujo descendente y flujo ascendente pueden también ser introducido.

2.5.4 Distribución de absorción de luz sobre el dosel de la hoja.

Como una primera aproximación, la razón de crecimiento puede ser estimado como radiación absorbida. Sin embargo, el valor del factor de conversión de la radiación no es constante, sino depende de la distribución de la radiación sobre las hojas, debido a la no linealidad de la curva de respuesta de la fotosíntesis – luz.

2.5.4.1 Radiación difusa.

La vía de la distribución de la radiación sobre las hojas es importante, debido a que la curva de respuesta de la fotosíntesis – luz es no lineal. La distribución en la

profundidad (expresada en área de hoja acumulativa) es prácticamente exponencial.

2.5.4.2 Radiación directa.

Cuando parte de la radiación entrante es directa no hay únicamente desigualdad de distribución en la profundidad, sino también en cada nivel, parte de la hoja entre luz y sombra. La fracción de área de hoja iluminada en cada nivel es igual a la fracción de luz directa a ese mismo nivel, debido a que se supone que la hoja no tiene preferencia por una posición de luz ó sombra. La extinción de la luz directa es únicamente determinada por intercepción; la luz difusa genera dispersión, no luz directa.

2.5.5 Agrupamiento.

El agrupamiento ocurre cuando las hojas son agrupadas juntas. Cuando esto sucede, las hojas se sombrean unas a otras, aún cuando las hojas son indicadas como un todo, puede ser todavía pequeños.

Ejercicio 2.5.1 (Programa 5.15, p. 131)

(Ejercicio 6.1, Goudriaan, 1994, p. 111, 112). Comparar los resultados de las ecuaciones de flujo descendente $\varphi_{\downarrow}=\varphi_{\downarrow 0}(1-\Delta L)^{L/\Delta L}$ (Wm^{-2}) y $\varphi_{\downarrow}=\varphi_{\downarrow 0}\exp(-L)$ para cuando ΔL tiende a cero (y el número de capas (n) llega a ser muy grande), cuando L=3 y ΔL=1, 0.5, 0.1 y 0.01, respectivamente. Suponer un valor de 100 para $\varphi_{\downarrow 0}$.

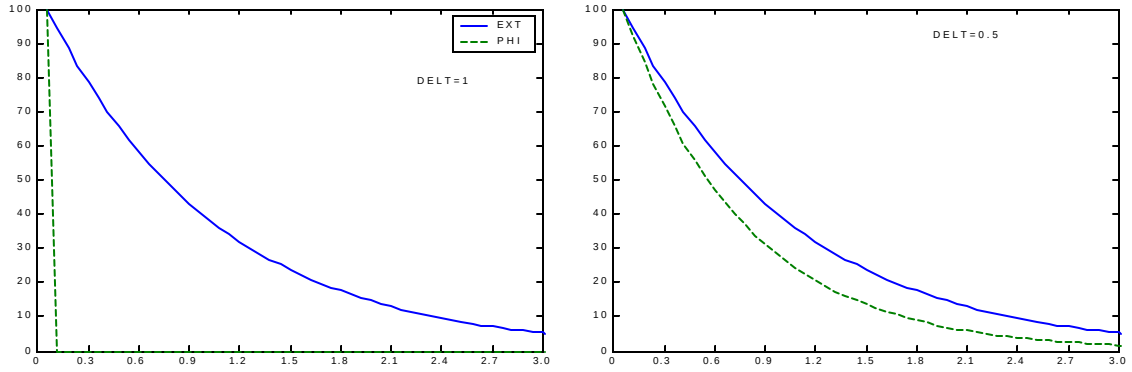


Figura 2.5.1. Comparación de flujos descendente para DELT=1 y 0.5.

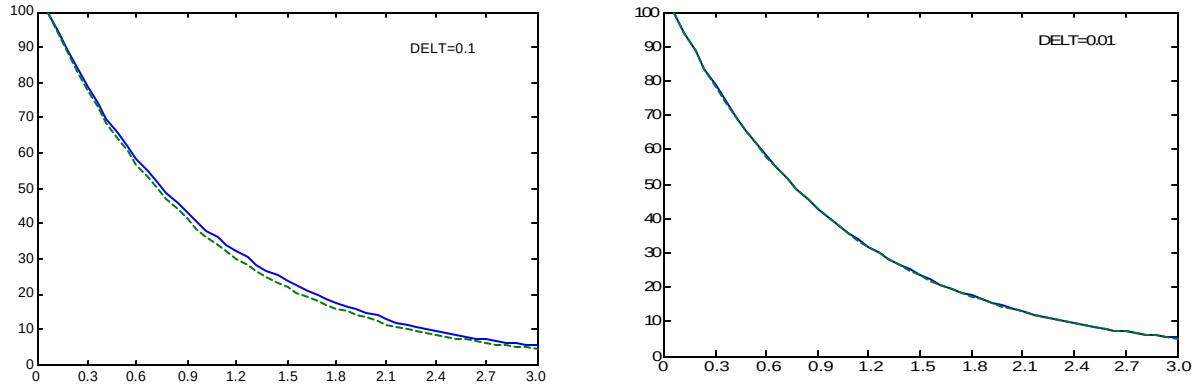


Figura 2.5.1. Comparación de flujos descendente DELT=0.1 y 0.01.

Ejercicio 2.5.2 (Programa 5.16, p. 131)

(Ejercicio 6.5, Goudriaan, 1994, p. 113). Para un mejor entendimiento del perfil de la radiación, es un buen ejercicio hacer una gráfica del perfil del dosel de los cuatro flujos, usados en las ecuaciones:

$\varphi\downarrow=\varphi\downarrow_{1.0}\exp(-K*L)+\varphi\downarrow_{2.0}\exp(+K*L)$ (Wm^{-2});

$\varphi\uparrow=\varphi\uparrow_{1.0}\exp(-K*L)+\varphi\uparrow_{2.0}\exp(+K*L)$ (Wm^{-2}).

Revisar la exactitud de las ecuaciones aproximadas.

Hacer esto para una hoja con LAI=2 y K=0.8, un coeficiente de reflección del dosel (ρ_c)=0.05, un coeficiente de reflección de suelo de 0.

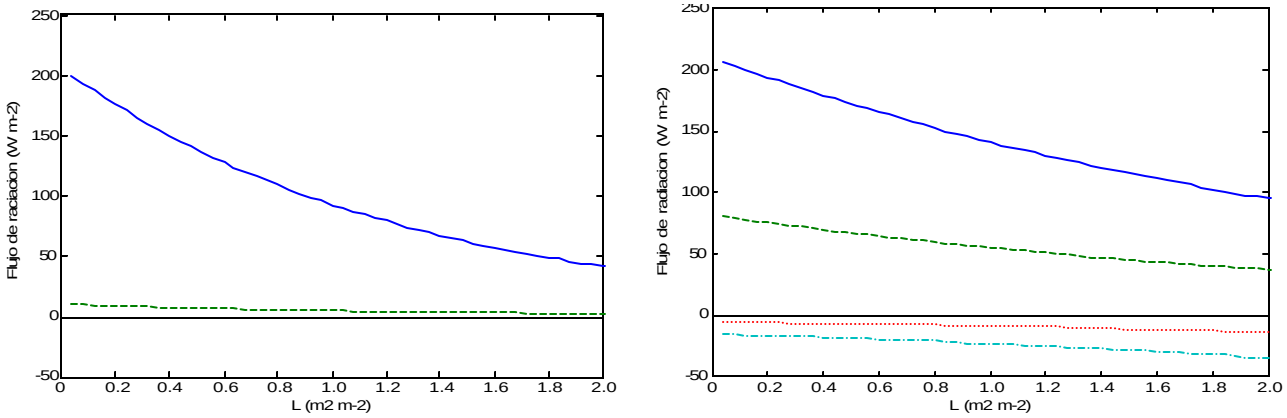


Figura 2.5.2. Perfil de la radiación.

b) Revisar la aproximación para el coeficiente de reflexión total del sistema dosel-suelo para esas dos situaciones. Hacer una gráfica del coeficiente de reflección para el dosel para el sistema suelo-dosel (ρ_{eff}) contra LAI para el rango de LAI desde 0 a 5.

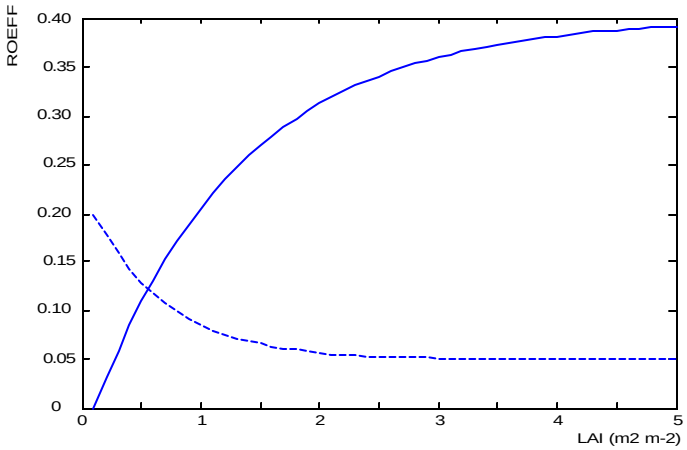


Figura 2.5.3. Gráfica de ROEFF contra LAI para el rango de LAI desde 0 a 5.

Ejercicio 2.5.3 (Programa 5.17, p. 132)

(Ejercicio 6.8, Goudriaan, 1994, p. 115-117). El Programa 5.17 dará la razón de asimilación del dosel para hojas horizontales. En SUCROS un modelo similar es usado, pero para una hoja de ángulo de distribución esférica, y el método de integración de cinco puntos.

a) Tratar diferentes valores de propiedades de hojas fotosintéticas tal como AMAX y EFF.
b) Graficar la asimilación del dosel contra LAI total para un PAR constante. Hacer LAI una función lineal de la variable independiente TIME.

FGROS en	AMAX(EFF=0.0125)			EFF (AMAX=1)		
($mgCO_2\ m^{-2}\ s^{-1}$)	0.5	1	1.5	0.0075	0.0125	0.0175
0 W m^{-2} PAR	0	0	0	0	0	0
100	0.6291	0.8318	0.9278	0.5696	0.8318	1.0330
200	0.8448	1.2583	1.5043	0.9388	1.2583	1.4708
300	0.9666	1.5137	1.8874	1.1912	1.5137	1.7191
400	1.0530	1.6896	2.1605	1.3740	1.6896	1.8918
500	1.1196	1.8239	2.3680	1.5137	1.8239	2.0258

Figura 2.5.4. Tabla con valores diferente para AMAX y EFF.

LAI m^2 m^{-2}	FGROS (mg CO_2 m^{-2} s^{-1}) a 100 W m^{-2} PAR
0	0
1	0.5149
2	0.7419
3	0.8318
4	0.8672
5	0.8827

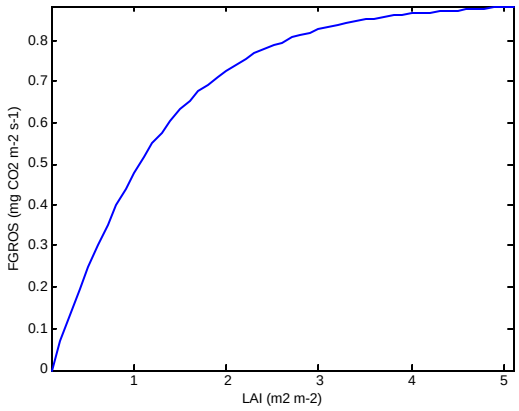


Figura 2.5.5. Gráfica de la asimilación del dosel vs LAI.

Ejercicio 2.5.4 (Programa 5.18, p. 134)

(Ejercicio 6.9, Goudriaan, 1994, p. 117, 118). El Programa 5.18 dará un perfil de la radiación para hojas negras horizontales. Escriba ahora la ecuación apropiada para la extinción de radiación visible y cercana infrarroja, usando coeficiente de dispersión con un valor de 0.2 y 0.8, respectivamente. Graficar ambos perfiles contra LAI simultáneamente.

Poner FINTIM a 5 y DEL=0.1.

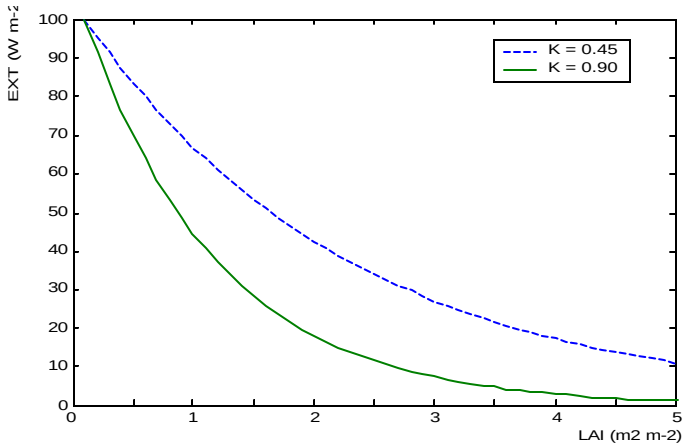


Figura 2.5.6. Perfil de la radiación para hojas negras horizontales.

2.6 Balance de energía y transpiración en hojas.

2.6.1 Balance de energía de una hoja que no transpira.

Primero, la alta simplificación de la situación de una hoja seca que no transpira es considerada. Aquí se supone que toda la energía de radiación absorbida es usada únicamente para calentamiento de hoja y aire. La radiación absorbida neta no únicamente consiste de radiación de onda corta absorbida, también contienen un componente de radiación térmica (ley de Boltzmanm). Este componente de radiación térmica depende de la temperatura de la hoja misma, ya que el componente de onda corta no.

2.6.2 Radiación térmica (onda larga).

La cantidad total de la radiación neta tiene un componente para radiación de onda corta neta y un componente para radiación de onda larga neta (3 – 20 μ). La radiación neta decrecerá cuando una hoja es calentada, debida a que la hoja misma emitirá más radiación térmica.

2.6.3 Evaporación de una superficie húmeda.

La razón entre incremento de humedad y decremento de temperatura puede ser determinado experimentalmente conduciendo un flujo de aire a través de algodón húmedo bajo prevención de intercambio de calor con el ambiente (adiabático).

2.6.4 Transpiración de hojas.

Para la resistencia de la capa límite, la epidermis ofrece una resistencia a la difusión de las moléculas de vapor de agua. La epidermis tiene una capa encerada, la cutícula, la cual prácticamente previene la evaporación. Esta resistencia es aún más grande para CO_2, y casi infinita. Para habilitar la asimilación de CO_2, la epidermis contiene aberturas reguladas activamente, estomas, que tienen una célula guardia en ambos lados.

Sin embargo, tan pronto como esos estomas abren para permitir la entrada de CO_2, la transpiración se lleva a cabo debido a que el interior de la hoja está saturado con vapor de agua.

Ejercicio 2.6.1 (Programa 5.19, p. 134)

(Ejercicio 7.8, Goudriaan, 1994, p. 138, 139). Haga esta simulación para una sola hoja horizontal por encima del dosel con $R_{a,shorwave\downarrow}$=200 Wm^{-2}, $B_{n,\ referencia\uparrow}$=80 Wm^{-2}, T_a=20 ºC, e_a=15 hPa, $r_{b,h}$=20 sm^{-1}, y r_1=0, 100 y 1000 sm^{-1}, respectivamente.

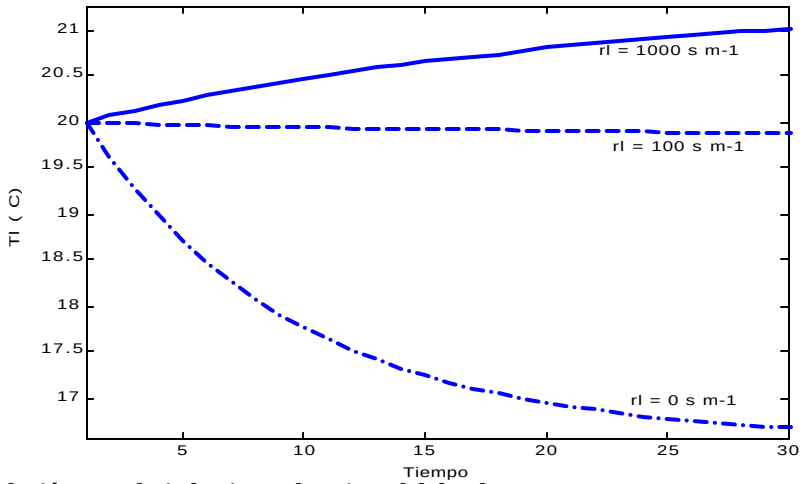


Figura 2.6.1. Simulación para hoja horizontal encima del dosel.

Ejercicio 2.6.2 (Programa 5.20, p. 135)

(Ejercicio 7.12, Goudriaan, 1994, p. 140-142). Generar una gráfica usando el Programa 5.20 ¿Corresponde la intersección con la solución de la combinación de la ecuación de Penman-Monteith? ¿Cuanto es la pérdida de calor latente reducido agregando la retroalimentación de la radiación termal?

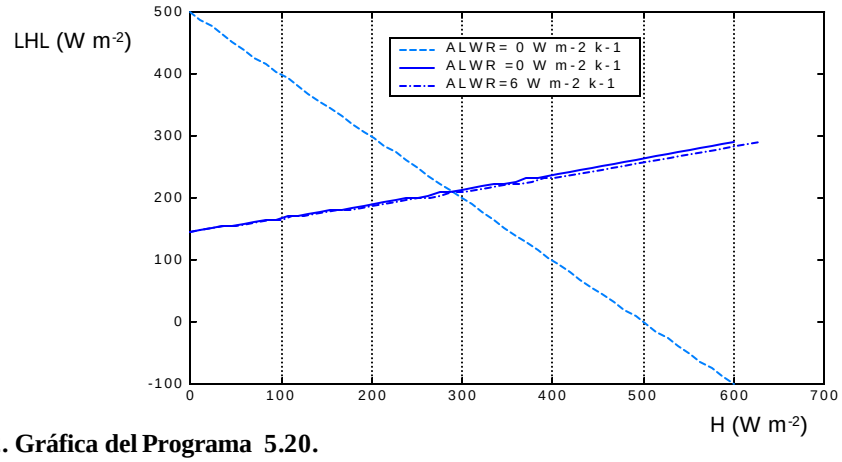


Figura 2.6.2. Gráfica del Programa 5.20.

Los subsecuentes puntos de datos en esta gráfica corresponden con la temperatura de la hoja incrementada en pasos de 1 ºC, de 20 a 25 ºC.

La intersección es localizada en λE=200 y H=300, para una temperatura de la hoja entre 22 y 23 ºC. La solución explícita para LEPENM es 205.86 W m^{-2}.

Ejercicio 2.6.3. (Programa 5.21, p. 136)

(Ejercicio 7.13, Goudriaan, 1994, p. 142). En el Programa 5.21, la temperatura de la hoja es igual a la temperatura del aire. Físicamente esta situación es poco inusual, pero podría ser forzada pegándole a la hoja un termostato. Note la gran razón de transpiración en RL=0 (hoja húmeda). ¿En cual valor de RL es LHL reducida a la mitad? Graficar LHL como una función de RL.

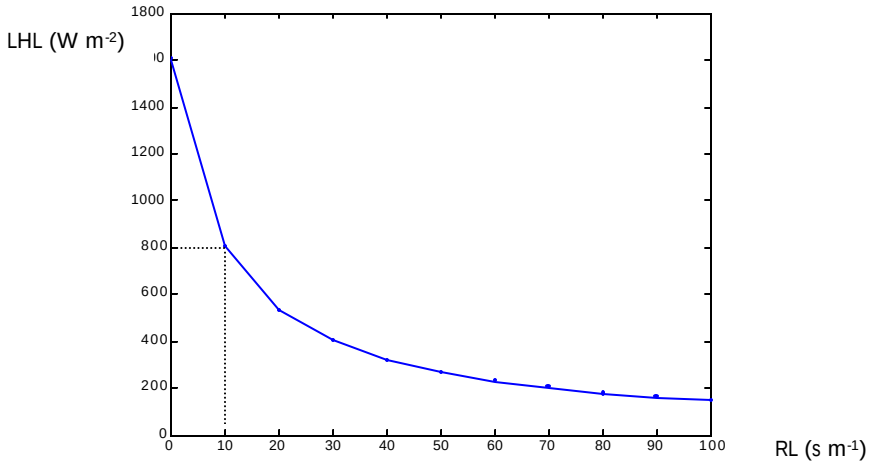


Figura 2.6.3. Gráfica de LHL como una función de RL.

LHL es reducida a la mitad en RL = 10 s m^{-1}.

Ejercicio 2.6.4 (Programa 5.22, p. 136)

(Ejercicio 7.14, Goudriaan, 1994, p. 143, 144). En el Programa 5.22, la temperatura de la hoja es permitida variar con el balance de energía, lo cual es la situación normal. Otra vez la razón de transpiración de la hoja es el más alto para RL=0 (hoja húmeda), pero ahora no es tan grande como en el modelo anterior. Observe la temperatura de la hoja para explicación.

¿En cual valor de RL es LHL reducida a la mitad? Graficar LHL como una función de RL. ¿Cual es la temperatura de la hoja al cual el valor de 172 y 173 son los mismos?

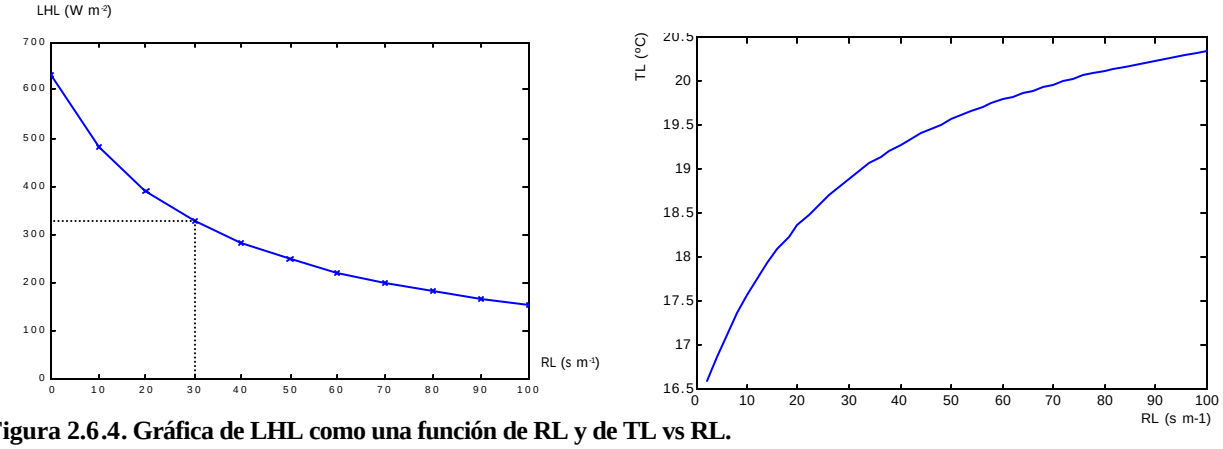


Figura 2.6.4. Gráfica de LHL como una función de RL y de TL vs RL.

La temperatura de la hoja donde ambas líneas para el Programa 5.21 y el Programa 5.22 se interceptan es igual a la temperatura del aire (20° C).

En RL = 30 s m-1, LHL es reducida a la mitad.

Ejercicio 2.6.5 (Programa 5.23, p. 137)

(Ejercicio 7.15, Goudriaan, 1994, p. 144, 145). En este modelo, la radiación termal es omitida, así como también el factor de la resistencia de la capa límite para el calor y vapor de agua son diferente por cerca de 7%. ¿Cual es el coeficiente del tiempo para la temperatura de la hoja?

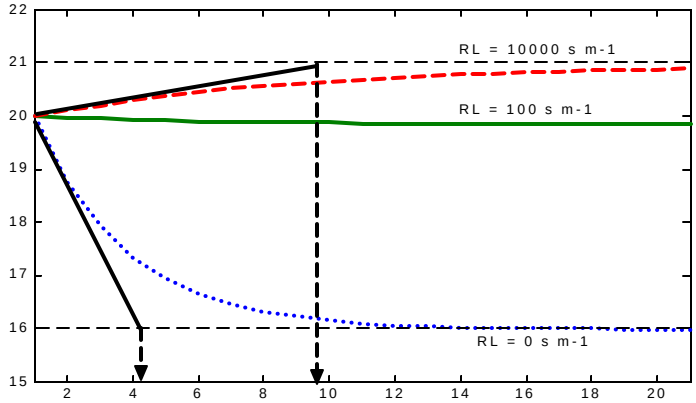


Figura 2.6.5. Gráfica de la temperatura de la hoja contra el tiempo.

TC = 10 s para RL = 1000
TC = 4 s para RL = 0
Estimar el valor del coeficiente del tiempo a ojo. El valor del coeficiente de tiempo incrementa como incrementa RL, debido a que el acoplamiento de la hoja a la pérdida de calor latente vía aire llega a ser pequeña. Para una hoja seca sola el cambio resulta en pérdida de calor vía sensible.

Ejercicio 2.6.6. (Programa 5.24 p. 138)

(Ejercicio 7.16, Goudriaan, 1994, p. 146, 147). La radiación térmica es agregada, así como la diferencia entre la resistencia de la capa límite para calor y vapor de agua. La constante psycrométrica ha sido puesta en 0.67. ¿Cuál es el efecto del mejoramiento de los modelos?

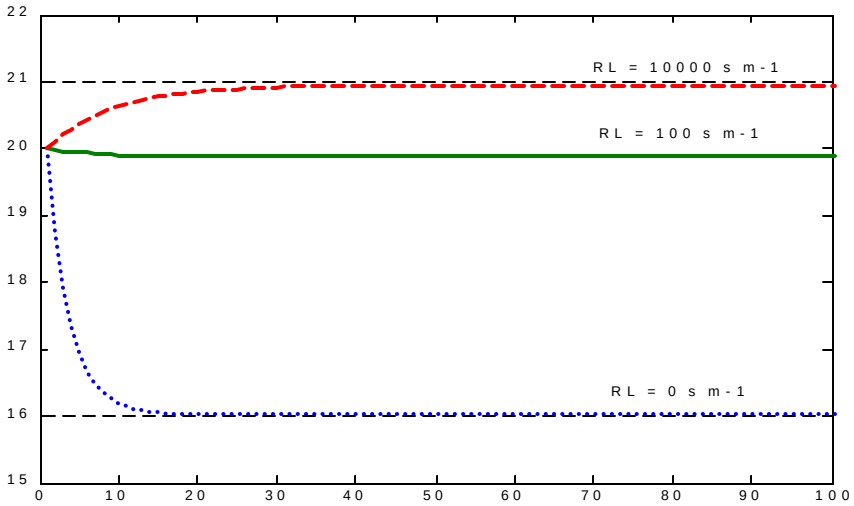


Figura 2.6.6. Gráfica del mejoramiento de los modelos.

Cuando la hoja es mucho más caliente que la temperatura del aire la pérdida adicional de radiación térmica reduce la pérdida de calor latente.

	LHL (W m^{-2})		
	RL = 0	RL = 100	RL = 10000.
Listado 7.5	603.08	141.18	1.88
Listado 7.6	620.94	134.96	1.75

2.7 Asimilación de CO_2 en hojas.

2.7.1 La curva de respuesta de la fotosíntesis – luz.

La curva de respuesta de la fotosíntesis – luz es una curva de pendiente hacia arriba, pero exhibe saturación con luz. La pendiente de la curva está al máximo a un nivel bajo de luz, y gradualmente decrece según el nivel de luz aumenta. Bajo luz alta, cuando la curva se aproxima a un nivel máximo, la razón de asimilación está determinada por factores diferentes a la luz.

2.7.2 El proceso de luz y oscuridad en la asimilación de CO_2.

Ambos procesos de luz y oscuridad ocurren con el cloroplasto, dentro del mesófilo. El cloroplasto contiene montones de membranas con clorofila, la membrana tilacoide. El proceso de luz consiste de la captura de fotones en la clorofila, y una creación de potencial eléctrico y gradiente pH a través de la membrana tilacoide. Esta energía es usada para producir energía química en la forma de ATP y NADPH el cual encuentra su camino desde la membrana tilacoide hasta el estroma, pero todavía dentro de los cloroplastos. Allí esa energía llevada es usada para convertir PGA en RubP, el cual es entonces "convertido" a CO_2 usando la enzima carboxilo Rubisco. Esta enzima por si misma hace arriba del 20 – 40 % de la proteína de la hoja, y es por lo tanto por mucho la más abundante proteína sobre la tierra. RubP tiene una cadena de 5 átomos de carbono, y después encadenándose al CO_2 cae aparte dentro de 2 moléculas de PGA y con 3 átomos de carbono cada uno. Con la regeneración de este PGA a RubP, el producto de glucosa y oxígeno son liberados, pero este proceso de regeneración requiere energía en la forma de ATP y NADPH. Esos procesos pueden ser arreglados para formar un proceso cíclico, el C_3 o ciclo de Calvin, produciendo glucosa del dióxido de carbón y agua.

A baja luz habrá una escasez de ATP, NADPH y RubP, y presumiblemente un sobrante de PGA. La razón de asimilación de CO_2 es entonces retardada por el déficit del RubP. A alta luz, por el otro lado hay suficiente RubP, pero la difusión del CO_2 desde afuera de la hoja al cloroplasto limitará la asimilación. También la concentración de la enzima carboxilo RubP (Rubisco) es una posible limitación. En ambos casos un incremento en la concentración del CO_2 en la atmósfera estimulará la razón de asimilación.

2.7.3 Limitación por bajo CO_2.

La limitación por falta de CO_2 ocurre a alta iluminación (suficiente ATP, NADPH y RubP) y CO_2 relativamente bajo. Esta situación puede ocurrir en invernaderos

bajo alta iluminación y sin la aplicación de enriquecimiento de CO_2, si no está suficientemente ventilado.

2.7.4 Limitación por baja iluminación.

La máxima eficiencia del uso de la luz es 1 molécula de CO_2 por 8 fotones, a través de un paso intermedio de 2 moléculas de NADPH y 3 moléculas de ATP.

Una importante pérdida es formada por la estructura no fotosintética que consume casi 35 % del total de la absorción.

2.7.5 Temperatura.

La temperatura afecta fuertemente la razón de respiración oscura y el punto de compensación del CO_2. Esto implica una influencia negativa sobre la razón de asimilación neta, pero debajo de los 25° C esa influencia negativa es compensada por un efecto positivo sobre la conductancia del mesófilo y sobre la capacidad máxima de la hoja.

Ejercicio 2.7.1 (Programa 5.26, p. 139)

(Ejercicio 8.7, Goudriaan, 1994, p. 163). Corra el Programa 5.26 e investigue el comportamiento de la fotosíntesis.
¿La posición de la temperatura óptima todavía depende de la luz o del nivel de CO_2? En el corrido al final lo que sigue son los parámetros o funciones que representa el comportamiento de C4. ¿Como responde la temperatura a la variación de Fn?

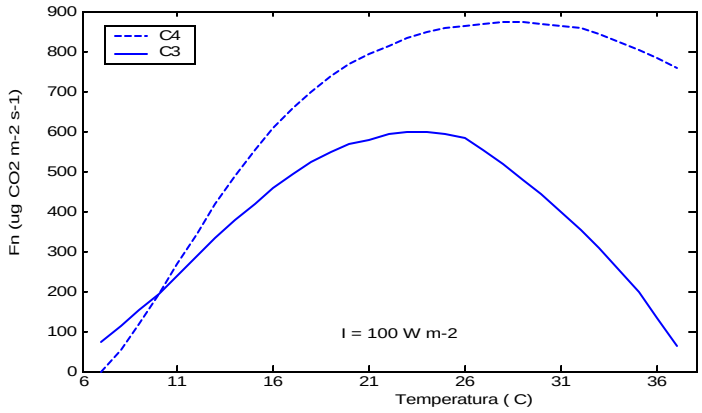


Figura 2.7.1. Comportamiento de la fotosíntesis.

Si, la temperatura óptima va con el nivel de radiación y también con la concentración de CO_2.

Ejercicio 2.7.2 (Programa 5.25, p. 139)

(Ejercicio 8.8, Goudriaan, 1994, p. 164). Corra el Programa 5.25. Este programa da una curva de respuesta a la luz simple para características fotosintéticas simples. Trate también un gran valor para FGMAX (por ejemplo 1E6).

Implemente esta curva tal como la hipérbola rectangular y la curva Blackman.

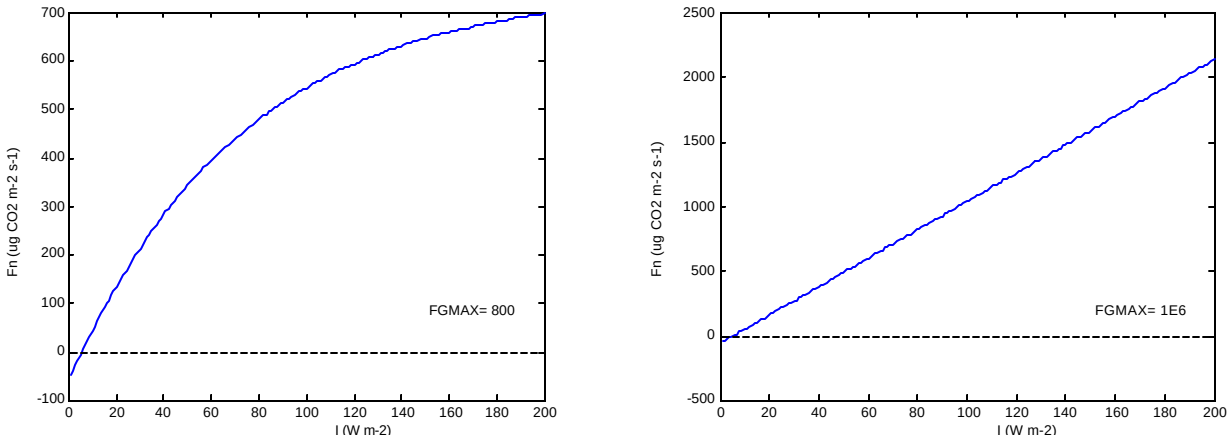


Figura 2.7.2. Respuesta a la luz simple para características fotosintéticas simples.

Ejercicio 2.7.3 (Programa 5.26, p. 139)

(Ejercicio 8.9, Goudriaan, 1994, p. 164-166). Corra el Programa 5.26. Este programa da una curva respuesta de temperatura para una intensidad de luz dada. ¿Cual es la temperatura óptima, y cual es la razón de asimilación?

Haga otra corrida para la oscuridad (I=0 Wm^{-2}) y para una alta intensidad de luz (I=300 Wm^{-2}). Corra para I=100 Wm^{-2}), y haga otra corrida para una alta concentración de CO_2, e.g. CO_2=1000 ppmv. Haga otra gráfica. ¿Cual es la temperatura óptima ahora?

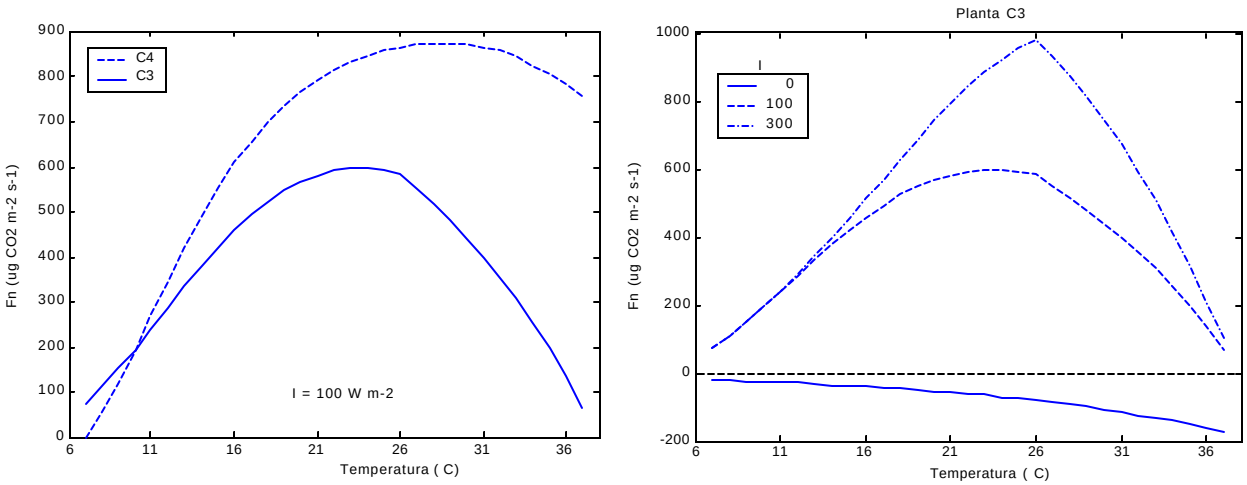


Figura 2.7.3. Respuesta de temperatura para una intensidad de luz dada.

Ejercicio 2.7.4 (Programa 5.27, p. 140)

(Ejercicio 8.10, Goudriaan, 1994, p. 166). Rescriba el Programa 5.24 en un programa que te dará la curva de respuesta de la luz en vez de la curva respuesta de la temperatura. Haga corridas para diferentes concentraciones de CO_2.

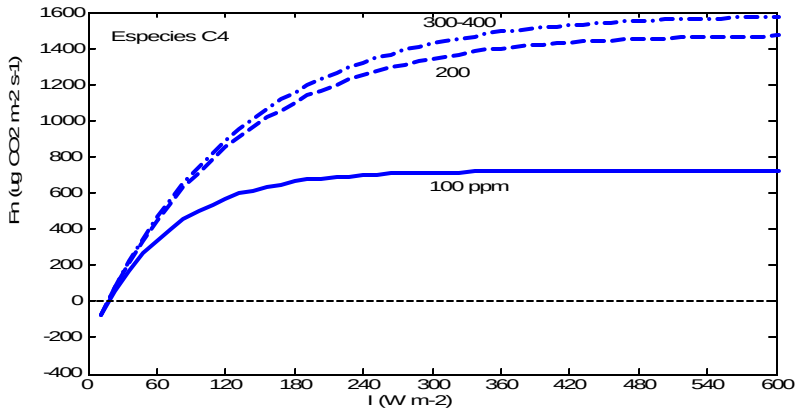


Figura 2.7.4. Gráfica que da la curva de respuesta de la luz.

Ejercicio 2.7.5 (Programa 5.28, p. 140)

(Ejercicio 8.11, Goudriaan, 1994, p. 167). Escriba ahora un programa que dará una curva respuesta de CO_2, sobre un rango de 0 a 1000 ppmv. Corra este programa para I=0, 10, 100 y 1000 Wm^{-2}. Encuentre la conductancia del mesófilo desde la salida.

Desde la pendiente a baja concentración de CO_2 puede estimar la resistencia del mesófilo. Tome en consideración que la resistencia a la capa límite y la resistencia estomatal son en series.

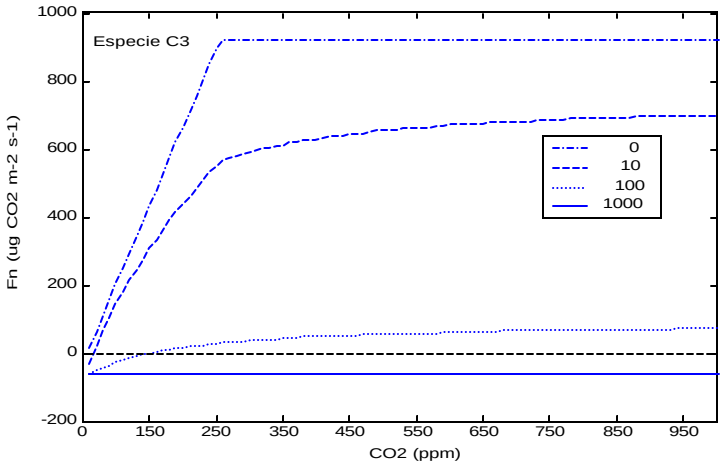


Figura 2.7.5. Gráfica de respuesta de CO_2.

PARTE II

Capítulo 3. Mediciones de campo.

Para poder llevar a cabo la adaptación del programa de simulación SUCROS al cultivo del maíz (híbrido HS-2), se realizó un experimento de campo. Con los datos obtenidos se realizan los cambios y adaptaciones necesarios al programa para que el programa SUCROS modele a un cultivo de maíz de la región de la Universidad Autónoma Chapingo (U.A.Chapingo).

En la U. A. Chapingo se llevó a cabo el experimento. Se localiza en el km 38.5 Carretera México – Veracruz, Texcoco, Edo. de México, a 19° 29' latitud norte.

Las razones por la cual se eligió este lugar para llevar a cabo el experimento son las siguientes:

- La U. A. Chapingo es un centro de estudios agrícolas.
- La U. A. Chapingo ampliamente interesada en las investigaciones relacionadas con la agricultura apoyó este experimento proporcionando la semilla, terreno, maquinaria, estudio del suelo, riego, fertilizante y personal para realizar las labores agrícolas.
- En el mismo terreno del experimento se encuentra una estación meteorológica automatizada, la cual nos proporciono los datos del tiempo atmosférico, así como de la radiación solar.

El cultivo sembrado en el experimento, fue maíz (híbrido HS-2) . Se sembró el 20 de Mayo del 2001, teniendo su emergencia el día 30 de Mayo.

3.1 Actividades para las mediciones de campo.

Las mediciones de campo que se llevaron a cabo se hicieron en dos partes:

1) Selección de cuatro plantas muestras para:
    a) Llevar registro de longitud de tallo.
    b) Llevar registro de número de hojas.

2) Corte al ras del suelo de cuatro plantas, la selección se realizó en forma aleatoria, esto se hizo dos veces por semana para obtener registro de:
    a) Peso fresco.
    b) Peso seco.
    c) Área de hoja.
    d) Estado (interno) fenológico de la planta.

3.1.1 Determinación de peso fresco.

Las plantas obtenidas en forma aleatoria cortadas al ras del suelo se separaran en partes (desmenuzamiento) y se pesa la planta completa y por partes (hojas, tallos, órganos de almacenamiento).

3.1.2 Determinación de peso seco.

Después del pesado en fresco se mete la planta en bolsas de papel. Las cuales previamente se le hicieron agujeros con la finalidad de dejar pasar el aire caliente y permitir la salida de la humedad. Posteriormente las plantas se dejan en un horno de secado a una temperatura de 65° C por un tiempo de 24 horas. Pasado este tiempo se retira del horno y se pesa.

3.1.3 Determinación de área de hoja.

Para la medición del área de hoja se siguió el procedimiento que a continuación se describe:

a) Se dibuja el contorno de la hoja en papel.
b) Recortar la hoja por el contorno dibujado.
c) Se pesa la hoja de papel.
d) Se recorta una superficie de 4 cm^2 en el papel donde se dibuja la hoja; y se pesa.
e) Se obtiene el área por medio de una regla de tres.

3.1.4 Determinación de las etapas fenológicas de la planta.

Para llevar a cabo la determinación de las etapas fenológicas de la planta de maíz, se tomaron fotos del cultivo en su totalidad y también de las plantas en forma individual, completa y desmenuzada. De esta forma se observa como se va dando el crecimiento y el desarrollo de la planta tanto externa como internamente.

Las mediciones se estuvieron haciendo hasta la madurez fisiológica del maíz, esto hasta el 15 de Octubre del 2001.

De esta forma tenemos el desarrollo cronológico de manera visual, que se muestra a continuación:

Foto 1. Preparación de la tierra. Se voltea la tierra y se hacen los surcos (18 de Mayo del 2001).

La preparación de la tierra consiste en barbecho y rastra, estas actividades mullen y fragmenta a la tierra, para después hacer el surcado.

Foto 2. Después del sembrado se realiza el primer riego (22 de Mayo del 2001).

El riego se realiza por gravedad y proporciona el agua necesaria para motivar a la semilla a emerger.

Foto 3. Etapa 0. Emergencia de la planta al día 30 de Mayo del 2001.

En esta foto se muestra la planta de maíz en la emergencia, puede observarse que el suelo parece reseco, pero por debajo sigue estando presente la humedad que necesita la planta.

Foto 4. Planta de maíz (híbrido HS -2) al mes de ser sembrada (28 de Junio del 2001).

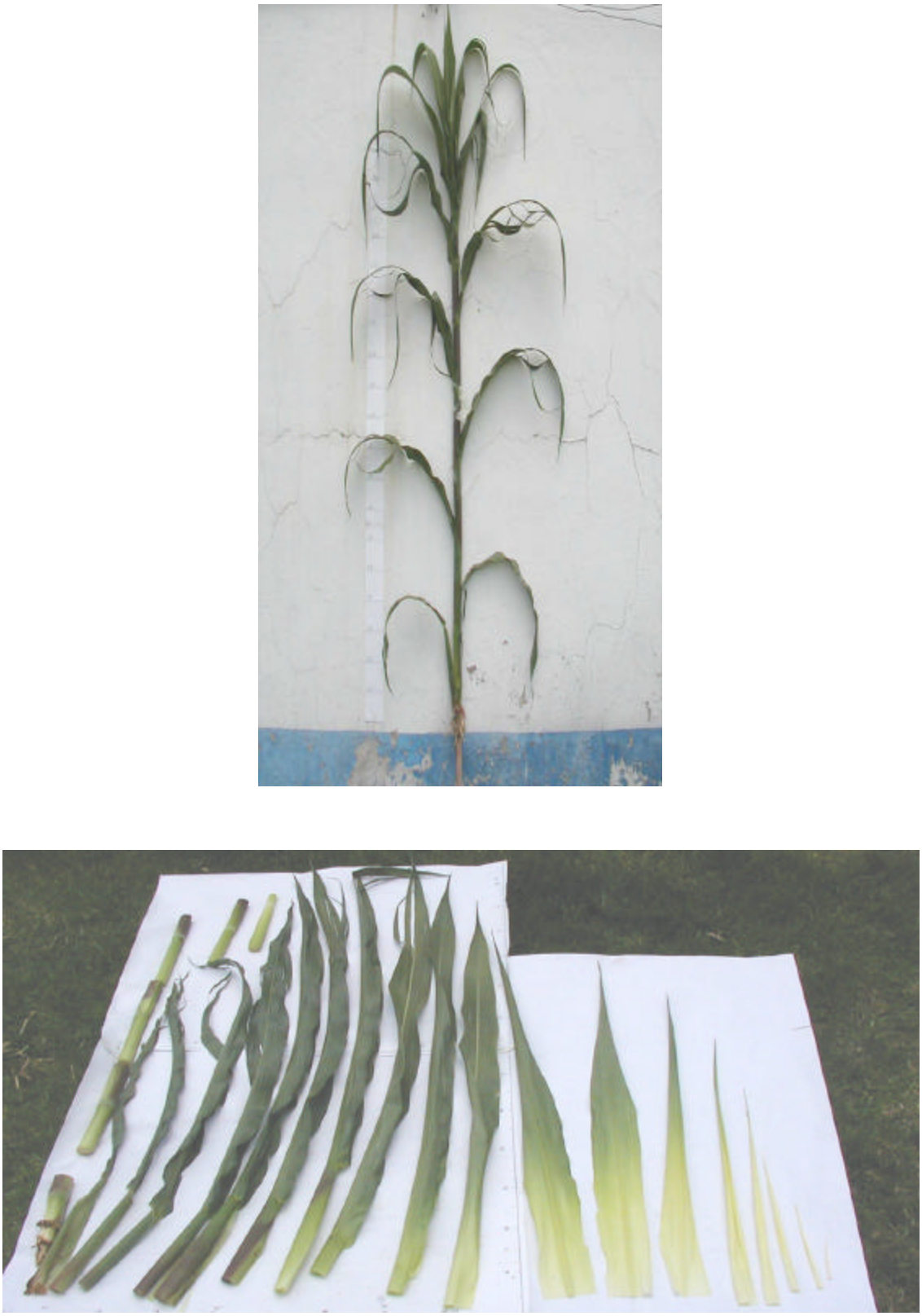


Foto 5. Planta de maíz (híbrido HS-2) al segundo mes de siembra (30 de Julio del 2001), parte superior: planta entera; parte inferior: planta desmenuzada.

Al segundo mes la planta a alcanzado una altura considerable, su crecimiento ha sido acelerado, no así su desarrollo. Todavía no se presenta la espiga, la planta se ha dedicado a producir tallo y hojas como se ve en la foto anterior.

Foto 6. Planta de maíz (híbrido HS -2) al día 02 de Agosto del 2001, puede verse que ya está formada la espiga.

En la parte inferior derecha se observa la presencia de la espiga en la planta, la cual todavía en esta fecha se encuentra oculta entre las hojas que todavía no alcanzan su desarrollo completo, el color amarillo claro que tienen las últimas hojas es por el hecho de que todavía no han sido expuestas a la luz del sol, ellas no realizan la fotosíntesis aún. Las hojas grandes todavía se encuentran verdes, no ha comenzado el proceso de senescencia.

Foto 7. Estado 1. Planta de maíz (híbrido HS-2) al día 16 de Agosto del 2001. Aquí podemos ver que la espiga está presente así como el primer órgano de almacenamiento.

Observando las hojas, se ve que están completamente verdes, todas están expuestas a la luz del sol y trabajan realizando la fotosíntesis. A la izquierda de la foto se muestra el tallo el cual alcanza una longitud de dos metros. En la parte inferior derecha se observa la espiga, la cual empieza ha emergido. También se observa la presencia de un órgano de almacenamiento, el cual se ve en detalle en la siguiente foto donde se ve con claridad los estigmas que emergen y seguirán creciendo hasta que sean fecundados y con esto la formación de los granos.

Foto 8. En esta foto se muestra como los estigmas están por salir de las espatas (Planta de maíz (híbrido HS-2) al día 16 de Agosto del 2001) (Estado 1).

Foto 9. Cultivo del maíz (híbrido HS-2) al cuarto mes de sembrado (27 de Septiembre del 2001), empieza a observarse senescencia de las hojas.

Foto 10. Mazorcas de una misma planta, los granos están en su etapa lechosa (27 de Septiembre del 2001).

Los estigmas empiezan a secarse y los granos se encuentran llenos en la segunda y tercera mazorca, ahora empezarán a perder humedad y volverse duros. En la primera mazorca los granos continúan llenándose.

Foto 11. Etapa 2. El crecimiento se ha detenido completamente, varias de las hojas ya están secas y los granos están mazosos.

Puede verse la senescencia de las hojas y que continuará hasta que la planta completa muera.

Foto 12. Se puede observar que la mazorca está completamente formada, los granos llenos y mazosos (Etapa de desarrollo 2, 15 de Octubre 2001).

Hasta esta fecha (15 de Octubre 2001) se ha dado la madurez fisiológica, por lo que se deja de tomar registro de los datos. Lo que se espera que pase con la planta, sea que siga perdiendo agua y el peso de la planta disminuya, se irá secando las hojas, el tallo y las mazorcas.

3.2 Graficas de datos de campo (U. A. Chapingo).

A continuación se presenta una serie de gráficas, las cuales fueron elaboradas a partir de los datos que se obtuvieron en el experimento de campo.

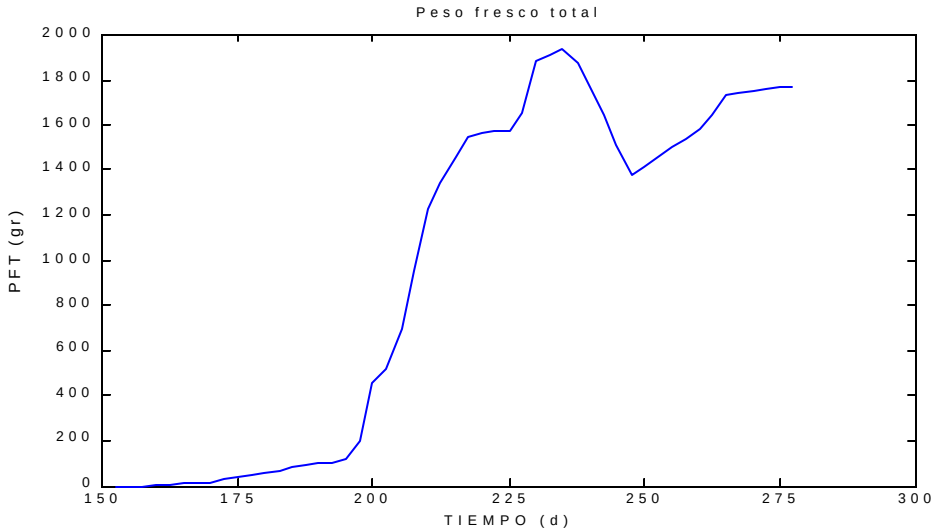


Figura 3.2.1 Gráfica del peso fresco total de la planta con respecto al tiempo (datos de campo, U. A. Chapingo).

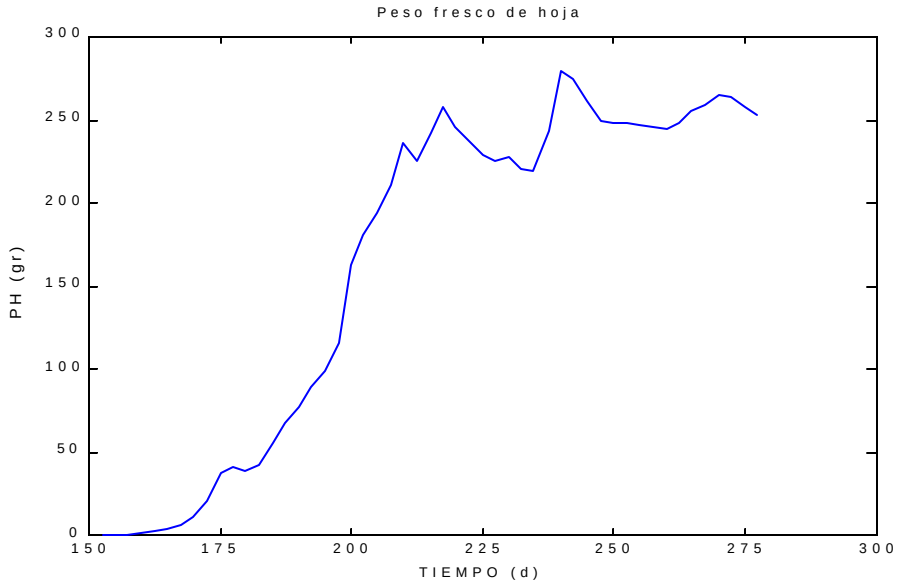


Figura 3.2.2. Gráfica del peso fresco de la hoja con respecto al tiempo (datos de campo, U. A. Chapingo).

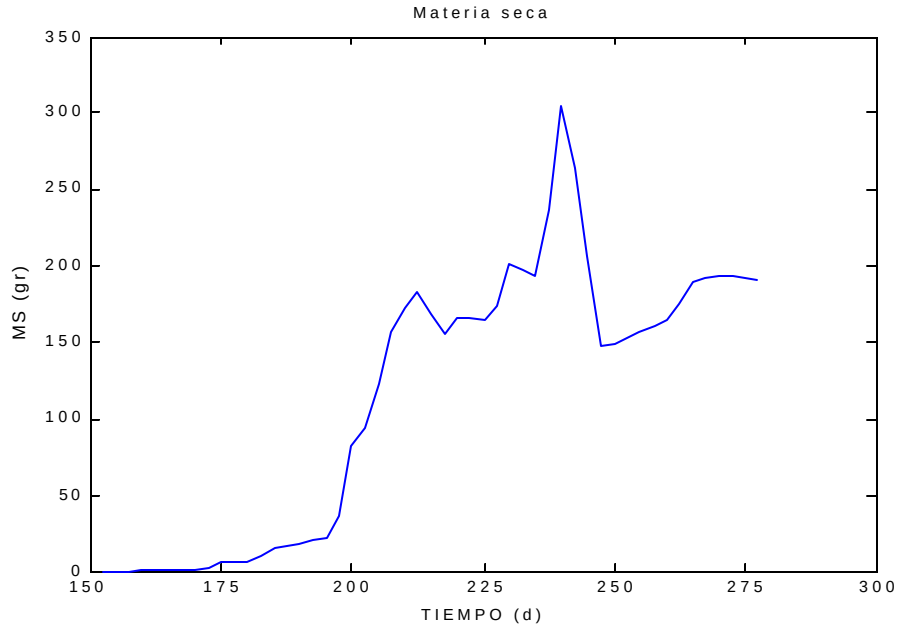


Figura 3.2.3. Gráfica del peso seco de la planta con respecto al tiempo (datos de campo, U. A. Chapingo).

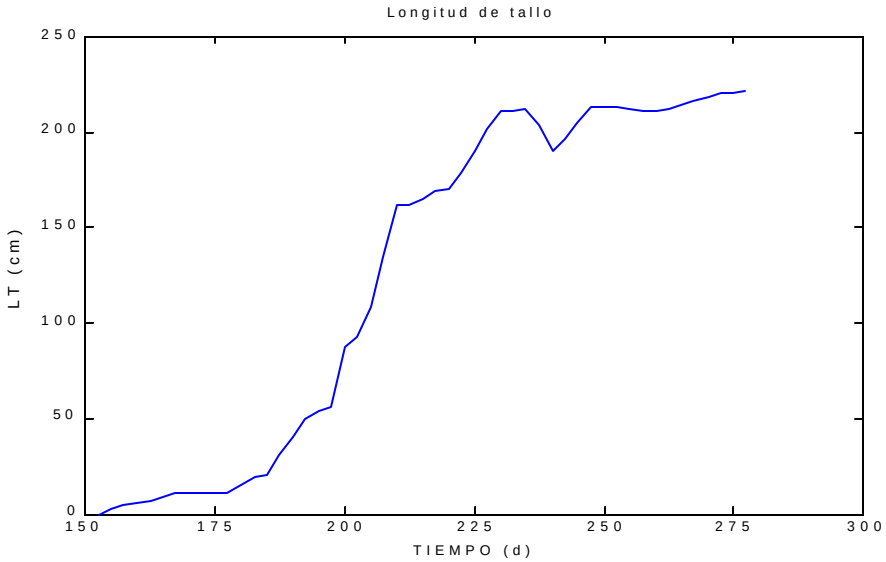


Figura 3.2.4. Gráfica de la longitud del tallo con respecto al tiempo (datos de campo, Chapingo).

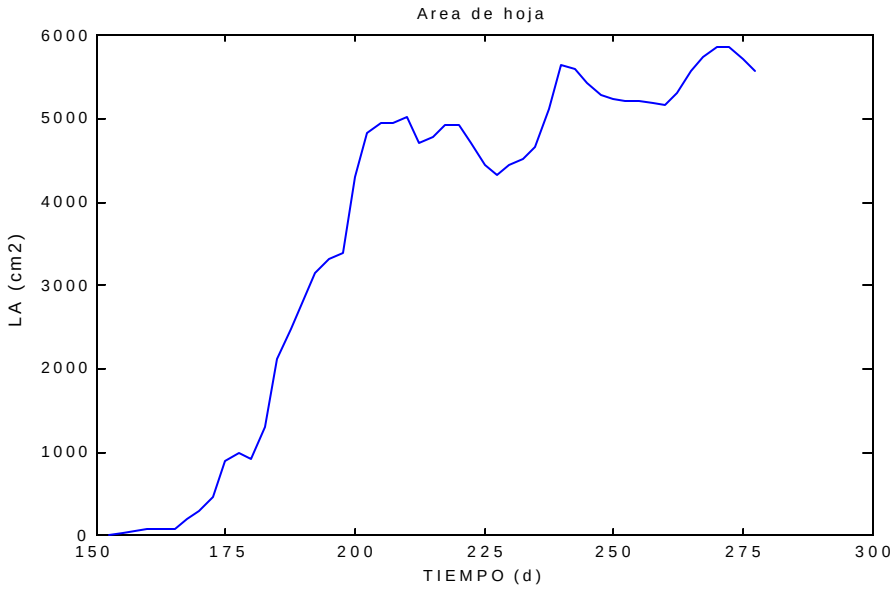


Figura 3.2.5. Gráfica del área de hoja con respecto al tiempo (datos de campo, Chapingo).

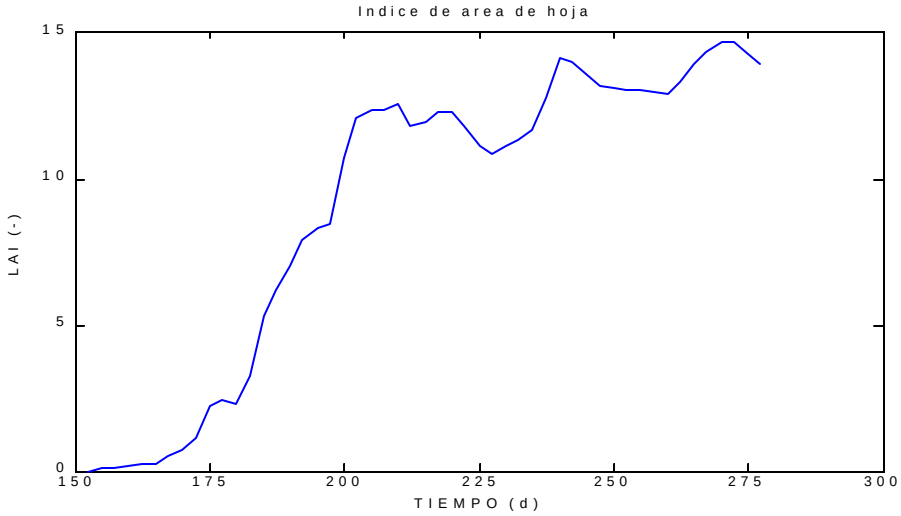


Figura 3.2.6. Gráfica del índice de área de hoja con respecto al tiempo (datos de campo, Chapingo).

En las ilustraciones anteriores podemos ver como con respecto al tiempo las partes de la planta crecen en el desarrollo del maíz. En la gráfica de materia seca se observa como la planta se va haciendo de materia seca, la cual está muy relacionada con la radiación solar.

3.3 Registro meteorológico.

Los datos del tiempo dados en el modelo, son promedios semanales (definidos a la mitad de la semana), para la U. A. Chapingo en el año 2001.

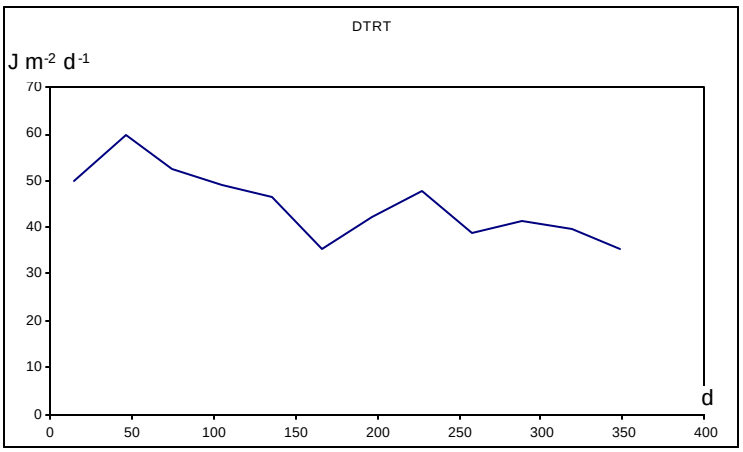


Figura 3.3.1. Tabla de la radiación solar diaria como función del día del año (datos de campo de la estación meteorológica de la Universidad Autónoma Chapingo, 2001).

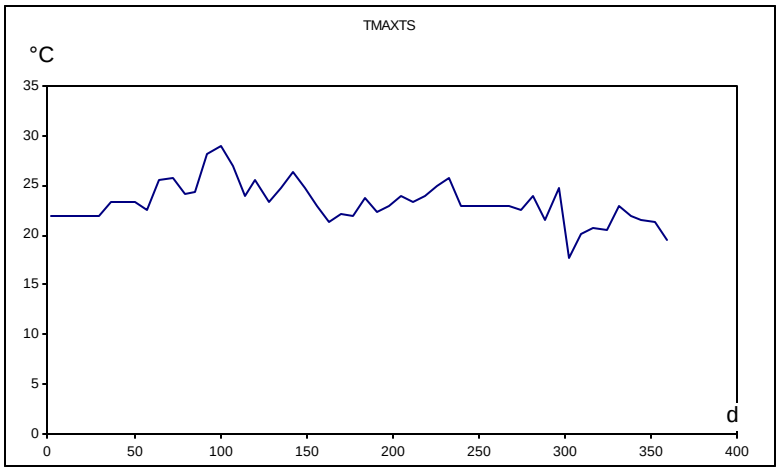


Figura 3.3.2. Tabla de la temperatura máxima diaria como función del día del año (datos de campo de la estación meteorológica de la Universidad Autónoma Chapingo, 2001).

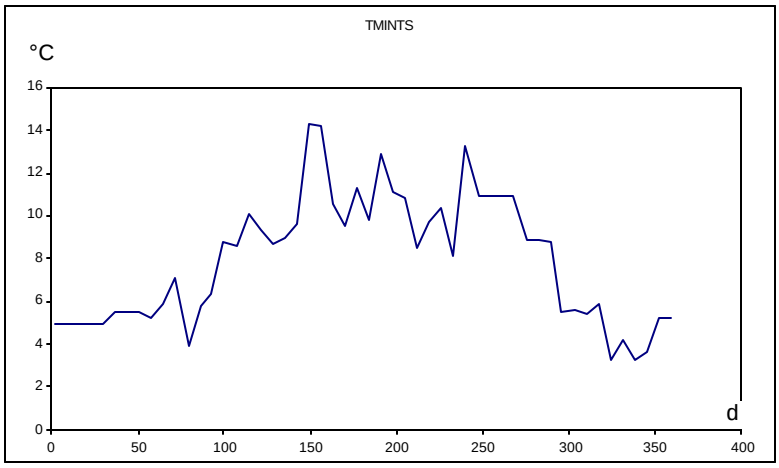


Figura 3.3.3. Tabla de la temperatura mínima diaria como función del día del año (datos de campo de la estación meteorológica de la Universidad Autónoma Chapingo, 2001).

Capítulo 4. Modelo de crecimiento para una producción potencial del cultivo del maíz (híbrido HS-2).

Muchos cambios ocurren en el crecimiento de un cultivo. Algunos cambios tales como peso y área de hoja, son fáciles de cuantificar, mientras otros, tales como la edad de la planta y desarrollo fenológico, son más difíciles. Es importante cuantificar la fenología del cultivo porque el proceso de particionado de la nueva biomasa depende directamente de la expresión de la edad (Penning de Vries, et al, 1989).

SUCROS simula el crecimiento potencial del cultivo del maíz, *i.e.* su acumulación de materia seca bajo la hipótesis de un buen suministro de agua y nutrientes en un ambiente libre de plagas, enfermedades y malezas. Por lo que es el tiempo atmosférico el que determina la evolución del proceso.

La razón de acumulación de materia seca es una función de la radiación, temperatura y características del cultivo. Las bases para el cálculo es la razón de asimilación de CO_2 (fotosíntesis) del dosel. Esa razón es dependiente de la energía radiante absorbida por el dosel, el cual es una función de la radiación entrante y el área de hoja del cultivo. De la radiación absorbida y las características fotosintéticas de las hojas individuales, se calcula la razón diaria de asimilación bruta de CO_2 del cultivo.

SUCROS requiere como entradas las propiedades fisiológicas del cultivo (en este caso para maíz (híbrido HS-2)) y las actuales condiciones de tiempo atmosférico en el sitio, caracterizado por su latitud geográfica, *i.e.* temperatura mínima y máxima diaria y radiación para cada día del año.

La Figura 3.30.3.3.1 nos muestra el conjunto de bloques por los que está conformado el programa SUCROS, dentro de cada bloque se encuentran los programas que realizan los cálculos necesarios para la simulación.

Al primer bloque lo llamamos B1 en donde se calcula el estado de desarrollo y la razón de desarrollo, teniendo como entrada los valores de la temperatura promedio, DAVTMP (que viene del bloque B10), el día del año (el cual se da por un reloj, DAY), y el valor del día de la siembra (DOYEM). A la salida tenemos el valor de DVS que sirve de entrada al bloque B2 que calcula la asimilación de CO_2 en las hojas, también tiene como entrada el promedio de la temperatura

(DDTMP, bloque B10), de igual forma, DVS sirve de entrada a el bloque B6 donde se hace el cálculo de la partición de materia seca, esto es, obtenemos la fracción de materia seca que se destina para cada parte de la planta.

Del bloque B2 obtenemos la razón de asimilación actual de CO_2, que sirve de entrada al bloque B3. Este bloque (asimilación de CO_2 diaria bruta) además tiene entradas como el día del año (DAY), la latitud (LAT), la radiación solar diaria (DTR), el coeficiente de dispersión (SCP), factor de conversión de luz (EFF), el coeficiente de extinción de hojas (KDF), y el índice de área de hoja (LAI). Y como salidas, la longitud del día (DAYL), la radiación extraterrestre diaria (DSO) y la asimilación bruta total diaria, el cual sirve de entrada del bloque B4 (asimilación de carbohidratos), obteniendo la asimilación bruta total diaria de CH_2O del cultivo (GPHOT).

En el bloque que se calcula el desarrollo de hojas (B8), se tiene 9 entradas de las cuales dos son constantes: la densidad de planta (NPL) y el área de hoja inicial (LAO). Todos los demás valores son calculados de bloques anteriores y los valores de salida son la razón de muerte de hoja (DLV) y el índice de área de hoja. Pasamos ahora al bloque B5, que se utiliza para calcular los requerimientos para mantenimiento de los órganos (hojas, tallos, raíces y granos), para ello se necesita como entradas la temperatura promedio (DAVTMP), los pesos de la hoja, tallo raíces y órgano de almacenamiento (WLV, WST, WRT y WSO), los cuales se obtienen del bloque B9 y tiene como salida el valor de la razón de respiración de mantenimiento del cultivo (MAINT).

El bloque B7 que calcula el crecimiento de los órganos de la planta y la translocación, obtiene los valores de entrada del bloque B6 (fracciones de materia seca), además de GPHOT, MAINT, WST, DVR y DVS. Estos valores son utilizados en el siguiente bloque (B8) para la producción de materia seca, además de obtener valores como el índice de cosecha (HI), biomasa total (TDRW) y peso seco total sobre la tierra (TADRW). El último bloque (B11) se refiere a la revisión del balance de carbón, por lo que obtenemos: diferencia entre carbón agregado y el total neto de flujo (CHKDIF), suma de flujos de carbón integrado (CHKFL) y carbón en el cultivo acumulado desde el inicio de la simulación (CHKIN).

En este panorama general podemos ver las dos restricciones por las cuales el programa se detendría (DVS>2 y CHKDIF>0.001), vemos también las constantes a cambiar para modificar el programa.

Al inicio de la tesis se encuentra una tabla con las definiciones de las abreviaciones usadas. En el Capítulo 5 se muestra el procedimiento por el cual se realizó el ajuste del programa SUCROS para el caso particular de maíz (híbrido HS-2) y en la Tabla 1, p 113 se puede ver un resumen de los valores ajustados.

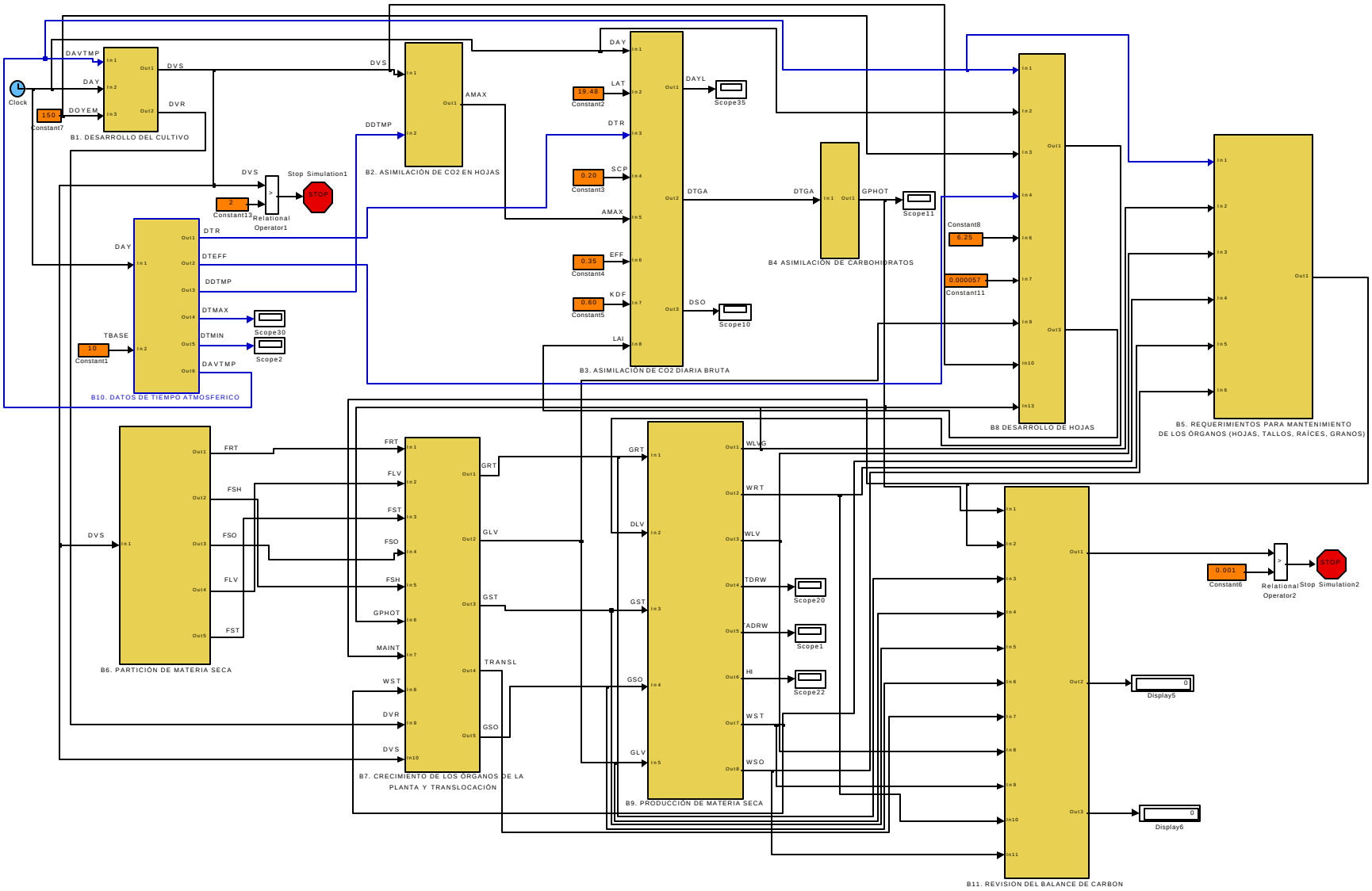


Figura 3.30.3.3.1. Programa de simulación SUCROS modificada para el maíz (híbrido HS -2) en la región de la Universidad Autónoma Chapingo.

4.1 Condiciones iniciales.

Las condiciones iniciales para nuestro caso y necesarias para el programa son:

DOYEM =150 [d].
NPL = 210 [plant/m^2].
LAO = 5.7E-5 [m^2/plant]
WLVI = 0 [kg/ha]., WSTI=0 [kg/ha]., WRTI=0 [kg/ha].
WLVDI = 0 [kg/ha]; WSOI=0 [kg/ha]; IDVS=0 [kg/ha]; ILAI=0 [ha_{hoja}/ha_{tierra}];

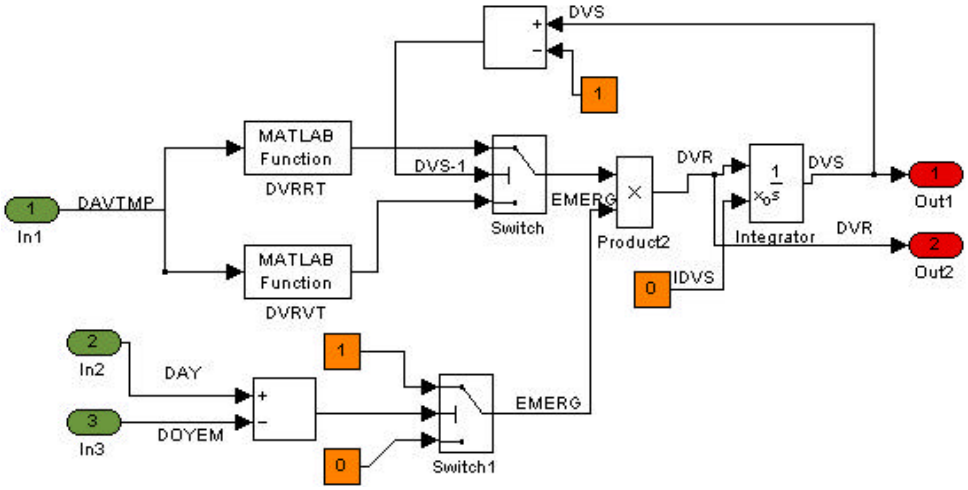
Donde:

DOYEM – día del año de emergencia del cultivo [d]
NPL – densidad de plantas [plant/m^2]
LAO – área de hoja inicial (en emergencia de campo) [m^2/plant]
WLVI – peso seco inicial de las hojas [kg/ha]
WSTI – peso seco inicial de los tallos [kg/ha]
WRTI – peso inicial de las raíces [kg/ha]
WLVDI – peso seco inicial de las hojas muertas [kg/ha]
WSOI – peso seco inicial de los órganos de almacenamiento [kg/ha]
IDVS – estado inicial de desarrollo [kg/ha]
ILAI – índice de área de hoja inicial [ha_{hoja}/ha_{tierra}]
IEAI – índice de área de espiga inicial [ha_{espiga}/ha_{tierra}]

El modelo SUCROS inicia en el momento de la emergencia del cultivo (DOYEM). El índice de área de hoja en el momento es calculado en la subrutina GLA (ver bloque B8, p. 91) como el producto de la densidad de plantas (NPL, plantas/m^2) y el área de hoja por planta en la emergencia (LAO, m^2/plant).

La cantidad inicial de materia seca en hojas (WLVI), tallos (WSTI), raíces (WRTI), hojas muertas (WLVDI) y órganos de almacenamiento (WSOI) en la emergencia es cero. La salida del modelo no es sensitiva a esos valores. El valor inicial para el estado de desarrollo (IDVS) y el índice de área de hoja (ILAI) son puestos también en cero.

4.2 Desarrollo del cultivo.



Programa 4.1. Cálculo del desarrollo del cultivo (bloque B1).

Dónde:

DVS – estado de desarrollo del cultivo [-]
DVR – razón de desarrollo [d^{-1}]
DVRVT – tabla de DVR en fase de pre-antesis como función de temperatura [d^{-1}, °C]
DVRRT – tabla de DVR en fase de post-antesis como función de temperatura [d^{-1}, °C]
EMERG – parámetro para indicar la emergencia [-]
DAY – número de día desde el 1° de Enero (día del año) [d]

Parámetro:

DOYEM = 150 [d]

Funciones:

DVRRT – ver Figura 5.2.2, p. 106.
DVRVT – ver Figura 5.2.1, p. 106.

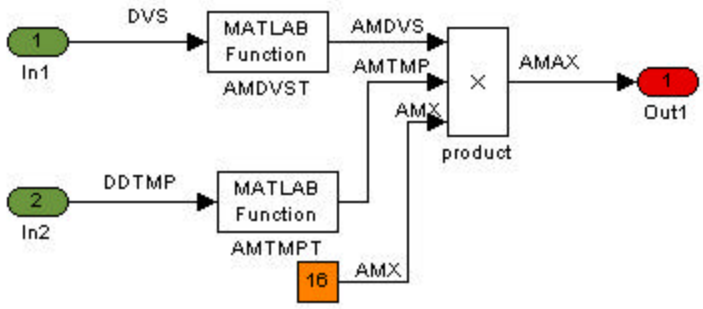
La distribución de materia seca, producida por la planta, de los diversos órganos está directamente relacionada al estado de desarrollo fenológico del cultivo. Se usa un formato numérico para identificar los diferentes estados de desarrollo de la planta (DVS). El estado en el cual la punta de la planta emerge del suelo es el estado 0 y es estado de planta madura en el estado 2. En el estado 1 se refiere al estado de estigmas (cuando los estigmas recién emergen de entre las espatas). El estado de desarrollo es calculado como la integral de la razón de desarrollo (DVR, d^{-1}).

El desarrollo fenológico inicia en la emergencia de la plántula. El factor EMERG igual a 0 antes de la emergencia y 1 después de la emergencia.

El número de día del año (DAY), es contado a partir del 1° de Enero.

Estado	*Descripción*	*Fecha*	*Día fenológico*
0	Emergencia	31/05/01	1
1	Presencia de estigmas	16/08/01	79
2	Madurez de la planta	15/10/01	139

4.3 Asimilación de CO_2 en la hoja.



Programa 4.2. Asimilación de hojas (bloque B2).

Dónde:

AMAX – razón de asimilación actual de CO_2 en saturación de luz para hojas individuales [kg CO_2/ha_{hoja}h]
AMX – razón de asimilación potencial de CO_2 en saturación de luz para hojas individuales [kg CO_2/ha_{hoja}h]
AMDVS – factor de consideración por efecto del estado de desarrollo sobre AMX [-]
AMTMP – factor de consideración por efecto de la temperatura diaria sobre AMX [-]
AMDVST – tabla de AMDVS como una función de DVS [.-,-]
AMTMPT – tabla de AMTMP como función de DDTMP [-,°C]
DDTMP – temperatura promedio del día [°C]

Parámetro:

AMX = 16 [kg CO_2/ha_{hoja}h].

Función:

AMDVST – ver Figura 4.3.1, p. 74.
AMTMPT – ver Figura 5.3.1, p. 107.

La respuesta de la hoja a la asimilación de CO_2 a intensidad de luz, es caracterizada por su pendiente a baja intensidad de luz y su máxima razón a saturación de luz (AMX, kgCO_2/hah). El efecto de la temperatura (AMTMP) es una función de la temperatura promedio durante el día (DDTMP, °C) dada en la función AMTMPT.

El valor de AMX usado en el modelo, se refiere a la capacidad de asimilación de las hojas completamente desarrolladas arriba del dosel, pues esas hojas absorben más radiación. La máxima capacidad de asimilación de CO_2 de las hojas varía con la especie de planta y cultivo.

El efecto del envejecimiento del dosel es introducido por un factor multiplicativo (AMDVS) definido como una función del estado de desarrollo.

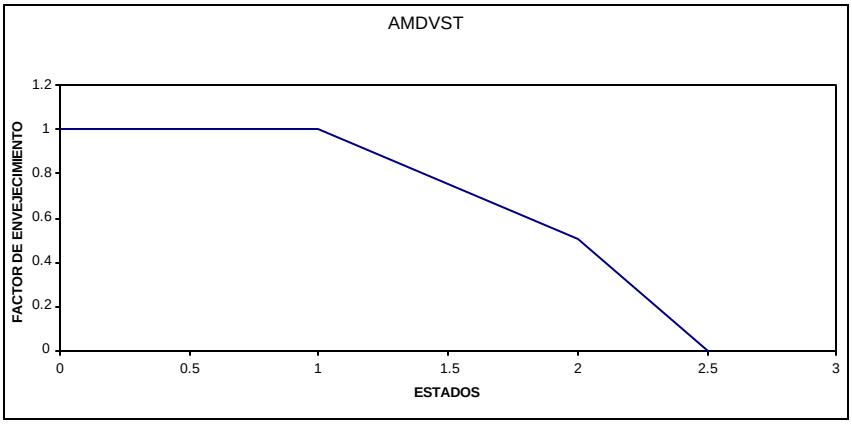
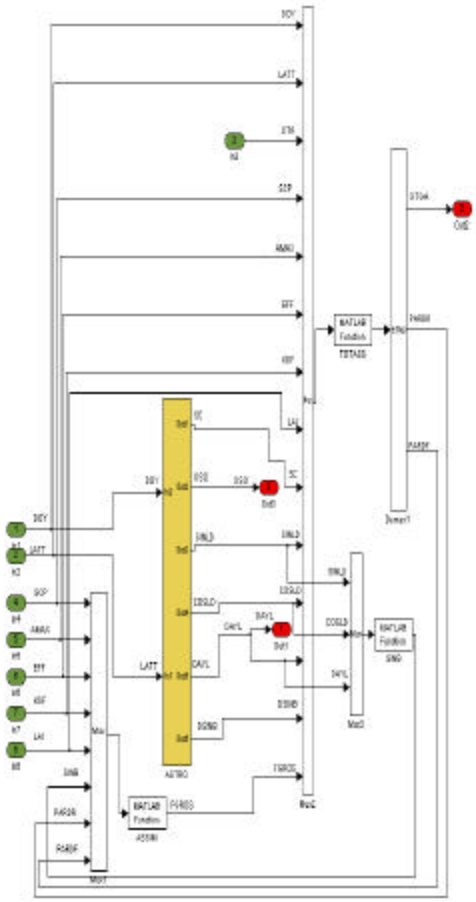


Figura 4.3.1. Tabla del factor de envejecimiento del dosel (Goudriaan, 1994, p. 187).

4.4 Asimilación bruta diaria de CO_2.



Programa 4.3. Asimilación de CO_2 diaria bruta (bloque B3).

Dónde:

LATT – latitud de la estación meteorológica [grados]
DTR – radiación solar diaria [J/m^{2}d]
SCP – coeficiente de dispersión de hojas para PAR [-]
EFF – factor de conversión de luz inicial para hojas individuales [kg CO_2/ha$_{hoja}$h][J/m^2 $_{hoja}$S]$^{-1}$
KDF – coeficiente de extinción para hojas [ha$_{tierra}$/ha$_{hoja}$]
LAI – índice de área de hoja [ha$_{tierra}$/ha$_{hoja}$]
DAYL – longitud del día [h/d]
DTGA – asimilación bruta total diaria de CO_2 del cultivo [kg CO_2/ha$_{tierra}$d]
DSO – radiación extraterrestre diaria [J/m^{2}d]

Parámetro:

LAT = 19° 29’ (localización del campo experimental de la U. A. Chapingo)

SCP = 0.20 [-]
EFF = 0.35 [kg CO_2/ha_{hoja}h][J/m^2 $_{hoja}$s]$^{-1}$
KDF = 0.60 [ha_{tierra}/ha_{hoja}]

Subrutinas:

ASSIM – ver Programa 4.14, p. 94.
ASTRO – ver Programa 4.15, p. 95.
TOTASS – ver Programa 4.13, p.93.

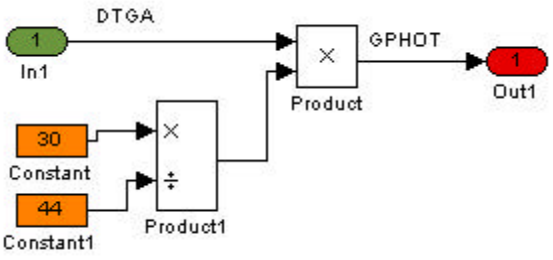
La asimilación bruta diaria de CO_2 del cultivo (DTGA, kg CO_2/ha_{tierra}d) es calculada de la radiación fotosintéticamente activa (PAR, J/m^2s) absorbida por el dosel y la asimilación de CO_2 por la respuesta de la luz de hojas individuales. Si la intensidad de radiación promedio sobre el día y sobre el dosel fuera aplicado, la asimilación en el dosel de CO_2 sería seriamente sobreestimada, porque la asimilación de CO_2 responde a la intensidad de luz en una forma no lineal. En el modelo, la variación temporal y espacial en la intensidad de radiación sobre las hojas es, por lo tanto, tomada en consideración.

El cálculo es realizado en la subrutina TOTASS (ver Programa 4.13). Esta subrutina hace uso de la subrutina ASTRO (ver Programa 4.15) y ASSIM (ver Programa 4.14). SUCROS puede ser aplicada sin un completo entendimiento de esas subrutinas. Tres parámetros usados en esas subrutinas, EFF, KDF y SCP, son especificadas y fueron derivadas de la literatura.

Discusiones detalladas son dadas por Spitters *et al* (1986) para el cálculo del flujo de radiación difusa y directa sobre el dosel (PARDF y PARDR), por Spitters (1986) para el calculo de la razón de asimilación de estos flujos, y por Gaudriaan (1986) para el método de integración Gaussiana usada para integrar la razón de asimilación sobre el dosel y sobre el día.

La única característica requerida del sitio para el cálculo de la producción potencial es la latitud (LATT).

4.5 Producción de carbohidratos.



Programa 4.4. Asimilación de carbohidratos (bloque B4).

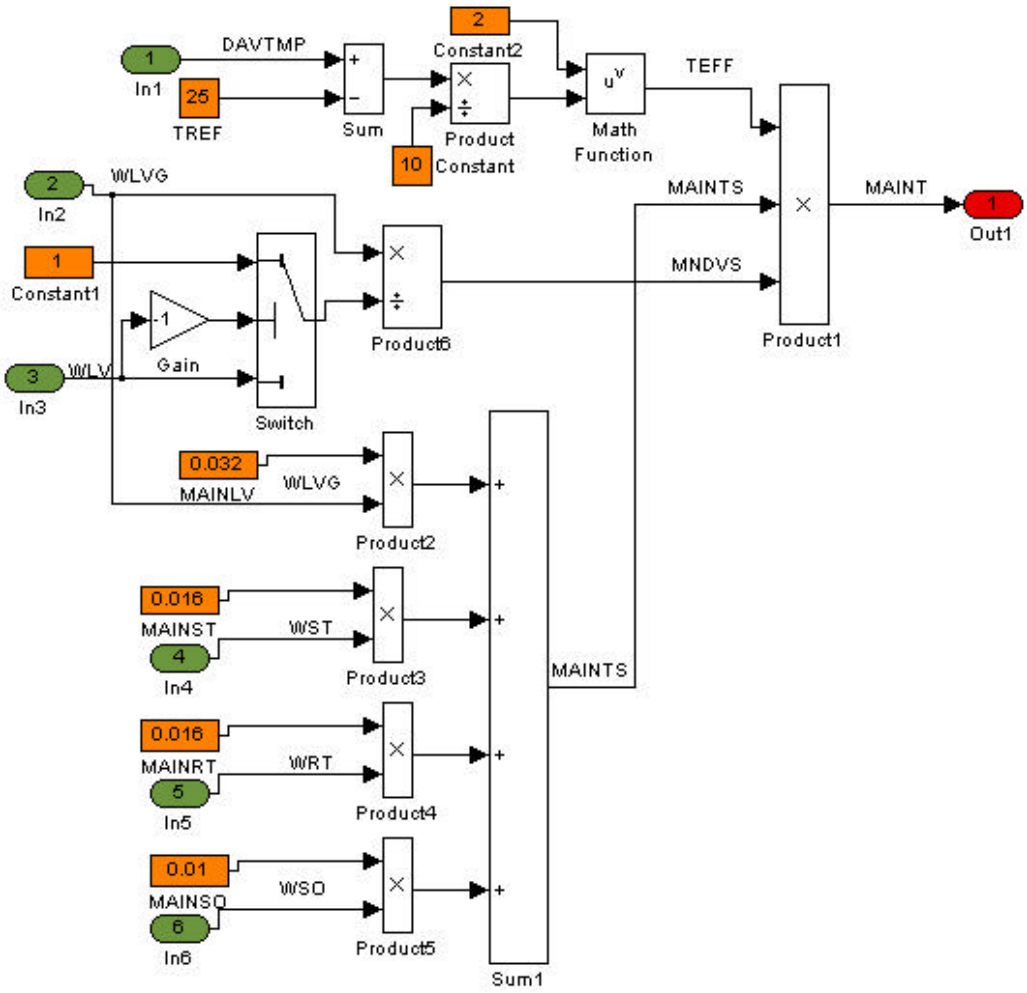
Dónde:

GPHOT – asimilación de CH_2O bruta total diaria del cultivo [kg CH_2O/ha_{tierra} d]

En las hojas el CO_2 absorbido es reducido a carbohidratos (CH_2O) usando la energía suministrada por la luz absorbida. Por cada kg de CO_2 absorbido 30/44 kg de CH_2O es formado, el valor numérico representa los pesos moleculares de CH_2O y CO_2, respectivamente.

$$\text{i.e. } \frac{CH_2O}{CO_2} = \frac{12+2*1+16}{12+2*16} = \frac{30}{44}$$

4.6 Mantenimiento.



Programa 4.5. Requerimientos para mantenimiento de los órganos (hojas, tallos, raíces, y granos) (bloque B5).

Dónde:

MAINT – razón de respiración de mantenimiento del cultivo [kg CH_2O/had]
MAINTS – razón de respiración de mantenimiento del cultivo a temperatura de referencia [kg CH_2O/had]
MNDVS – factor de consideración para efecto del estado de desarrollo del cultivo (DVS) sobre la respiración de mantenimiento [-]
TEFF – factor de consideración por efecto de la temperatura sobre la respiración de mantenimiento [-]
MAINLV – coeficiente de respiración de mantenimiento de las hojas [kgCH_2O/kgMSd]
WLVG – peso seco de hojas verdes [kg/ha]
WST – peso seco de los tallos [kg/ha]
MAINRT – coeficiente de respiración de mantenimiento de raíces [kgCH_2O/kgMSd]
WRT – peso seco de las raíces [kg/ha]
MAINSO – coeficiente de respiración de mantenimiento de órganos de almacenamiento [kgCH_2O/kgMSd]
WSO – peso seco de los órganos de almacenamiento [kg/ha]
WLV – peso seco de las hojas (verdes+muertas) [kg/ha]
DAVTMP – temperatura diaria promedio [°C]
TREF – temperatura de referencia [°C]
MAINST – coeficiente de respiración de mantenimiento de tallos [kgCH_2O/kgMSd]

Parámetro:

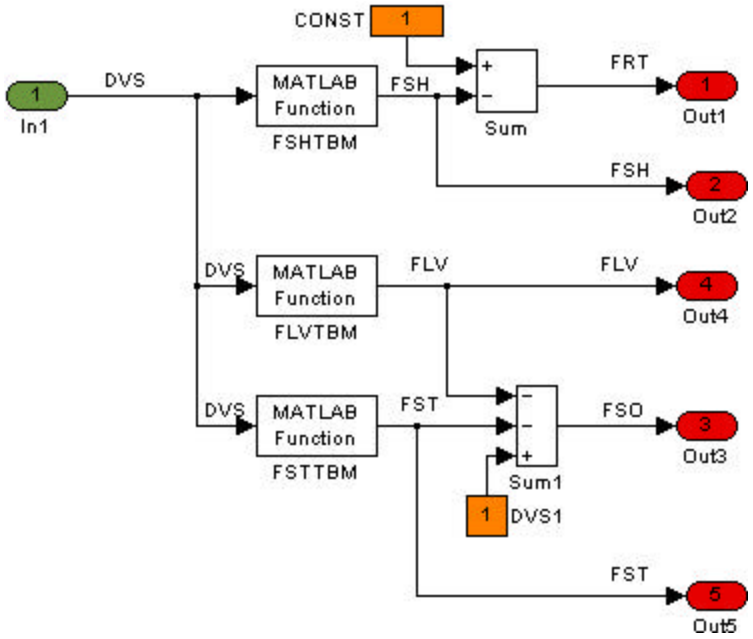
MAINST = 0.016 [kgCH_2O/kgMSd]
MAINRT = 0.016 [kgCH_2O/kgMSd]
MAINSO = 0.01 [kgCH_2O/kgMSd]
MAINLV = 0.032 [kgCH_2O/kgMSd]
TREF = 25 [°C]

Parte de los carbohidratos formados son respirados (consumido) para proveer energía para mantener la bio-estructura existente. En el modelo, los coeficientes fijados (para una especie de planta depende de la temperatura de referencia) son usados para calcular los requerimientos de mantenimiento de los distintos órganos (hojas, tallos, raíces y granos) del cultivo. Las altas temperatura aceleran la velocidad de facturación en el tejido de la planta y desde este momento se incrementa el costo de mantenimiento (TEFF). Un incremento de la temperatura de 10° incrementa la respiración de mantenimiento por un factor de 2.

Cuando el cultivo envejece, su actividad metabólica decrece y así también sus requerimientos de mantenimiento. Esto es simulado en el modelo asumiendo

que la respiración de mantenimiento es proporcional a la fracción del peso acumulado de la hoja que todavía es verde. El factor de reducción, MNDVS, es también aplicado a la respiración de mantenimiento de los otros órganos asumiendo que mueren tejidos de tallos y raíces, y simultáneamente continúa la muerte de hojas.

4.7 Particionado de materia seca.



Programa 4.6. Partición de materia seca (bloque B6).

Dónde:

FSH – fracción total de materia seca asignada para los brotes [-]
FSHTBM – tabla de FSH como función de DVS [-]
FRT – fracción total de materia seca asignada a las raíces [-]
FLV – fracción total de materia seca asignada a las hojas [-]
FLVTBM – tabla de FLV como función de DVS [-]
FST – fracción de materia seca de brote asignados a tallos [-]
FSTTBM – tabla de FST como función de DVS [-]
FSO – fracción de materia seca de brote asignad a órganos de almacenamiento [-]

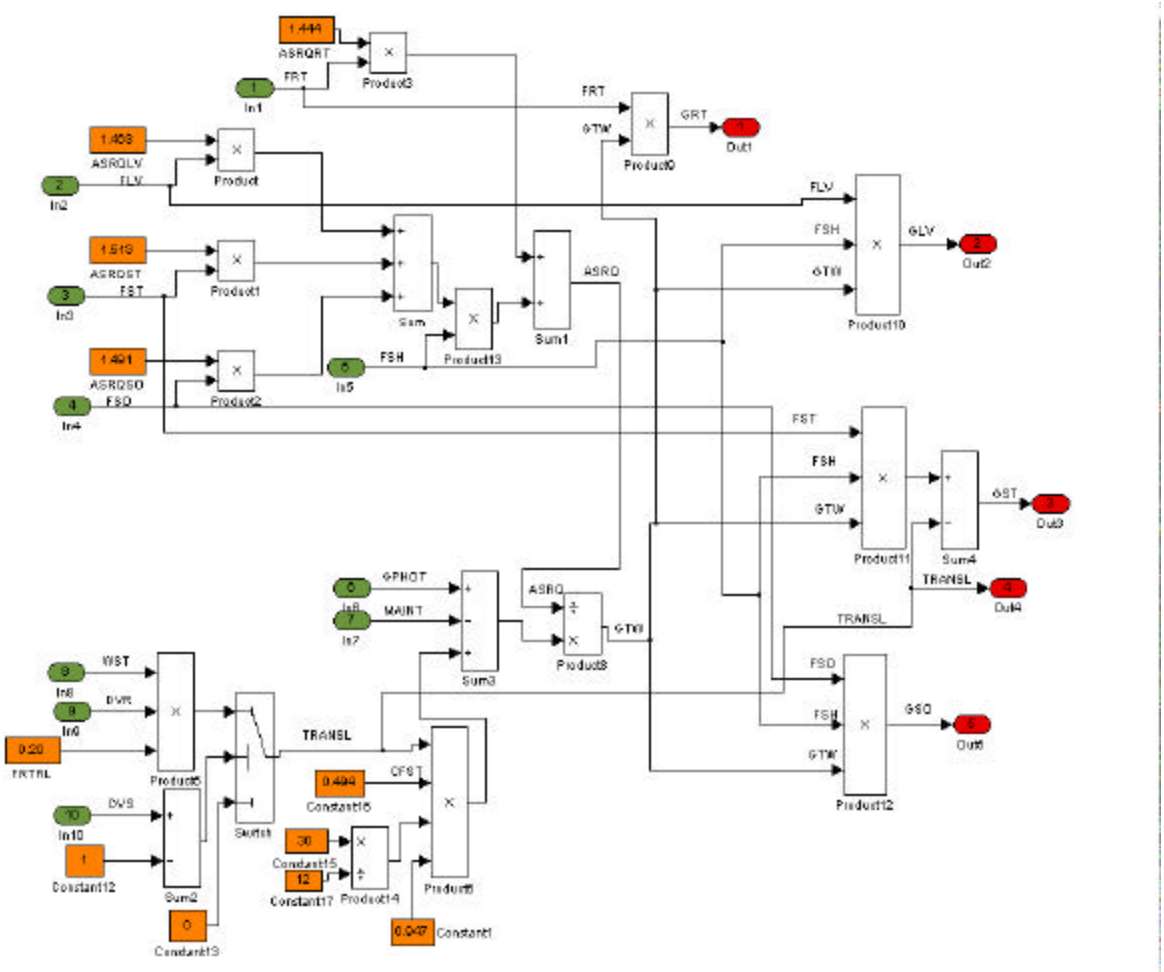
Funciones:

FLVTBM – ver Figura 5.7.1, p. 108.
FSTTBM – ver Figura 5.7.2, p. 109

FSHTBM – ver Figura 5.7.3, p. 109.

La asimilación primaria en exceso del costo de mantenimiento está disponible por conversión dentro del material vegetativo de la planta. Ocasionalmente, la combinación de radiación baja, temperatura alta y alta biomasa puede causar una escasez en vez de un exceso de asimilación primaria. Por razones de simplicidad del modelo y carencia de evidencia empírica, la ruta de asimilación no alternativa fue formulada para tal situación. Esto implica que el material estructural de la planta es usado para soportar el mantenimiento. La partición sobre los distintos órganos de la planta es descrita por fijación de los factores de distribución, definido como una función del estado de desarrollo. Esta partición ocurre en dos pasos. La materia seca es primeramente particionada entre brotes (FSH) y raíces (FRT), seguida por la distribución de la fracción de brote entre hojas (FLV), tallos (FST) y órganos de almacenamiento (FSO).

4.8 Crecimiento de órganos de la planta y translocación.



Programa 4.7. Crecimiento de órganos de la planta y translocación (bloque B7)-

Donde:

ASRQ – requerimiento de asimilados (CH_2O) para producción de materia seca [kg CH_2O/kgMS]
ASRQLV – requerimiento de asimilados para producción de materia seca en hojas [kg CH_2O/kgMS_{hoja}]
ASRQST – requerimiento de asimilados para producción de materia seca en tallos [kg CH_2O/kgMS_{tallos}]
ASRQSO – requerimiento de asimilados para producción de materia seca en órganos de almacenamiento [kg CH_2O/kg$MS_{órg.alm.}$]
ASRQRT – requerimiento de asimilados para producción de materia seca en raíz [kg CH_2O/kg$MS_{raíz}$]
TRANSL – razón de translocación de materia en tallo a órganos de almacenamiento [kgMS/ha d]
FRTRL – fracción del peso del tallo eventualmente translocada a órganos de almacenamiento [-]
GTW – razón de crecimiento bruto de materia seca del cultivo, incluyendo translocación [kgMS/ha_{tierra} d]
CFST – fracción de masa de carbón en los tallos [kgC/kgMS]
GRT – razón de crecimiento de materia seca de raíces [kgMS/ha_{tierra} d]
GLV – razón de crecimiento de materia seca de hojas [kgMS/ha_{tierra} d]
GSO – razón de crecimiento de materia seca de órganos de almacenamiento [kgMS/ha_{tierra} d]

Parámetros:

ASRQLV = 1.463 [kg CH_2O/kgMS_{hoja}]
ASRQST = 1.513 [kg CH_2O/kgMS_{tallos}]
ASRQRT = 1.444 [kg CH_2O/kg$MS_{raíz}$]
ASRQSO = 1.491 [kg CH_2O/kg$MS_{órg.alm.}$]
CFST = 0.494 [kgC/kgMS]
FRTRL = 0.20 [-]

Los valores de los requerimientos de asimilados (ASR), son calculados sin el costo de la reducción de nitrato.

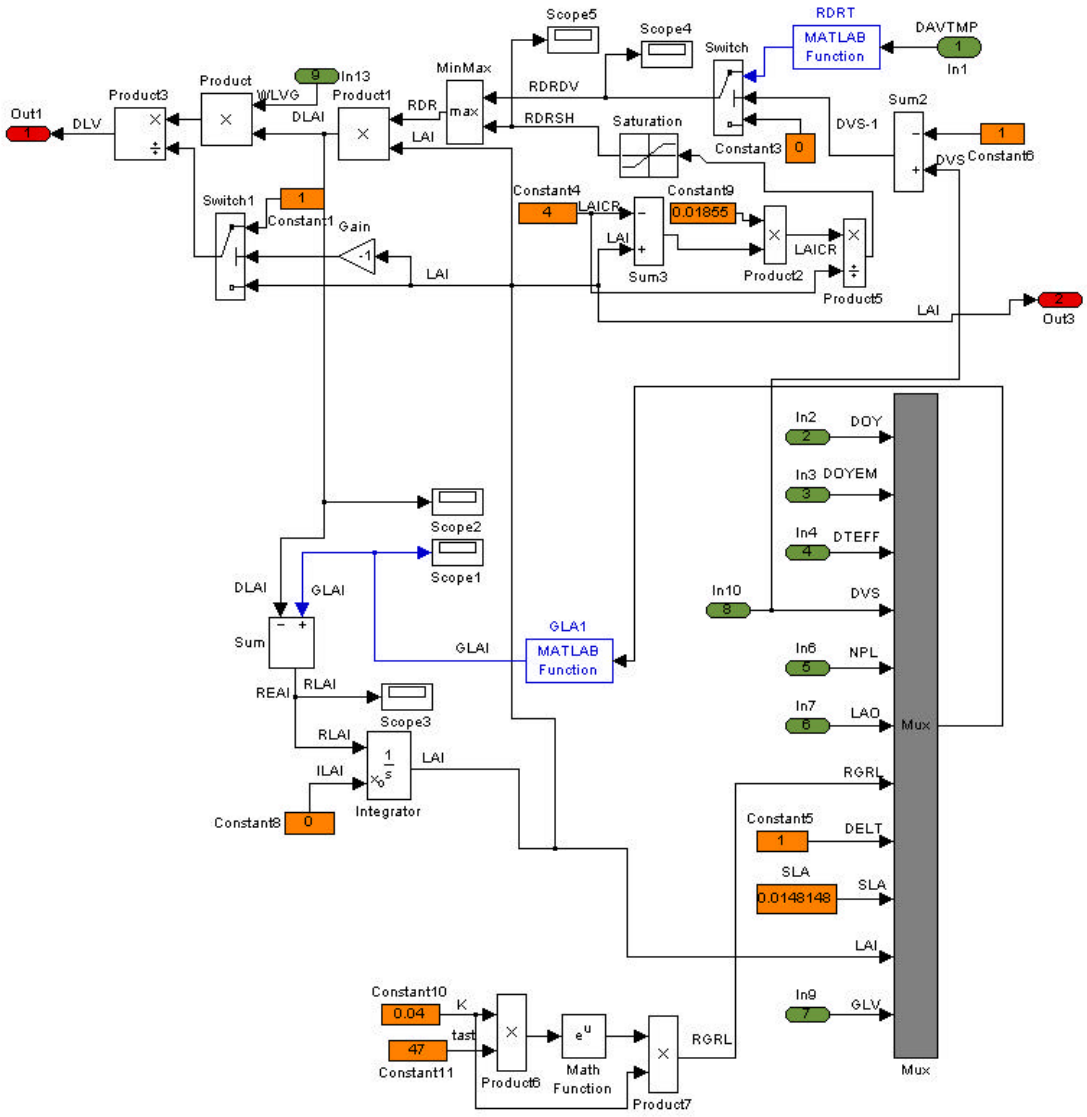
El valor total de requerimiento de asimilación para conversión de carbohidratos en materia seca (ASRQ, kg CH_2O/kg MS) para el cultivo común, es calculado como el peso medio del ASRQSO para los diferentes órganos de la planta. La asimilación requerida para producir una unidad de peso de un cierto órgano de la planta puede ser calculada desde su composición química y los requerimientos de asimilación de los diversos componentes químicos. Los valores típicos para raíces, hojas y tallos son: 1.444, 1.463 y 1.513 kg CH_2O/kg MS respectivamente. Los órganos de almacenamiento (granos, tubérculos, etc) varían mucho en su composición entre especies. Para mazorca de maíz es de

1.491 [kg CH_2O/kg MS] (Penning de Vries, et al, 1989, tabla 11). La razón de crecimiento de los diversos órganos de la planta, son obtenidos por multiplicar el total de la razón de crecimiento por la fracción asignada a los distintos órganos.

Después de la antesis, casi una fracción del 20% del peso de tallo supuesto a formar parte de la reserva de carbohidratos, es eventualmente translocado a los órganos de almacenamiento. La razón de translocación (TRANSL, kg MS/ha d] es introducido como un término de pérdida en la razón de crecimiento de tallos (GST), y agregada a el flujo de asimilado que está disponible para el crecimiento (GTW).

Después de la conversión a materia seca estructural, esos asimilados son sujetos a pérdidas debido a la respiración de crecimiento y, por lo tanto, dividida por el factor de requerimiento de asimilados ASRQ. Ninguna distinción es hecha entre asimilados asignados de la fotosíntesis actual (GPHOT) y las derivadas de la translocación. En suma, una pequeña pérdida de conversión ocurre cuando las reservas del tallo son presumiblemente removidas de hidrato de carbono a glucosa. La razón de translocación depende directamente sobre la razón de desarrollo, y es proporcional a un factor FRTRL que expresa la fracción eventualmente translocado. El valor de este factor puede ser determinado por prueba y error. Influye la pérdida del peso del tallo en el período de llenado del grano, y afectará el índice de cosecha final.

4.9 Desarrollo de hojas.



Programa 4.8. Desarrollo de hoja (bloque B8).

Dónde:

TAI – índice de área total [ha_{hoja}/ha_{tierra}]
LAI – índice de área de hoja [ha_{hoja}/ha_{tierra}]
ILAI – índice de área de hoja inicial [ha_{hoja}/ha_{tierra}]
GLAI – razón de crecimiento neto del índice de área de hoja [ha_{hoja}/ha_{tierra} d]
DLAI – razón de muerte del área de hoja [ha/ha d]
GLA – subrutina para calcular GLAI (ver Programa 4.12)
RDR – razón de muerte (senescencia) relativa de hojas [d^{-1}]
RDRDV – razón de muerte relativa debido al desarrollo del envejecimiento [d^{-1}]

RDRSH – razón de muerte relativa debido al auto-sombreo en alta LAI [d^{-1}]
RDRT – tabla de RDR como función de DAVTMP [d^{-1} °C]
DAVTMP – temperatura promedio diaria [°C]
LAICR – índice de área de hoja crítica más allá de cuya muerte o auto-sombreo ocurra [ha_{hoja}/ha_{tierra}]
WLVG – peso seco de hojas verdes [kg/ha]
NPL – densidad de planta [plant/m^2]
LAO – área de hoja inicial (en emergencia de campo) [m^2/plant]
RGRL – razón de crecimiento relativo de la hoja [ha/ha]

Parámetros:

NPL =6.25 [plant/m^2]
LAO = 0.000057 [m^2/plant]
LAICR = 4 [ha_{hoja}/ha_{tierra}]

Subrutina:

GLA – ver Programa 4.12, p. 91.

Función:

RDRT – ver Figura 5.9.1, p. 110.

El área de hojas verdes es el mayor determinante para la absorción de luz y asimilados de CO_2 del cultivo. El índice de área de hoja (LAI, ha_{hoja}/ha_{tierra}) sigue el balance entre la razón de crecimiento (GLAI, ha_{hoja} ha^{-1}_{tierra} d^{-1}) y la razón de senescencia (DLAI, ha/ha d). GLAI es calculado, dependiendo del desarrollo del estado fenológico, en la subrutina GLA. Antes de la emergencia de la planta (DOY < DOYEM), el GLA es igual a cero. En la emergencia, GLA = NPL*LAO/DELT. Después de la emergencia, la intensidad de luz y temperatura son los factores ambientales influyentes en la razón de la expansión del área de hoja.

Durante el crecimiento juvenil, la temperatura es el factor principal, así la razón de apariencia de hoja y tamaño de hoja final son forzados por la temperatura a través de su efecto sobre la división y extensión de la célula, en vez del suministro de asimilados. En estos estados cercanos, el área de hoja se incrementa de forma aproximada exponencialmente sobre el tiempo.

Una revisión de datos de campo no publicados sugiere que una aproximación segura es restringiendo la fase exponencial a la situación donde LAI < 0.75 y/o DVS < 0.3.

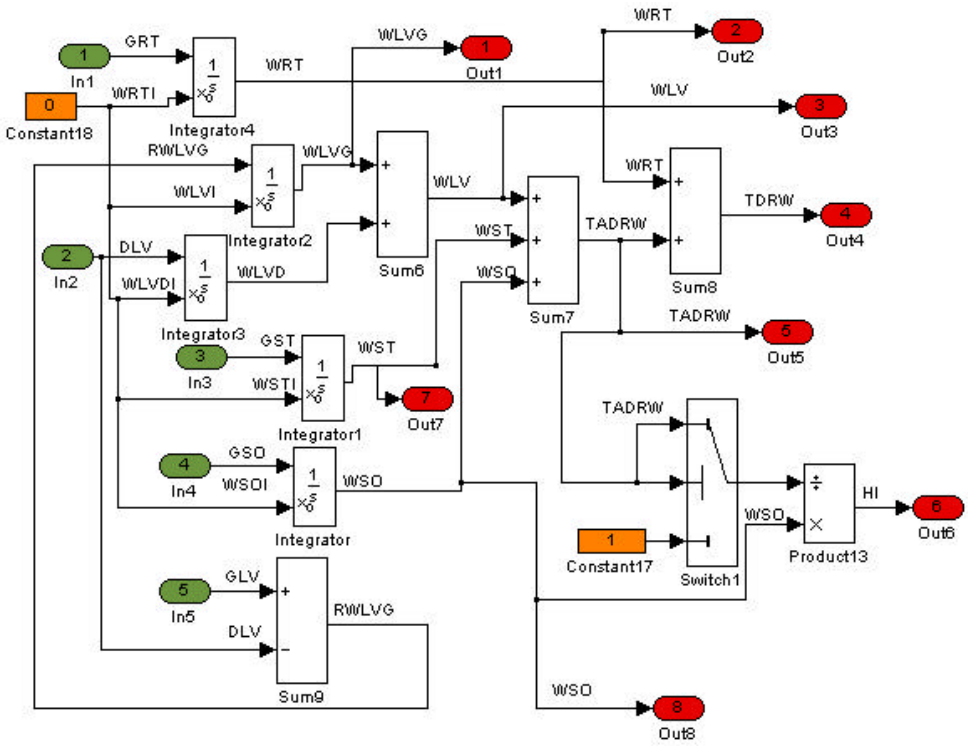
En estados de desarrollo siguientes, la expansión del área de hoja es cada vez más restringida por el suministro de asimilados. El mutuo sombreo de plantas adicional reduce el suministro de asimilados por puntos de crecimiento. Durante este estado (LAI > 0.75 y DVS > 0.3), el modelo calcula el crecimiento del área de hoja multiplicando el aumento simulado en peso de hoja (GLV) por el área específica de hoja de las nuevas hojas (SLA, ha/kg)

La razón de senescencia del LAI (DLAI, d^{-1}) es descrita sobre las bases de una razón de muerte relativa (RDR, d^{-1}), puesto en la máxima de una razón de muerte relativa debido al envejecimiento (RDRDV) y primero debido al auto-sombreo, RDRSH.

RDRDV iguales a cero tanto como DVS < 1 (estado de pre-antesis) y es una función de la temperatura diaria promedio (DAVTMP, °C) para DVS > 1.

La razón de muerte de hojas (DLV, kg/ha) es definido como la razón de senescencia relativa de LAI veces el peso de las hojas verdes (WLVG).

4.10 Producción de materia seca.



Programa 4.9. Producción de materia seca (bloque B9).

Dónde:

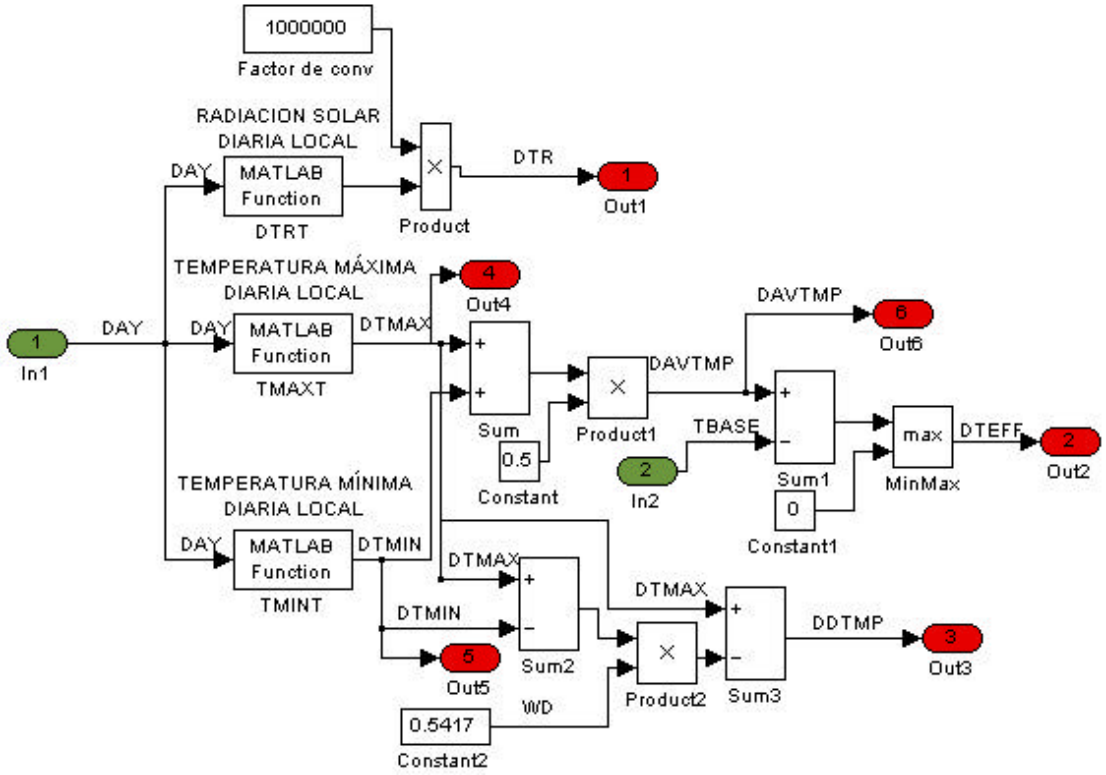
WRT – peso seco inicial de las raíces [kg/ha]
GRTI – razón de crecimiento de la materia seca de raíces [kg MS/kg_{tierra} d]
WLVI – peso seco inicial de las hojas [kg/ha]
RWLVG – razón de peso seco de hojas verdes [kg_{hoja} MS/ha d]
DLV – razón de muerte de hojas [kg_{hoja}/ha d]
WLVD – peso seco de las hojas muertas [kg/ha]
WLVDI – peso seco inicial de las hojas muertas [kg/ha]
WSTI – peso seco inicial de los tallos [kg/ha]
GST – razón de crecimiento de materia seca de tallos [kg MS/ha_{tierra} d]
WSOI – peso seco inicial de órganos de almacenamiento [kg/ha]
GSO – razón de crecimiento de materia seca de tallos [kg MS/ha_{tierra} d]
TADRW – total de materia seca sobre la tierra [kg MS/ha]
TDRW – biomasa total [kg MS/ha]

Los pesos secos de los diversos órganos de la planta: raíces (WRT), hojas verdes (WLVG), hojas muertas (WLVD), tallos (WST), órganos de almacenamiento (WSO) es obtenido a través de la integración de la razón de crecimiento respectivo.

Totales de la producción de materia seca como total de materia seca sobre la tierra (TADRW) (el cual no contempla el peso de la materia seca de la raíz) y biomasa total (TDRW), forman parte de los datos de salida.

El índice de cosecha (HI) es el peso de los granos divididos por la biomasa sobre la tierra.

4.11 Datos del tiempo.



Programa 4.10. Datos de tiempo atmosférico (bloque B10).

Dónde:

DTR – radiación solar diaria [J/m^2 d]
DTRT – tabla de DTR como función del día del año[J/m^2 d, d]
DAY – número del día desde el 1° enero (día del año) [d]
DTMAX – temperatura máxima diaria [°C]
DTMIN – temperatura mínima diaria [°C]
TMAXT – tabla de temperatura máxima diaria como función del día del año [°C, d]
TMINT – tabla de temperatura mínima diaria como función del día del año [°C, d]
DAVTMP – temperatura promedio diaria [°C]
DDTMP – temperatura del día (salida y puesta del sol) promedio diaria [°C]
TBASE – temperatura base para el crecimiento del área de hoja juvenil [°C]
DTEFF – temperatura efectiva diaria [°C]
WD – peso de la temperatura mínima

Parámetro:

TBASE = 10 [°C]
WD = 0.5417 [-]

Funciones:

DTRT – ver Figura 3.3.1, p. 66.
TMAXT – ver Figura 3.3.2, p. 67.
TMINT – ver Figura 3.3.3, p. 67.

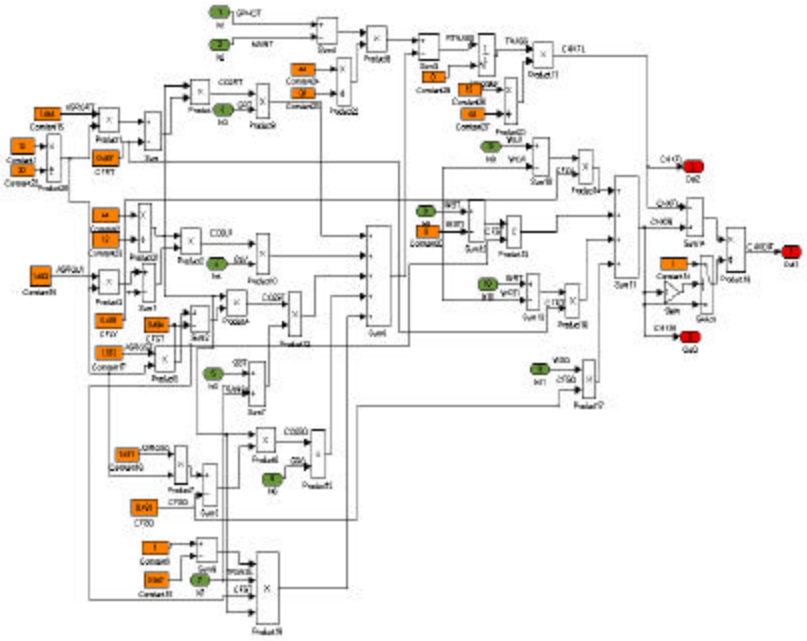
Las temperaturas máximas y mínimas diarias (DTMAX y DTMIN, respectivamente, °C) son leídos desde las funciones TMAXT y TMINT conteniendo valores medidos para todos los días del año. Para la temperatura del día (DDTMP) usamos la fórmula aproximada:

$$DDTMP = DTMAX - 0.5417(DTMAX+DTMIN)$$

Muchos procesos de crecimiento son dependientes de la temperatura la cual debe estar arriba de un cierto umbral, un valor para la temperatura efectiva (DTEFF), es calculada.

Los datos del tiempo dados en el modelo son promedios semanales (definidos a la mitad de cada semana). La variable independiente es el número de día actual del año (DAY).

4.12 Comprobación del balance de carbón.



Programa 4.11. Revisión del balance de carbón (bloque B11).

Dónde:

CHKIN – carbón en el cultivo acumulado desde el inicio de la simulación [kgC/ha]
CHKFL – suma de flujos de carbón integrado dentro y fuera del cultivo [kgC/ha]
CFLV – fracción de masa de carbón en las hojas [kgC/kg MS]
CFST – fracción de masa de carbón en los tallos [kgC/kg MS]
CFRT – fracción de masa de carbón en las raices [kgC/kg MS]
CFSO – fracción de masa de carbón en los órganos de almacenamiento [kgC/kg MS]
TNASS – asimilación total neta de CO_2 [kg CO_2/ha]
RTNASS –
CO2RT – factor de producción de CO_2 para crecimiento de raices [kgCO_2/kg MS]
CO2LV – factor de producción de CO_2 para crecimiento de hojas [kgCO_2/kg MS]
CO2ST – factor de producción de CO_2 para crecimiento de tallos [kgCO_2/kg MS]
CO2SO – factor de producción de CO_2 para crecimiento de órganos de almacenamiento [kgCO_2/kg MS]
CHKDIF – diferencia entre el carbón agregado al cultivo desde la inicialización y el total neto de flujo de carbono integrado, relativo a su suma [-]

Parámetros:

CFLV = 0.459 [kgC/kg MS]
CFST = 0.494 [kgC/kg MS]
CFRT = 0.487 [kgC/kg MS]
CFSO = 0.491 [kgC/kg MS]

La comprobación del balance de carbón compara la cantidad de carbón presente en todos los órganos en cualquier punto en el tiempo, con la integral de la razón de asimilación de carbón neto (TNASS). Esta razón consiste de asimilación bruta (DTGA), menos la respiración de mantenimiento (MAINT), menos las pérdidas debido a la respiración de crecimiento. Esas pérdidas respiratorias por crecimiento, son definidas como la razón de crecimiento de los órganos multiplicado por sus factores de producción de CO_2 (CO2RT, CO2LV, etc) y la suma de la pérdida (una fracción 1 – 0.947) que ocurre durante la remobilización de hidratos de carbono a glucosa.

En la práctica, los dos términos CHKIN y CHKFL nunca deberían diferir por más que una fracción de 10^{-6}. Una desviación relativa más grande (en la mayoría de los casos del orden de unos poco por cientos) será una señal segura de omisión de un término en alguna parte en el programa (CHKDIF), y la simulación se detendrá.

4.13 Control del programa.

En el ejemplo dado, la emergencia de la plántula es el día del año número 150 *i.e* 31 de Mayo (parámetro DOYEM = 150).

La simulación se detiene si el cultivo está maduro. Esto ocurre si el estado de desarrollo alcanza el valor 2.

El tiempo de inicio de la simulación es el día de la emergencia (150) y el tiempo de finalización es puesto al día 280 (el cultivo dura130 días hasta la madurez).

4.14 SUBRUTINAS

4.14.1 SUBRUTINA GLA.

```
function [OUT] = GLA(u)

DOY = u(1);
DOYEM = u(2);
DTEFF = u(3);
DVS = u(4);
NPL = u(5);
LAO = u(6);
RGRL = u(7);
DELT =u(8);
SLA = u(9);
LAI = u(10);
GLV = u(11);

%Crecimiento durante el estado de maduración
GLAI = SLA*GLV;

%Crecimiento durante el estado juvenil

if ((DVS < 0.3) & (LAI < 0.75)),
   GLAI = (LAI*(exp(RGRL*DTEFF*DELT)-1))/DELT;
end
%Crecimiento al día de la emergencia
if ((DOY >= DOYEM) & (LAI == 0)),
   GLAI = 5100*(1-exp(-0.04*(200*exp(-exp(0.04*47)))));
end

if DOY < DOYEM
   GLAI = 0;
end
OUT=GLAI;
end
```

Programa 4.12. GLA, cálculo del área de hoja.

Esta subrutina calcula el aumento diario del índice de área de hoja ($ha_{hoja}/ha_{tierra}/d$), desde la emergencia de la planta, hasta la maduración pasando por la etapa juvenil. Se utiliza el valor de la etapa de desarrollo (DVS) para definir en que momento se encuentra el cultivo al momento de llevarse a cabo los cálculos.

4.14.2 SUBROUTINA TOTASS.

```
function [OUT] = TOTASS(u)
DOY = u(1);
LAT = u(2);
DTR = u(3);
SCP = u(4);
AMAX = u(5);
EFF = u(6);
KDF = u(7);
LAI = u(8);
SC = u(9);
SINLD = u(10);
COSLD = u(11);
DAYL = u(12);
DSINB = u(13);
FGROS = u(14);

XGAUSS=[0.112702 0.500000 0.887298];
WGAUSS=[0.277778 0.444444 0.277778];

PI = 3.141592654;


%puesta a cero la asimilación a tres diferentes tiempos del día (hora)

DTGA = 0;

for i=1:3,
  % en la hora especificada, la radiación es calculada
  %y usada para calcular la asimilación

  HORA = 12+DAYL*0.5*XGAUSS(1,i);

  %seno de la elevación solar

  X1 = [0 SINLD+COSLD*cos(2*PI*(HORA+12)/24)];
  SINB = max(X1);

  %fracción de luz difusa (FRDF) por transmisión de la atmósfera (ATMTR)

  PAR = 0.5*DTR*SINB*(1+0.4*SINB)/DSINB;
  ATMTR = PAR/(0.5*SC*SINB);

  if ATMTR <= 0.22
    FRDF = 1;
  elseif ATMTR > 0.22 & ATMTR <= 0.35
    FRDF = 1-6.4*(ATMTR-0.22)^2;
  else FRDF = 1.47-1.66*ATMTR;
  end

  X2 = [FRDF 0.15+0.85*(1-exp(-0.1/SINB))];
  FRDF = max(X2);
```

```
  % PAR difuso (PARDF) y PAR directo (PARDR)

  PARDF = PAR*FRDF;
  PARDR = PAR-PARDF;


  %Integración de la razón de asimilación para un total diario (DTGA)

  DTGA = DTGA+FGROS*WGAUSS(1,i);
end

DTGA = DTGA*DAYL;
OUT=[DTGA,PARDR,PARDF];
```

Programa 4.13. TOTASS, cálculo de la asimilación bruta total diaria.

Esta subrutina calcula la asimilación bruta total diaria (DTGA) por rendimiento en integración Gaussiana (Goudriaan J., 1994, apéndice 2, p. 177), sobre el tiempo. A tres diferentes tiempos del día, la radiación es calculada y usada para determinar la asimilación donde quiera que la integración tome lugar.

4.14.3 SUBROUTINA ASSIM.

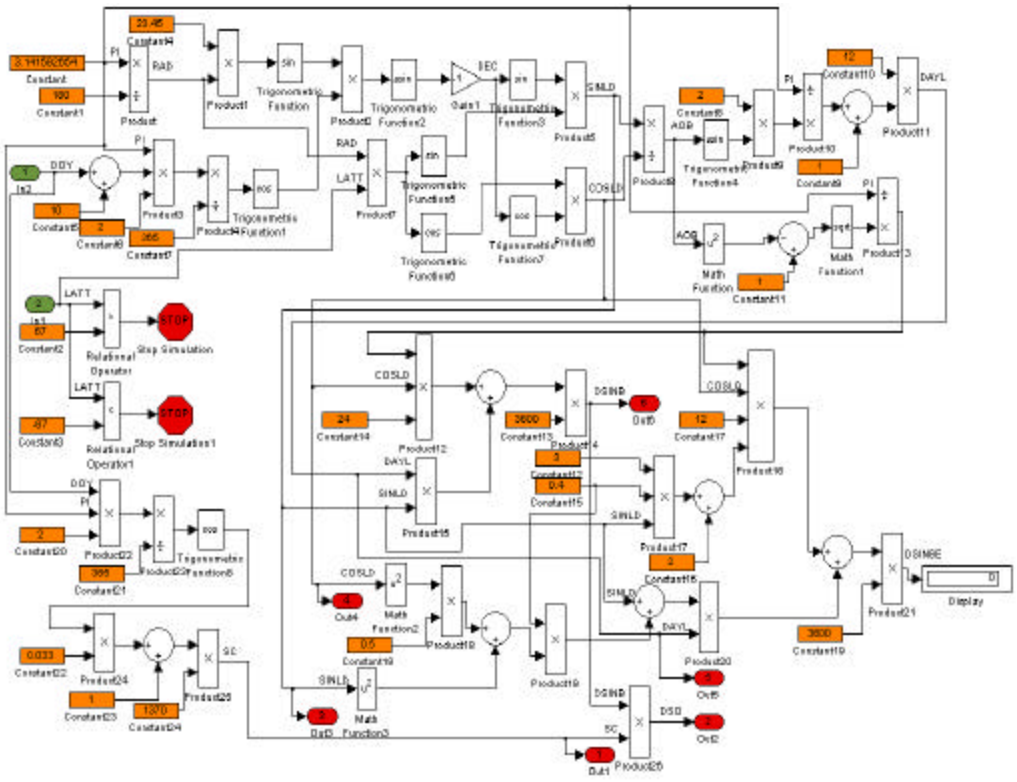
```
function [OUT] = ASSIM(u)

SCP = u(1);
AMAX = u(2);
EFF = u(3);
KDF = u(4);
LAI = u(5);
SINB = u(6);
PARDR = u(7);
PARDF = u(8);

XGAUSS=[0.0469101 0.2307534 0.5 0.7692465 0.9530899];
WGAUSS=[0.1184635 0.2393144 0.2844444 0.2393144 0.1184635];

%reflección del ángulo de distribución de la hoja, horizontal y esférica.

SQV=sqrt(1-SCP);
REFH=(1-SQV)/(1+SQV);
REFS=REFH*2/(1+2*SINB);

% coeficiente de extinción por radiación directa y flujo directo total.
CLUSTF=KDF/(0.8*SQV);
KBL=(0.5/SINB)*CLUSTF;
KDRT=KBL*SQV;

%selección de profundidad del dosel, la asimilación del dosel es clocada en cero.
FGROS=0;
```

```
for i=1:5

LAIC=LAI*XGAUSS(1,i);

%flujo absorbido por unidad de área de hoja: flujo difuso, directo total, flujo, componente directo del flujo directo.
VISDF=(1-REFH)*PARDF*KDF*exp(-KDF*LAIC);
VIST=(1-REFS)*PARDR*KDRT*exp(-KDRT*LAIC);
VISD=(1-SCP)*PARDR*KBL*exp(-KBL*LAIC);

%flujo absorbido (J/m2 hoja/s) para hojas sombreadas y asimilación de hojas sombreadas.

VISSHD=VISDF+VIST-VISD;
if AMAX>0
  FGRSH=AMAX*(1-exp(-VISSHD*EFF/AMAX));
else
  FGRSH=0;
end

  %flujo absorbido directo por hojas perpendiculares sobre rayos directo y asimilación de área de hoja iluminada.
  VISPP=(1-SCP)*PARDR/SINB;
  FGRSUN=0;

  for j=1:5

  VISSUN=VISSHD+VISPP*XGAUSS(1,j);

  if AMAX>0
    FGRS=AMAX*(1-exp(-VISSUN*EFF/AMAX));
  else
    FGRS=0;
  end
    FGRSUN=FGRSUN+FGRS*WGAUSS(1,j);
  end

    %fracción de área de hoja iluminada (FSLLA)y razón de asimilación local (FGL).
    FSLLA=CLUSTF*exp(-KBL*LAIC);
    FGL=FSLLA*FGRSUN+(1-FSLLA)*FGRSH;

    %integración de la razón de asimilación local para la asimilación del dosel (FGROS).
    FGROS=FGROS+FGL*WGAUSS(1,i);
  end

  FGROS=FGROS*LAI*0.5;
  OUT=FGROS;
```

Programa 4.14. ASSIM, integración de la asimilación del dosel.

Esta subrutina realiza una integración Gaussiana sobre la profundidad del dosel por selección de tres diferentes índice de área de hoja y calculo de la asimilación de esos niveles de LAI. La variable integrada es FGROS.

4.14.4 SUBROUTINA ASTRO*.



Programa 4.15. ASTRO, cálculo de la longitud del día astronómico.

Esta subrutina calcula la longitud del día astronómico, las características de la radiación diurna tal como la integral diaria del seno de elevación solar y constante solar.

* Esta subrutina se pudo realizar en Simulink®.

Capítulo 5. Modificaciones y ajustes del programa SUCROS para el maíz (híbrido HS-2).

5.1 Procedimiento utilizado para el ajuste del programa SUCRO.

El programa SUCROS presentado en Goudriaan J. (1994) está ajustado para la simulación del trigo primaveral sembrado en Holanda. Para adaptar el programa SUCROS al cultivo del maíz (híbrido HS-2) sembrado en los campos de la U. A. Chapingo, se debe de tener en consideración principalmente al índice de área de hoja (LAI). Lo cual como se ha descrito al principio de la tesis (ver p. 33), es importante, ya que a mayor área de hoja, mayor captación de radiación solar. Según la literatura (Vilain, 1997, v1, p. 373), el LAI de la hoja para el maíz tiene un valor entre 10 y 12, a diferencia del trigo que tiene un LAI 4. Con esta información, es necesario simular primeramente el programa con el LAI predeterminado por nuestras experiencias de campo, para lograr nuestro objetivo de reajuste para esta variedad de maíz i.e. que SUCROS simule el crecimiento del maíz. De esta manera podremos obtener el comportamiento del LAI en periodo de crecimiento. Para llevar a cabo esto, una vez obtenido las ecuaciones que modela el LAI, el bloque es insertado en el programa SUCROS y el LAI calculado por el programa es desconectado. Esto es, se substituye el LAI calculado por el programa por el obtenido en las mediciones de campo; de esta manera se procede al ajuste de los parámetros en los demás bloques del programa SUCROS para el maíz (híbrido HS-2).

5.1.1 Consideraciones.

Buscando la forma de llegar a obtener un LAI que nos sirva de patrón de ajuste del programa, se interpoló una curva de Gompertz (Roderick Hunt, 1982) a la curva de la materia seca contra el tiempo, como se muestra a continuación en la siguiente ilustración:

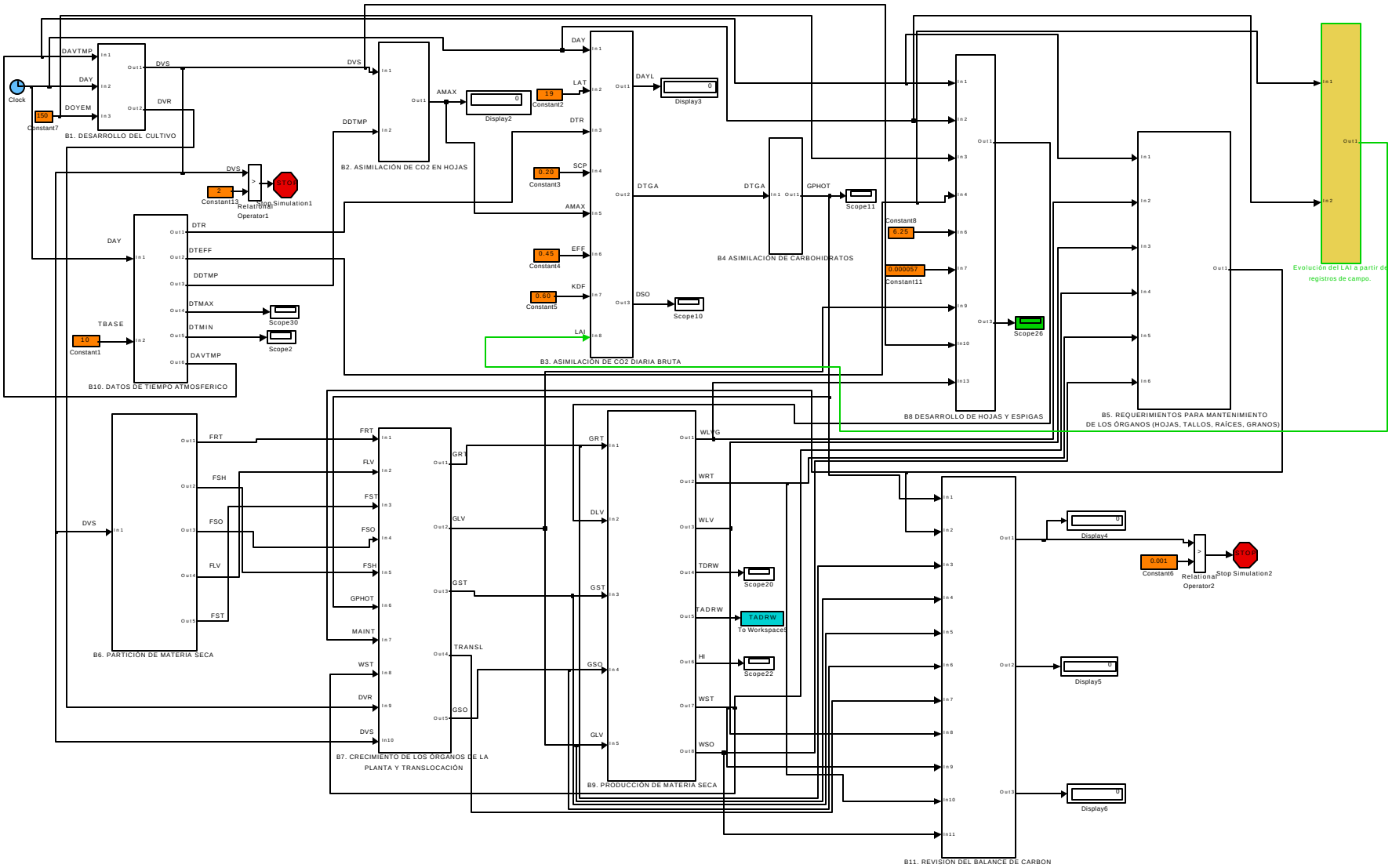


Figura 5.1.1. Sustitución del LAI calculado por SUCROS por el obtenido en las mediciones de campo.

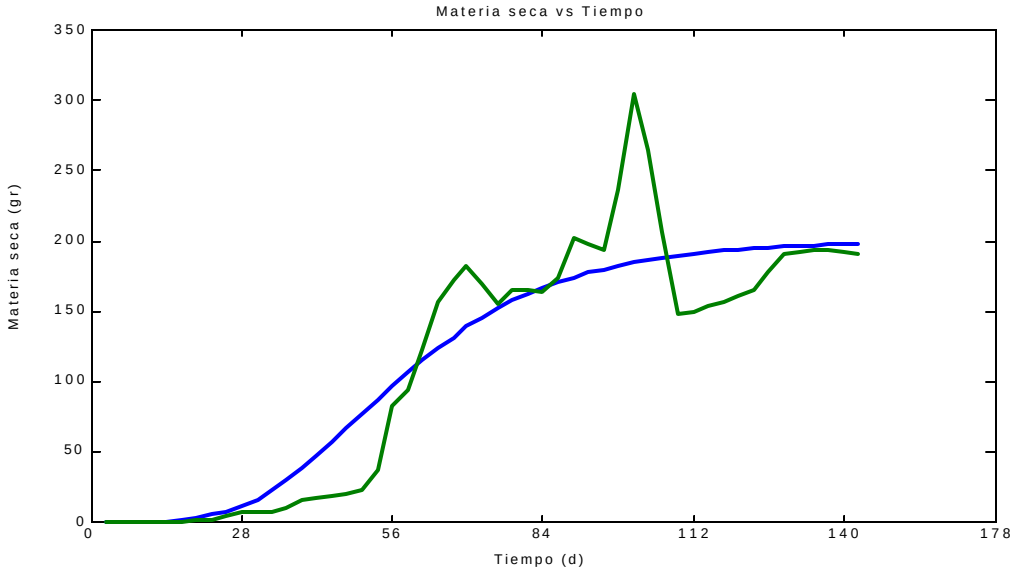


Figura 5.1.2. Interpolación de la curva de la evolución del peso seco con respecto al tiempo del experimento de campo contra una curva Gompertz.

De la misma manera, se encontró la curva que interpolará a la evolución del área de hoja contra la materia seca. Esto se obtuvo con una curva exponencial; el resultado se muestra en la siguiente ilustración:

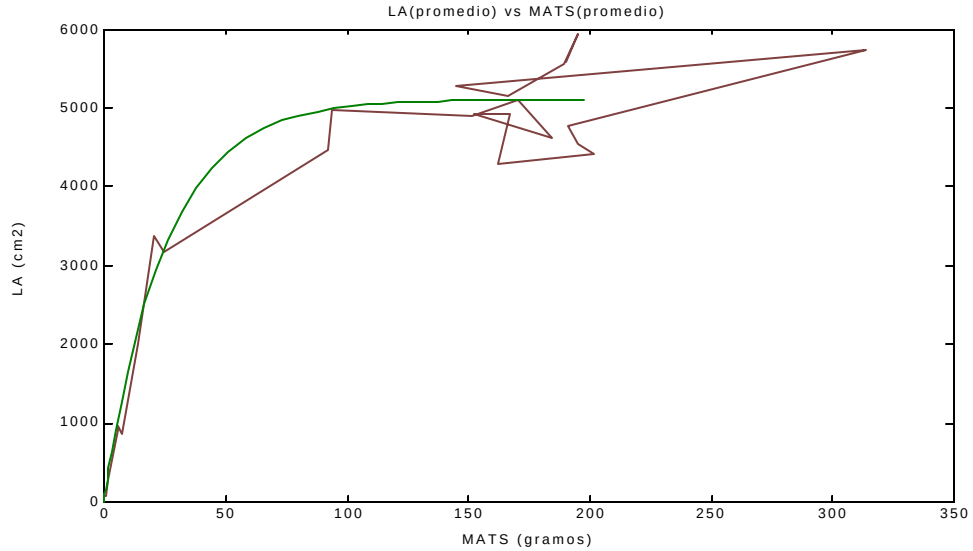


Figura 5.1.3. Interpolación de la curva de peso fresco contra el área de hoja con una curva exponencial.

De esta manera estamos obteniendo la evolución del índice de área de hoja (LAI) con respecto al tiempo como la respuesta de dos sistemas conectados en cascada. El primer sistema caracteriza la respuesta de la materia seca (MS) con respecto al tiempo (t) y el segundo sistema caracteriza la respuesta del área de hoja (LA) con respecto a la materia seca (ver Figura 5.1.4). Para luego dividirse

entre un factor de área de la superficie de terreno (Ap) y obtener el índice de área de hoja (LAI).

Se procedió de esta manera debido a que no fue posible interpolar una curva conocida a la respuesta del índice de área de hoja contra el tiempo. Pero si lo fue para los casos particulares de materia seca contra tiempo y área de hoja contra materia seca.

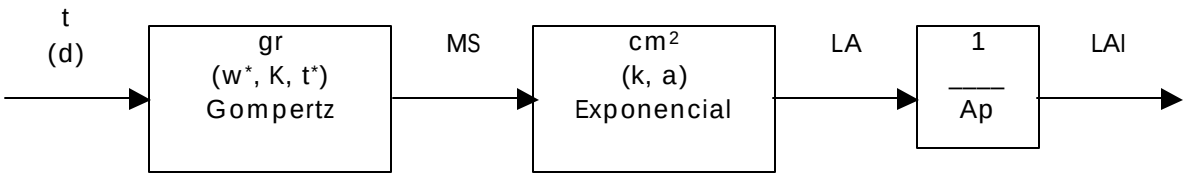


Figura 5.1.4. Evolución del índice de área de hoja con respecto al tiempo como respuesta de sistemas conectados en cascadas (Gumpertz, exponencial y factor divisor).

5.1.2 Ecuación de Gompertz.

Como primer paso, obtenemos las ecuaciones que nos dan la razón de cambio de la materia seca, w, con respecto al tiempo, t. La ecuación de Gompertz es:

$$w = w^{*}\exp(-\exp(-K(t-t^{*}))) \qquad \textbf{Ec. 1}$$

Que es solución de las ecuaciones diferenciales siguientes:

$$\frac{dw}{dt} = \bar{K}\, mw; \qquad \textbf{Ec. 2}$$

$$\frac{dm}{dt} = -Km; \qquad \textbf{Ec. 3}$$

Dónde, las condiciones iniciales son las siguientes:

$$m_0 = e^{\bar{K}\, t^{*}} \qquad \textbf{Ec. 4}$$

$$w_0 = w^{*} e^{-m_0} \qquad \textbf{Ec. 5}$$

Donde:

$w^{*} = 200$; $K = 0.07$; $t^{*} = 329.8$;

Los valores de w^{*}, K y t^{*} son obtenidos de forma empírica, como se explica a continuación:

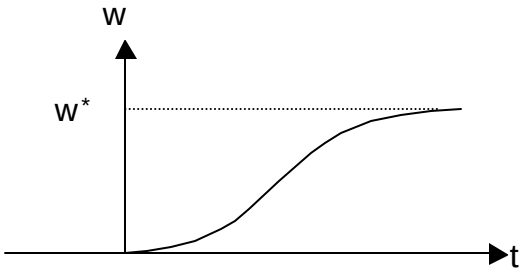


Figura 5.1.5. Gráfica de w vs t.

1. De la gráfica de w contra t anterior, se obtiene el valor de w* que es el valor en estado permanente.

2. Los valores de K y t* son determinados a partir de la linealización de w, i.e.

$$Ln\left(Ln\left(\frac{w^*}{w}\right)\right) = -K(t-t^*) \qquad \textbf{Ec. 6}$$

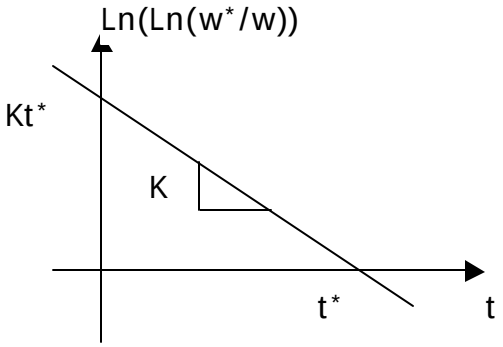


Figura 5.1.6. Linealización de w.

Donde la pendiente de la recta es -K y cruza el eje de las abcisas en t*.

A continuación se muestra la simulación por bloque de la ecuación diferencial de Gompertz:

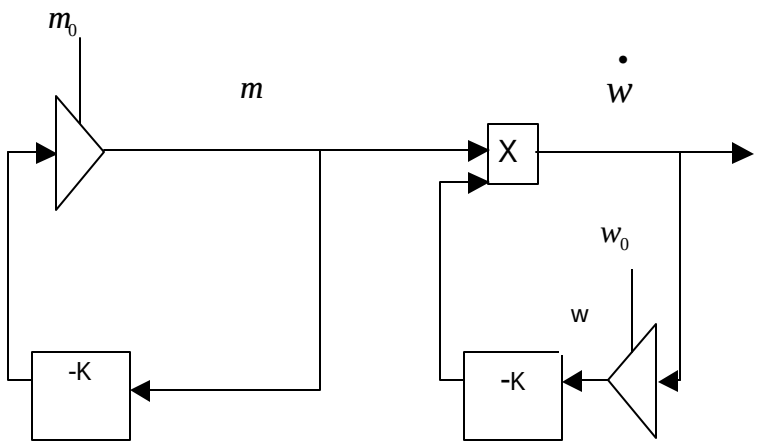


Figura 5.1.7. Ecuación de Gompertz en forma de bloques.

5.1.3 Ecuación exponencial.

Como segundo paso, obtenemos la ecuación que nos da la razón de cambio del área de hoja, *y*, con respecto a la materia seca, *w*.

La ecuación exponencial es:

$$y = k\left[1 - e^{-aw}\right] \qquad \textbf{Ec. 7}$$

Dónde:

k = 5100; a = 0.04; valores que fueron obtenidos por ajuste de la curva.

Los valores de k y de a son obtenidos en forma empírica, como se explica a continuación:

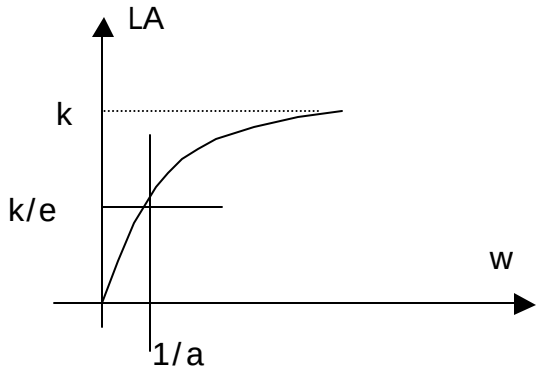


Figura 5.1.8. Obtención de los valores de k y de a por medio de gráfica.

1. De la gráfica de LA contra W se obtiene el valor de k, el cual es el valor en estado permanente.
2. El valor de *a* se obtiene por interpolación.

A fin de contar con una ecuación diferencial que describa el comportamiento temporal de *y*, derivamos esta ecuación con respecto a *w*, i.e.

$$\frac{dy}{dw} = kae^{-aw}; \qquad \frac{dy}{dw} = ka\left[1-\frac{y}{k}\right] = a[k-y] \qquad \textbf{Ec. 8}$$

Despejando *dw* nos queda:

$$dy = a[k-y]dw \qquad \textbf{Ec. 9}$$

Lo cual implica:

$$\dot{y} = a[k-y]\dot{w} \qquad \textbf{Ec. 10}$$

La condición inicial es:

$$y_0 = k(1-\exp(-a(w^* \exp(-\exp(Kx47))))) \qquad \textbf{Ec. 11}$$

La simulación por bloques es:

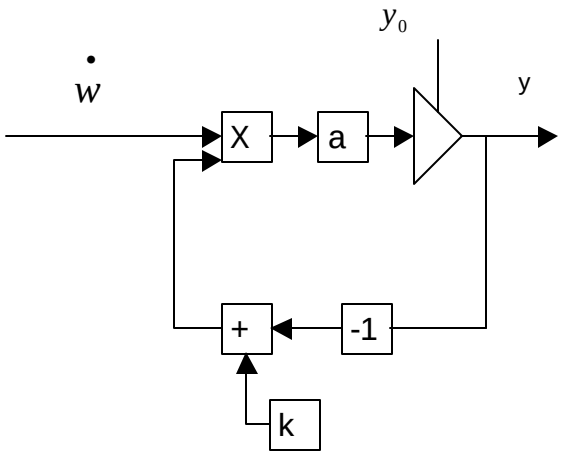


Figura 5.1.9. Ecuación exponencial en forma de bloque para calcular el área de hoja.

5.1.4 Influencia de los grados días de desarrollo en las ecuaciones de Gompertz y exponencial.

La duración fisiológica de un cultivo, es decir el tiempo entre la emergencia y la madurez fisiológica, es constante para cada cultivo. Observaciones prácticas han mostrado que la duración fisiológica de los cultivos es proporcional a la temperatura del medio ambiente. Esto es, la razón de desarrollo de procesos de muchas plantas (como los estados fenológicos) son fuertemente dependiente de la temperatura (Jones H. G., 1992); esto es, todo cultivo tiene una constante térmica llamada grados días de desarrollo. Los GDD es la acumulación de la temperatura durante todo el ciclo del cultivo desde la emergencia de éste hasta su madurez fisiológica y se expresa en °C día.

El programa de simulación SUCROS está basado en los grados días de desarrollo (GDD) y no en el tiempo, por lo que tenemos que tomar en cuenta los GDD en las ecuaciones diferenciales descritas anteriormente.

Partiendo de la gráfica de GDD, podemos obtener una ecuación que nos ayudará a precisar las ecuaciones anteriores (Gompertz y exponencial), en función de los GDD.

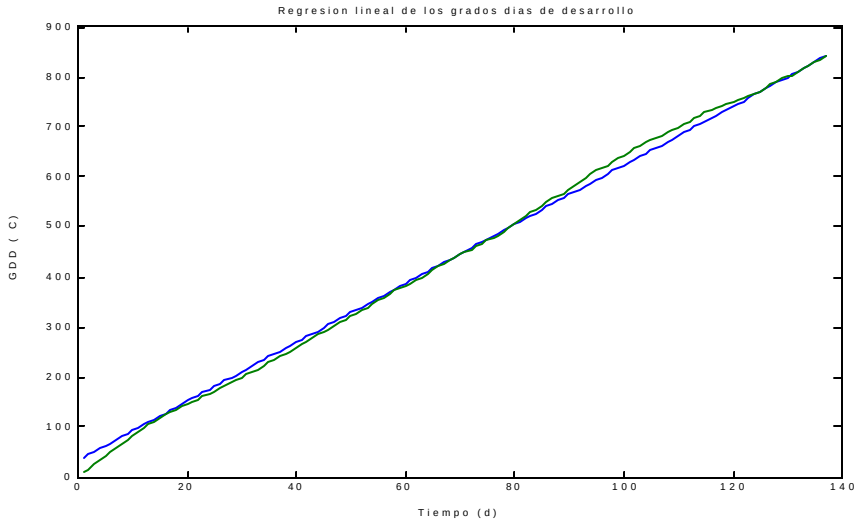


Figura 5.1.10. Gráfica de GDD y su interpolación con una temperatura base de 10° C.

En la Figura 5.1.10, se muestra la gráfica de GDD y una interpolación lineal tomando como temperatura base a 10° C. De esta gráfica se tiene la ecuación que determina la recta interpolada.

Esto es:

$$g = mt + b\,; \qquad \textbf{Ec. 12}$$

Dónde:

g – grados días de desarrollo.
m – pendiente = 5.8933.
b – parámetro constante = 27.5213.

Derivando esta ecuación se obtiene la siguiente relación entre los GDD y el tiempo:

$$dg = mdt; \qquad \textbf{Ec. 13}$$

Ahora utilizamos la ecuación de la razón de cambio de la materia seca (ec. 2);

para obtener:

$$\frac{dw}{dg} = \frac{K}{m} mw = \bar{K}\, mw; \qquad \textbf{Ec. 14}$$

De forma similar utilizamos la ecuación 3;

para obtener:

$$\frac{dm}{dg} = -\frac{K}{m} m = -\bar{K}\, m; \qquad \textbf{Ec. 15}$$

dónde:

$$\bar{K} = \frac{K}{m}; \qquad \textbf{Ec. 16}$$

De la gráfica de GDD, también podemos deducir la ecuación de la curva aproximada:

$$g_r(t) = \int_0^t Ted\mathbf{t} + T_{e0}; \qquad \textbf{Ec. 17}$$

Dónde T_e es la temperatura efectiva diaria, esto es, la temperatura real del día para el cultivo, y una práctica común para calcular T_e es la siguiente:

$$T_e = \left(\frac{T_M + T_m}{2} \right) - T_b; \qquad \textbf{Ec. 18}$$

Dónde:

T_M – Temperatura máxima del día.
T_m – Temperatura mínima del día.
T_b – Temperatura base del cultivo. Para el caso del maíz T_b = 10° C.

Derivando la ecuación 17 obtenemos:

$$\frac{d}{dt} g_r(t) = T_e(t); \qquad \textbf{Ec. 19}$$

Despejando dt:

$$dg_r(t) = T_e(t)dt\,; \qquad \textbf{Ec. 20}$$

Sustituyendo esta ecuación en 14 y 15 obtenemos las siguientes ecuaciones diferenciales afectadas por la temperatura efectiva:

$$\frac{dw}{dt} = \bar{K}\,T_e m w\,; \qquad \textbf{Ec. 21}$$

$$\frac{dm}{dt} = -\bar{K}\,T_e m\,; \qquad \textbf{Ec. 22}$$

Con las ecuaciones 7, 21 y 22, el programa para el cálculo del área de hoja modificado queda como se muestra en la siguiente ilustración:

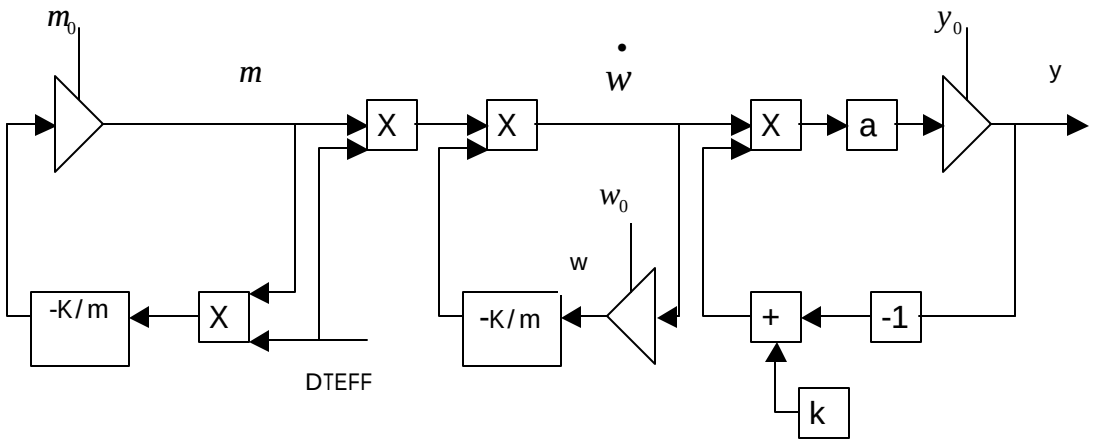


Figura 5.1.11. Ecuaciones en forma de bloque para el cálculo del área de hoja afectado por los grados días de desarrollo (GDD).

5.1.5 Modificaciones a las condiciones iniciales en función de GDD.

Las condiciones iniciales de w y de μ han sido modificadas debido a los GDD, su ajuste queda como se muestra a continuación:

$$m_0 = e^{\frac{K}{m}t^*} \qquad \textbf{Ec. 23}$$

$$w_0 = w^* \exp(-\exp(m_0)) \qquad \textbf{Ec. 24}$$

Donde:

K = 0.04
m = 5.8933
t^* = 329.8
w^* = 200

5.2 Desarrollo del cultivo.

Las fechas de los estados de desarrollo fenológico son propias de cada cultivo, y aún entre la misma especie. Por medio del experimento de campo es como se obtuvo estos datos y se modificó la tabla de la razón de desarrollo DVR en fase pre-antesis como función de la temperatura (DVRVT) y la tabla de la razón de desarrollo (DVR) en fase post-antesis como función de la temperatura (DVRRT), quedando de la siguiente forma:

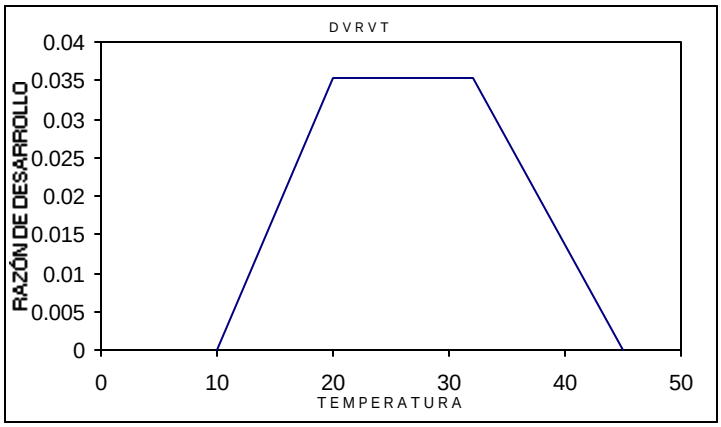


Figura 5.2.1. Tabla de la razón de desarrollo DVR en fase pre-antesis como función de la temperatura (DVRVT), basado en Goudriaan, 1994, p. 187, modificado para el maíz (híbrido HS -2).

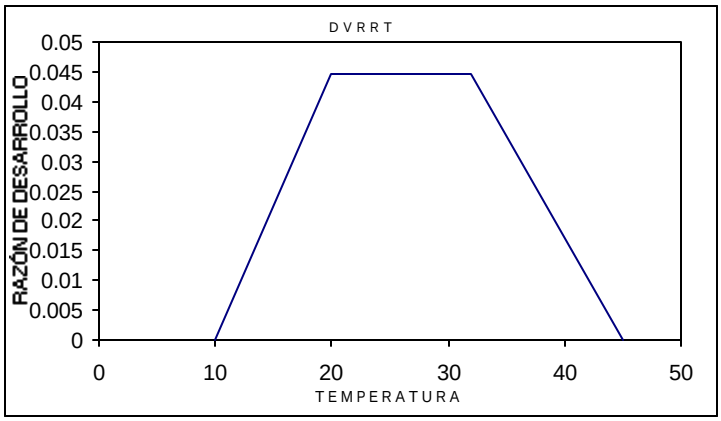


Figura 5.2.2. Tabla de la razón de desarrollo (DVR) en fase post-antesis como función de la temperatura (DVRRT), basado en Goudriaan, 1994, p. 187, modificado para el maíz (híbrido HS -2).

Los puntos del eje de las abcisas (temperatura) se ajustaron en base a:

1. La temperatura base para el maíz es de 10° C.
2. La temperatura óptima para la fructificación es de 25 a 35° C.

3. Después de los 30° C pueden aparecer problemas serios debido a mala absorción de nutrientes, minerales y agua.

Para la determinación de los estados en el cultivo del maíz (híbrido HS-2), se ha seguido las indicaciones de J. Hanway John (1971), el cual se basa en las observaciones físicas tanto externa como interna de la planta.

5.3 Asimilación de CO_2 en hojas.

La modificación de la función del factor de conteo por efecto de la temperatura del día (AMTMPT), se hizo tomando en cuenta la temperatura base del maíz.

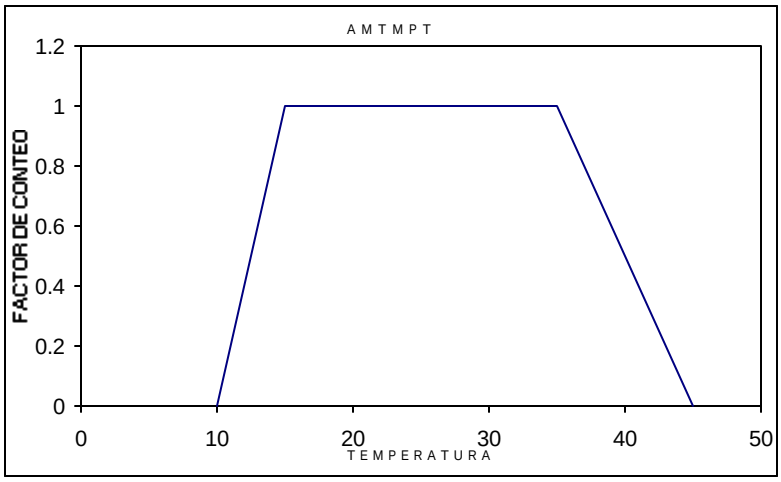


Figura 5.3.1. Tabla del factor de conteo por efecto de la temperatura del día (AMTMP) sobre AMX como función de la temperatura diaria promedio del día (DDTMP), basado en Goudriaan, 1994, p. 187, modificado para el maíz (híbrido HS -2).

El valor del potencial de la razón de asimilación de CO_2 a saturación de luz para hojas individuales (AMX), se tomó de la literatura con un valor de 16 kgCO_2 $ha^{-1}{}_{hoja}h^{-1}$ (Jones H. G. 1992, , p. 190).

5.4 Asimilación de CO_2 diaria bruta.

En la asimilación de CO_2 diaria bruta, el factor de conversión de luz inicial para hojas individuales (EFF), tiene un valor de 0.35 (Vilain 1997, vol 1, p. 375, tabla 9.2).

Para una latitud como la nuestra (19° 29') que tiene una elevación solar alta, se ha tomado como salida a la integral del seno de la elevación solar sobre el día (DSINB), esto es porque no se necesita una corrección por transferencia

atmosférica baja a elevación solar baja (DSINBE), que es el caso de países como Holanda que se encuentran a una latitud de 52°.

5.5 Producción de carbohidratos.

Este bloque es explicado en el punto 3.5. Y no tiene ninguna modificación.

5.6 Mantenimiento.

En el modelo, coeficientes fijados (para la planta de maíz a una temperatura de referencia) son utilizados para realizar el cálculo de los requerimientos de mantenimiento de los distintos órganos (hoja, tallo, raíces y granos) del cultivo, estos fueron deducidos de la literatura (Penning de Vries, et al, 1989, p. 52, tabla 8).

Los coeficientes de mantenimiento de respiración para los distintos órganos de la planta son:

MAINLV = 0.032 kgCH_2O kg^{-1}MSd^{-1};
MAINST = 0.016 kgCH_2O kg^{-1}MSd^{-1};
MAINRT = 0.016 kgCH_2O kg^{-1}MSd^{-1};
MAINSO = 0.01 kgCH_2O kg^{-1}MSd^{-1};

5.7 Partición de materia seca.

El particionado de los diversos órganos es descrito por factores de distribución fijos, tomados de Penning de Vries, et al, 1989, p. 89, tabla 18. Definidos como una función del estado de desarrollo.

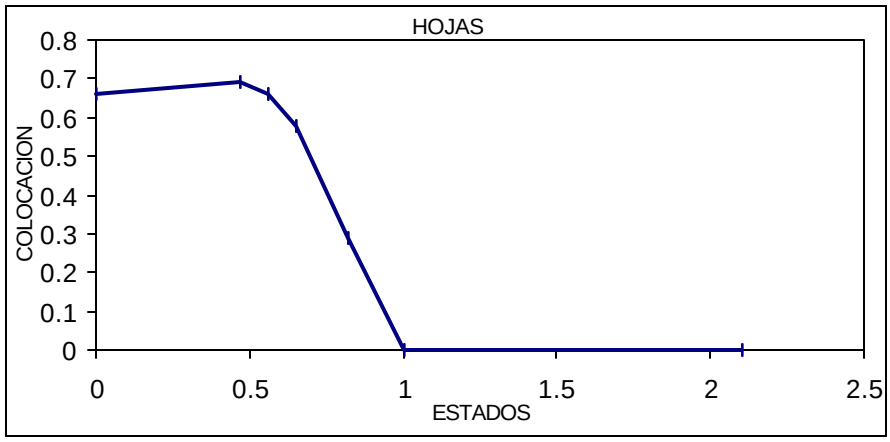


Figura 5.7.1. Tabla de la fracción de materia seca de brotes asignadas a hojas (FLVTB), como función del estado de desarrollo(DVS), Penning de Vries, et al (1989), tabla 18, p. 89.

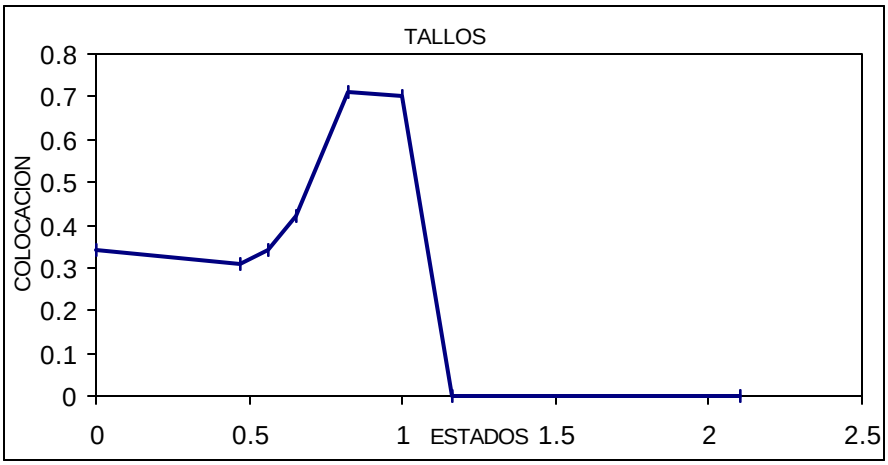


Figura 5.7.2. Tabla de la fracción de materia seca de brotes asignadas a tallos(FSTTB), como función del estado de desarrollo (DVS), Penning de Vries, et al (1989), tabla 18, p. 89.

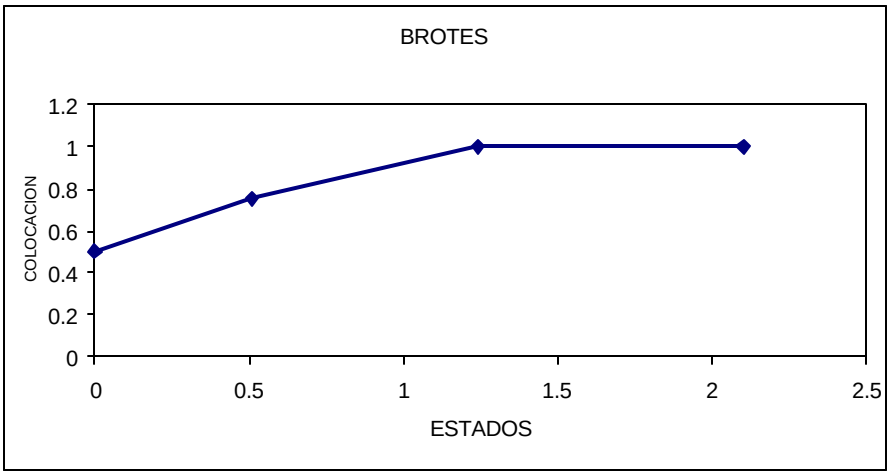


Figura 5.7.3. Tabla de la fracción de materia seca total asignada a brotes (FSHTB), como función del estado de desarrollo (DVS), Penning de Vries, et al (1989), tabla 18, p. 89.

5.8 Crecimiento de los órganos de la planta y translocación.

El coeficiente de requerimientos de asimilados para la producción de materia seca de los órganos de almacenamiento (ASRQSO), es tomado de Penning de Vries et al, 1989, p. 64, tabla 11, con un valor de 1.491.

5.9 Desarrollo de hojas.

- Del estado de desarrollo 2 (senectud) de la planta, tenemos la ecuación del índice de crecimiento del área de hoja (GLAIs) (ver R. Hunts, 1982).

  GLAIs = SLA*GLV;

En donde SLA es:

$$SLA = LA/LW;$$

Pero también:

$$SLA = LAR/LWR;$$

De la literatura (J. Hanway John., 1971, p. 23, fig. 3), el valor del peso relativo de hoja es aproximadamente igual a 15%, y el valor de LAR^{-1} = 450 kg/ha (Penning de Vries, et al, 1989, p. 100, tabla 19), para el cultivo del maíz.

Sustituyendo y haciendo los cálculos, tenemos un valor de 0.0148148 para SLA.

- El índice de área foliar (LAI) tiene un valor de 12 como límite, el cual fue tomado de Vilain (1997), vol 1 p. 373, tabla 9.1.

- La razón de crecimiento relativo del área de hoja (LA), durante el crecimiento exponencial está representado por la ecuación siguiente:

$$RGRL = K*e^{K*tast};$$

Donde:

K es una ganancia con valor de 0.04 (deducido experimentalmente).
tast es el tiempo fijado igual a 47 (deducido en forma experimental).

Sustituyendo y haciendo los cálculos, tenemos un valor de 0.262 para RGRL.

- La tabla de la razón de senescencia relativa (RDR), en función de la temperatura promedio del día, es modificada para el maíz (híbrido HS-2) deduciéndose de la literatura (Penning de Vries, 1989, p. 82, tabla 15), los valores.

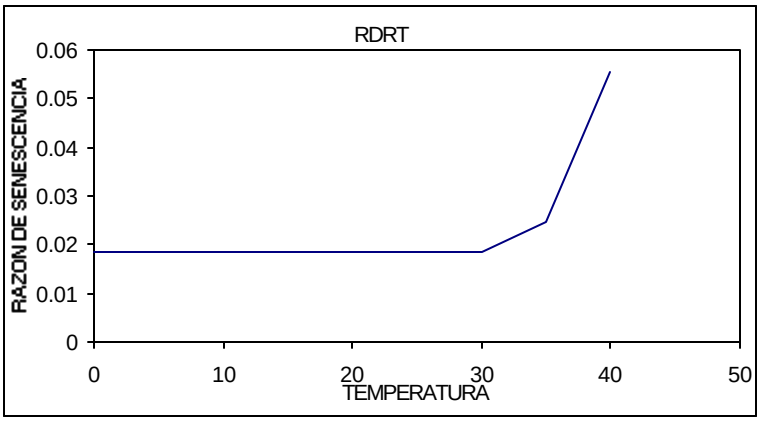


Figura 5.9.1. Tabla de la razón de senescencia relativa (RDRT)(Penning de Vries, et al (1989), tabla 15, p. 82).

5.10 Producción de materia seca.

Para el cálculo del peso de los diversos órganos de la planta, es hecho a través de la integración de su respectiva razón de crecimiento. No se hicieron modificaciones en este bloque.

5.11 Datos atmosféricos.

- Los datos de radiación global, temperatura máxima y temperatura mínima, son leídos de las funciones DTRT, TMAXT y TMINT respectivamente, que contiene valores medidos para todos los días del año. La variable independiente es el número del día del año (DAY).

- Muchos de los procesos que se realizan en el crecimiento y desarrollo, dependen de que la temperatura tenga un cierto límite inferior. Para el maíz, el valor de la temperatura base es de 10 °C (Jones H. G., 1992).

5.11.1 Cálculo de los pesos de la temperatura máxima y mínima.

En la región donde se llevó a cabo el experimento de campo (Chapingo), la longitud del día se considera como de periodo largo, por lo que la temperatura máxima tiene una mayor influencia sobre la temperatura promedio del día (24 hrs).

Para una longitud del día con duración de 12 horas, el peso de T_{max} es 0.45827 y para T_{min} por correspondencia es de 0.54173.

5.12 Revisión del balance de carbón.

Los parámetros CFLV, CFST, CFRT y CFSO representan el contenido de carbón de hojas, tallos, raíces y órganos de almacenamiento, respectivamente. Los parámetros de fracción de carbono para cada órgano de la planta se mantienen iguales, excepto el parámetro para la fracción de carbón de los órganos de almacenamiento, el cual tiene un valor de 0.491 (Penning de Vries et al, 1989, tabla 11, p. 64).

5.13 Tabla de resumen de valores.

En la tabla 1 se muestran los parámetros que se han modificados, así como su valor, unidad, página de la tesis en que aparece, así como tipo de dato y referencia bibliográfica. El propósito de esta tabla es mostrar de forma

resumida, los datos necesarios a modificar para cuando se requiera cambiar la simulación SUCROS, a otro cultivo.

Para saber como se comportará el mismo cultivo pero para otra región, los datos a cambiar serían únicamente cuatro: 1) la latitud (LAT), 2) la tabla de la radiación (DTRT), 3) la tabla de la temperatura mínima (TMINT) y 4) la tabla de la temperatura máxima (TMAXT), todos ellos para la región deseada.

En dado caso de que la simulación se quiera correr para otra época del año, son dos los parámetros que son necesarios cambiar: 1) el día de la emergencia de la planta, y 2) los parámetros de inicio y fin de la corrida del programa*.

El encabezado DATO en la tabla 1, se refiere a una clasificación, de acuerdo al tipo de parámetro.

A Datos para todas las plantas.
B Datos para plantas C4.
C Datos para el maíz.
D Datos para el maíz y el trigo.

* En MatLab® se fijan los parámetros de inicio y fin de la simulación de forma interna.

Tabla 1. Tabla de valores para maíz (híbrido HS -2).

Parámetro	Valor	Unidad	Pag.	Dato	Referencia
AMDVST	Ver Figura 4.3.1	-	74	A	Goudrian J. (1994), p. 187
AMTMPT	Ver Figura 5.3.1	°C	107	C	experimental
AMX	16	$kgCO_2ha^{-1}h^{-1}$	73	C	Jones H. G. (1998), p. 190
ASRQLV	1.463	$kgCH_2Okg^{-1}MS$	80	D	Goudrian J. (1994), p. 190
ASRQRT	1.444	$kgCH_2Okg^{-1}MS$	80	D	Goudrian J. (1994), p. 190
ASRQSO	1.491	$kgCH_2Okg^{-1}MS$	80	C	Penning de Vries, et al (1989), tabla 11, p. 64
ASRQST	1.513	$kgCH_2Okg^{-1}MS$	80	D	Goudrian J. (1994), p. 190
CFLV	0.459	$kgCkg^{-1}MS$	89	D	Penning de Vries, et al (1989), tabla 11, p. 64
CFRT	0.467	$kgCkg^{-1}MS$	89	D	Penning de Vries, et al (1989), tabla 11, p. 64
CFSO	0.491	$kgCkg^{-1}MS$	89	C	Penning de Vries, et al (1989), tabla 11, p. 64
CFST	0.494	$kgCkg^{-1}MS$	89	D	Penning de Vries, et al (1989), tabla 11, p. 64
DOYEM	150	d	72	A	Datos de campo
DTRT	Ver Figura 3.3.1	$Jm^{-2}d^{-1}$, d	66	región	Datos de campo
DVRRT	Ver Figura 5.2.2	d^{-1}, °C	106	C	experimental
DVRVT	Ver Figura 5.2.1	d^{-1}, °C	106	C	experimental
EFF	0.35	$kgCO_2ha^{-1}h^{-1}$	75	C	Vilain (1997), V1, p. 375
FLVTBM	Ver Figura 5.7.1	-	108	C	Penning de Vries, et al (1989), tabla 18, p. 89
FRTRL	0.20	-	83	D	Goudrian J. (1994), p. 190
FSHTBM	Ver Figura 5.7.3	-	109	C	Penning de Vries, et al (1989), tabla 18, p. 89
FSTTBM	Ver Figura 5.7.2	-	109	C	Penning de Vries, et al (1989), tabla 18, p. 89
KDF	0.60	$ha_t\ ha^{-1}{}_h$	75	A	Goudrian J. (1994), p. 188
LAO	0.000057	$m^2\ plant^{-1}$	83	D	Goudrian J. (1994), p. 186
LAT	19	°	75	A	
MAINLV	0.032	$kgCH_2Okg^{-1}MSd^{-1}$	77	C	Penning de Vries, et al (1989), tabla 8, p. 52
MAINRT	0.016	$kgCH_2Okg^{-1}MSd^{-1}$	77	C	Penning de Vries, et al (1989), tabla 8, p. 52
MAINSO	0.01	$kgCH_2Okg^{-1}MSd^{-1}$	77	C	Penning de Vries, et al (1989), tabla 8, p. 52
MAINST	0.016	$kgCH_2Okg^{-1}MSd^{-1}$	77	C	Penning de Vries, et al (1989), tabla 8, p. 52
NPL	6.25	$plant\ m^{-2}$	83	C	De campo
RDRT	Ver Figura 5.9.1	d^{-1}, °C	110	C	Penning de Vries, et al (1989), tabla 15, p. 82
RGRL	0.262	$(°Cd^{-1})$	83	C	experimental
SCP	0.20	-	75	A	Goudrian J. (1994), p. 188
SLA	0.0148148	$ha_h\ kg^{-1}{}_h$	83	C	experimental
TBASE	10	°C	87	C	Jones H. G. (1998), p. 261
TMAXT	Ver Figura 3.3.2	°C, d	67	región	Datos de campo
TMINT	Ver Figura 3.3.3	°C, d	67	región	Datos de campo
TREF	25	°C	77	C	Goudrian J. (1994), p. 188
WD	0.5417	-	87	C	estimado, ver secc. 5.11

Resultados y discusiones

El programa SUCROS nos entrega muchos resultados, de todos ellos se ha elegido las curvas que podemos comparar con los datos registrados durante el experimento de campo del maíz (híbrido HS-2). De esta forma, comparando las curvas, podemos apreciar que tanto se asemeja los resultados del programa de simulación SUCROS a los datos experimentales.

En la Figura 5.13.1 se aprecia como la curva del índice de área de hoja obtenida por el programa SUCROS se encuentra desfasada con respecto a la curva de los datos. Esto se puede interpretar como que las hojas crecen con días anticipados a los que se observan en los datos, pero ambas curvas nos dicen que el crecimiento del índice de área antes de llegar a su punto más alto, es similar.

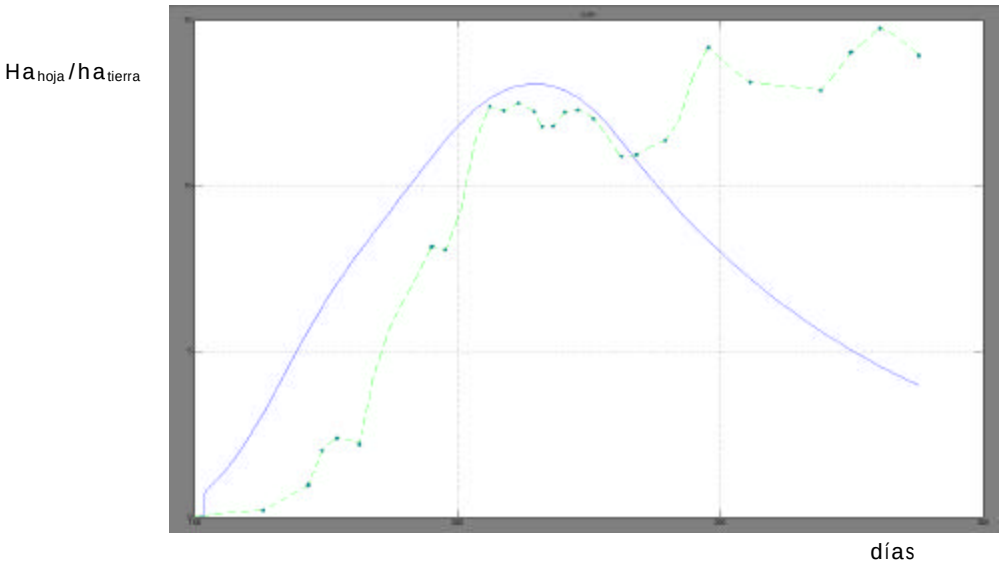


Figura 5.13.1. Gráfica de la comparación del índice de área de hoja (LAI), datos y del programa.

Debe de tenerse en cuenta que los datos de campo fueron de plantas aleatorias, no de la misma planta, por lo que los datos varían.

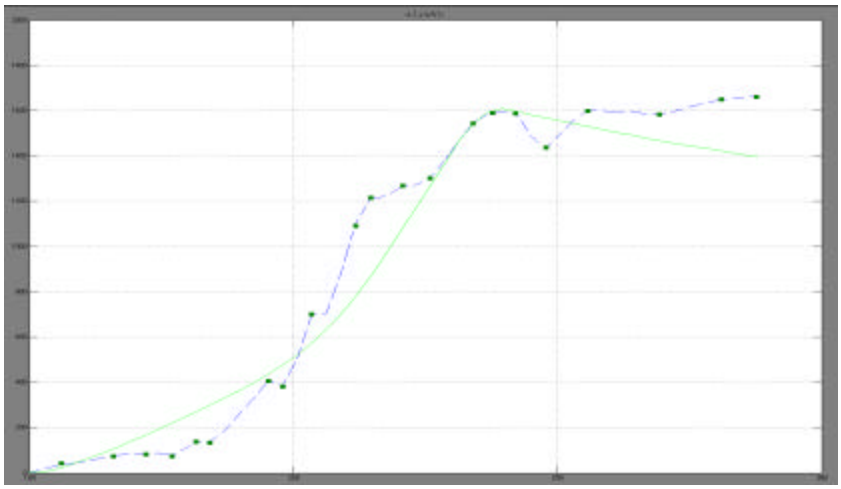


Figura 5.13.2. Gráfica que muestra la longitud de tallo y el peso del tallo (dato de campo).

En la Figura 5.13.2, se muestran la curva del programa SUCROS y la curva de los datos de campo. La curva del programa tiene una forma parecida a la curva de los datos, esto se puede deber a que los datos de campo para la longitud de tallo se realizaron al mismo lote de plantas.

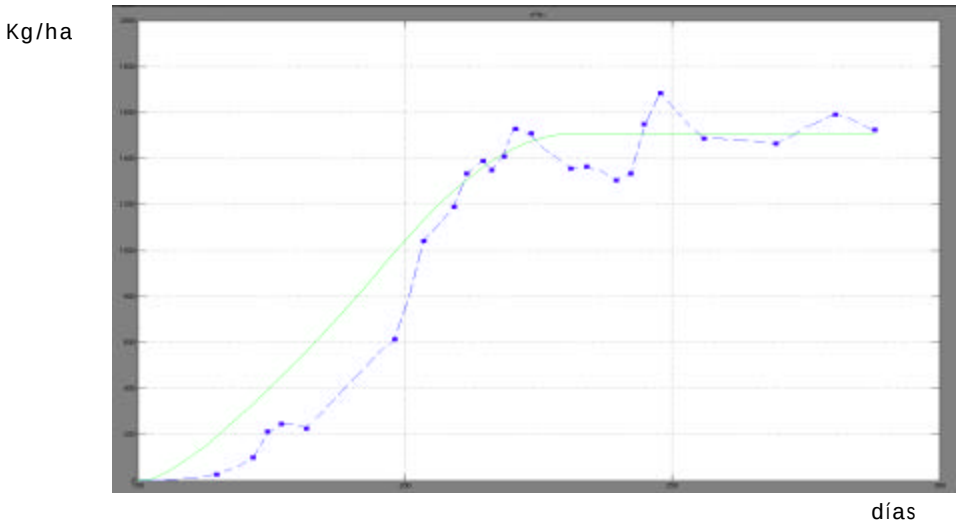


Figura 5.13.3. Gráfica comparativa del peso de la hoja.

En la Figura 5.13.3 se aprecia como la curva del peso de hoja obtenida por el programa SUCROS se encuentra desfasada con respecto a la curva de los datos. Esto se puede interpretar como que las hojas crecen con días anticipados a los que se observan en los datos, dando mayor peso de hoja, pero ambas curvas nos dicen que el crecimiento de la hoja hasta llegar a su punto más alto, es similar.

Conclusiones y perspectivas

El programa de cómputo modificado, adaptado y ajustado SUCROS para las condiciones atmosférica y de latitud de la región del campo experimental de la U. A. Chapingo, nos permite la simulación del crecimiento del cultivo del maíz, de una forma aproximada, permitiéndonos la predicción de las variables meteorológicas (de tiempo atmosférico) para la planeación agrícola en México.

Las curvas obtenidas por el programa de simulación SUCROS adaptado para el maíz (híbrido HS-2), nos da curvas que se asemejan a las obtenidas por el experimento de campo, lo cual nos permite validar el programa y conjeturar que la simulación se hace de forma aceptable, dando resultados que pueden ser utilizados para predecir crecimiento y rendimiento del maíz para la región antes mencionada.

Toda investigación necesita de una base, y esta adaptación del programa SUCROS, pretende ser la base para continuar investigando en esta área. A partir de aquí, una vez que se ha actualizado y adaptado para un cultivo propio de México, se puede utilizar para hacer pruebas con otros cultivos en otras regiones.

Perspectivas de este trabajo de tesis:

- Llevar a cabo un análisis de sensibilidad, el análisis de sensibilidad tiene la función de ayudar a evaluar la importancia relativa que las variables de entrada y los parámetros del modelo tienen sobre la evolución en el tiempo de las variables de estado del modelo. El análisis de sensibilidad puede ayudar a entender que partes del modelo necesitan atención especial en el diseño de experimentos. Además permite una adecuada selección de los parámetros a ser estimados mediante un estudio de calibración del modelo. Generalmente el análisis de sensibilidad es aplicado para evaluar el efecto de los parámetros sobre las salidas del modelo. Más interesante es estudiar las sensibilidades del modelo como una función del tiempo. Se puede estudiar mejor el comportamiento del modelo de esta forma.

- Realizar una calibración, esto es, realizar un proceso de modificación de los valores de los parámetros del modelo para obtener un mejor ajuste entre la simulación y los datos observados. Generalmente aquellos parámetros sujetos de calibración son aquellos que presentan incertidumbre, que afectan el comportamiento del modelo en forma más sensible, y que afectan el comportamiento del modelo en forma tal que se obtiene mejor ajuste entre las mediciones y datos simulados.

Generalmente el problema de calibración de un modelo dinámico se formula como un problema de optimización, en el cual, dado un conjunto de observaciones, el modelo y ciertas restricciones, se trata de determinar los parámetros estimados mediante su ajuste en forma iterativa de tal forma que una función objetivo es optimizada. La función objetivo es la medida de discrepancia la cual sintetiza una función de todas las diferencias entre los valores medidos y los valores observados. Las diferencias son llamadas los residuos.

- Desarrollo de un sistema basado en el conocimiento (sistema experto), basado en computadora, para el manejo del cultivo del maíz, esto es, desarrollar un sistema experto que asesore al agricultor en el manejo del cultivo del maíz, como puede ser la fechas de riego, fertilización, control de plagas y enfermedades y detección de anomalías en el cultivo.

Bibliografía

1. Bakker J. C., G. P. A. Bot, H. Challa, N. J. van de Braak, Greenhouse climate control and integrated approach, ed. Wageningen Pers, Wageningen, Holanda, 1995. ISBN: 90-74134-17-3

2. Lawlor D.W., Photosynthesis: Molecular, Physiological and environmental process, 2nd ed., Ed. Langman Scientific & Technical, U.K., 1993. ISBN: 0-582-086574

3. Day W., Young P.C. Second IFAC/ISHS Workshop on mathematical and control applications in agricultural and horticulture, Silsoe, U.K. 12-15 Sept. 1994 Acta Horticulturae Vol. 406, 1996.

4. Farquhar G.D., Von Caenmerer S., Berry J.A., A biochemical model of a photosynthetic CO_2 assimilation in leaves of C3 especies plant Vol. 49, 1980, pp 78-79.

5. Farquhar G.D., Von Caenmerer S., Modelling of photosyntetic response to environmet al conditions, 1982, pp 549-587.

6. Farquhar, G.D., Wong, S.C., Evans, J.R. and K.T. Hubick., Photosynthesis and gas exchange, pp 47-69. In: Jones, H.G., T.J. Flowers, and M.B. Jones (editors), Plants under stress; Biochemistry, physiology and Ecology and their application to plant improvement. Cambridge University Press. Cambridge, Great Britain, 1989.

7. El Financiero, La dependencia de granos continuará en ascenso: USDA. 16 Economía, jueves 23 de marzo de 2000.

8. El Financiero, Garantizado el abasto de alimentos; descarta la SAGAR el alza de productos básicos. Martes 19 de Octubre de 1999.

9. Goudriaan, J., A simple and fast numerical method for the computation of daily totals of crop photosynthesis, Netherlands, Agricultural and Forest Meteorology., 1986.

10. Goudriaan J. Van Laar H. H, Modelling Potential Crop Growth Processes, Netherlands, Kluwer Academic Publishers, 1994. ISBN: 0-7923-3219-9 HB.

11. Hashimoto Y., Day W. Mathematical and control aplications in agriculture and horticulture : Proceedings of the IFAC/ISHS Workshop, Matsuyama Japan, 30 Sept. – 3 Oct. 1991. Ed. Pergamon Press, 1991.

12. Hashimoto Y., Bot G.P.A., Day W., Tantau H.J., Nonami H. The computerized greenhouse: Automatic control application in plant production. Ed. Academic Press Inc., 1993.

13. Heller R., Esnault R. Lance C., Physiologie végétale: 1. Nutrition, Paris, 6ª ed., Ed. DUNOD, 1998. ISBN: 2-10-003991-1

14. Hunt R. Plant growth curves: The functional approach to plant growth analysis. Ed. Edward Arnold, 1982.

15. Hanway John J., Cómo se desarrolla una planta de maíz, Centro Internacional de Mejoramiento de Maíz y Trigo, CIMMYT, 1971.

16. John H. M. Thornley, Ian R. Johnson, Plant and crop modelling: A mathematical approach to plant and crop physiology, ed. Clarendon Press Oxford, U.K., 1990. ISBN: 0-19-854160-0

17. Jones H. G., Plants and microclimate, London, 2ª ed., Ed. Cambridge University Pres, 1992. ISBN: 0-521-41502-0 HB

18. Laar, H.H., Goudriaan, J., Keulen, H., SUCROS97 : Simulation of crop growth for potential and water-limited production situations : as applied to spring wheat, Quatitative approaches in systemas analysis No. 14, AB-DLO, Wageningen/Haren & PE, Wageningen, 1997, 52 pp.

19. Lange O.L., Nobel P.S., Osmond C.B., Ziegler H. Physiological plant ecology II : Water relations and carbon assimilation ; Encyclopedia of plant physiology, Vol. 12B. Ed. Springer Verlag, 1982.

20. Maksymowych R., Erickson R.P. Analysis of leaf development. Ed. Cambridge, 1973.

21. Menri Jupin et André Lamant, La photosyntèse, ed. DUNOD, París, 1999. ISBN: 2-10-004552-0

22. Ortiz Solorio, Carlos A., Elementos de agrometeorología cuantitativa, con aplicaciones en la república mexicana, Departamento de suelos, Universidad Autónoma Chapingo, 3ra edición, 1987.

23. Penning de Vries, D. M., Jansen, F.W.T., ten Berge & A. Bakema, H.F.M., Simulation of Ecophysiological Processes of Growth in Several Annual Crops, Simulation Monographs. Pudoc, Wageningen, 1989. ISBN: 90-220-0937-8.

24. Penning de Vries F.W.T., van Laar H.H. Simulation of plant growth and crop production. PUDOC Wageningen, 1982.

25. Roderick Hunt, Plant growth curves: The function approach to plant growth analysis, Ed. Edward Arnold, London, 1982. ISBN: 0-7131-2844-5.

26. Scientia Horticulturae Vol. 74 (1998). Crop modeling in horticulture: state of the art pp 3-20, Modelling water relations of horticultural crops: a review pp 47-82, Modelling biomass production and yield of horticultural crops: a review pp 86-11, Modelling of spatial structure and development of plants: a review pp 113-149, Model applications in horticulture: a review pp 151-174.

27. Singh, R.S., Jacobs, A.F.G. Validation of Goudriaan's model: a case study for maize. Neth. J. Agric. Sci. 43 (1995) 163-181.

28. Solorzano Vega, Esteban, Guías fenológicas para cultivos básicos, oleaginosas, sacaríferos, tubérculos y fibras, Chapingo, México. UACH: Departamento de Fitotecnia, 1994.

29. Spitters, C.J.T., Toussaint, H.A.J.M. & Goudriaan, J., Separating the diffuse and direct component of global radiation and its implications for modeling canopy photosynthesis. Part I. Agricultural and Forest Meteorology, 1986.

30. Spitters, C.J.T., Separating the diffuse and direct component of global radiation and its implications for modeling canopy photosynthesis. Part. II. Agricultural and Forest Meteorology, 1986.

31. Spitters, C.J.T., van Keulen, H., van Kraalingen, D.W.G. A simple and universal crop growth simulator: SUCROS87 in R. Rabbinge, S.A. Ward and H.H. van Laar (Editors), Simulation and systems management in crop protection, PUDOD Wageningen, 1989, pp 147-181.

32. Taylor J., Young P., Chotal A, McLeod A., Modelling and control design for free air CO_2 enrichment systems used in plant physiology atmospheric change experiments. Proceedings of the 3rd IFAC Workshop, Hanover, Germany, 28 September – 2 October 1997, pp 237-242.

33. Thornley J.H.M. Mathematical models in plant physiology. Ed. Academic Press, 1976.

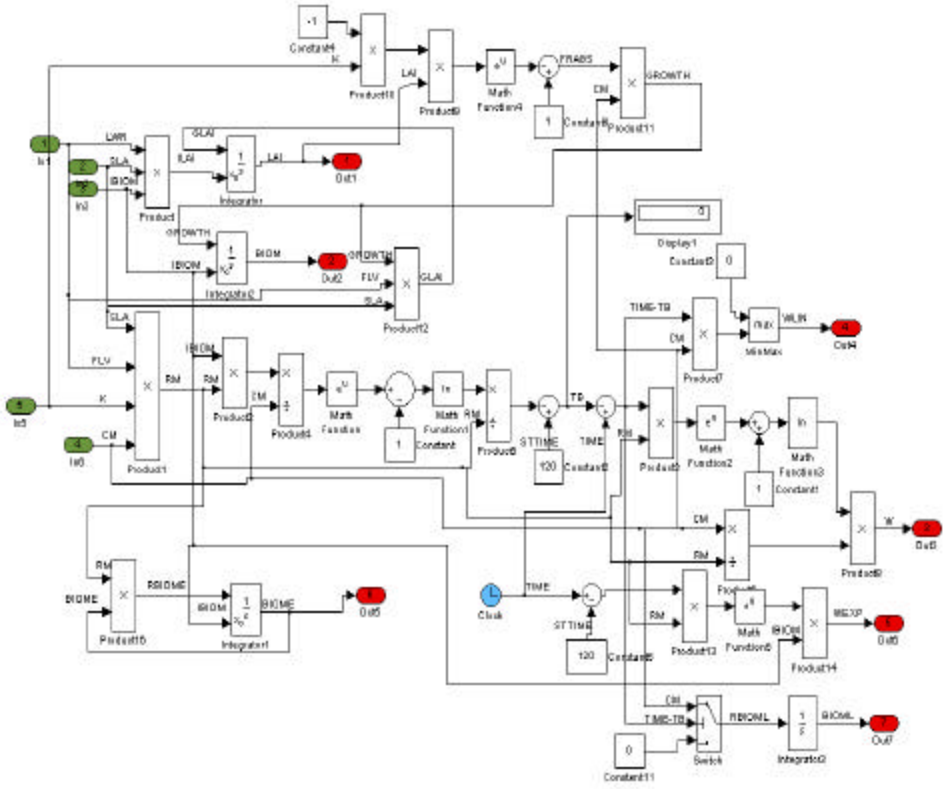
34. van Henten E. J., van Straten G., Sensitivy análisis of a dynamic growth model of lettuce, J. Agric. Eng. Res. (1994) 59, 19-31.

35. van Keulen, H., Penning de Vries, F.W.T., Drees, E.M. A summary model for crop growth in F.W.T. Penning de Vries and H.H. van Laar (Eds), Simulation of plant growth and crop production, Wageningen, Centre for Agricultural Publishing and documentation, pp 87-97.

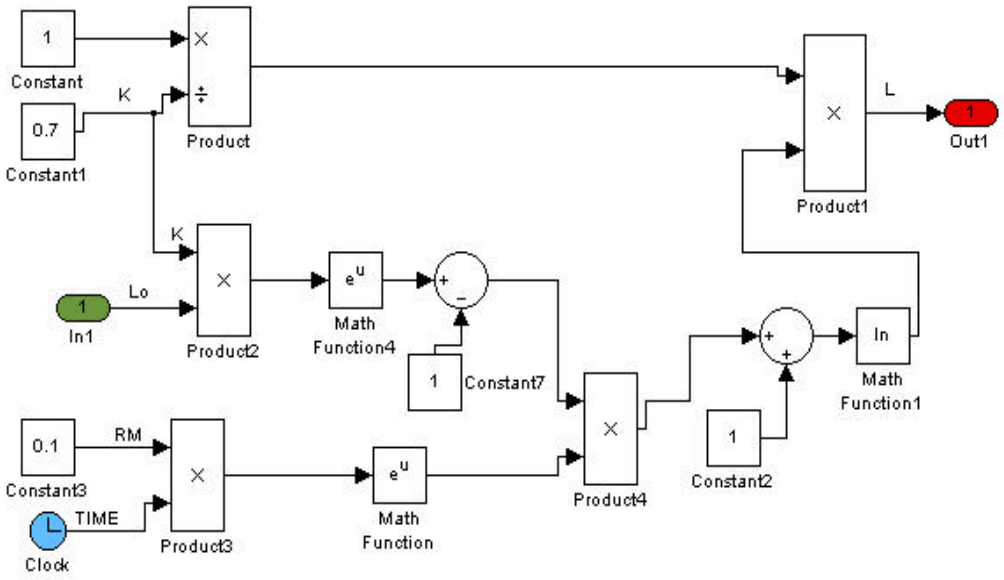
36. Vilain, Michael, La production vegétale; Les composantes de la production, Vol. 1, Paris, 3ª ed., Ed. Lavoisier Tec & Doc., 1997. ISBN: 2-7430-0218-2.

37. Vilain, Michael, La production vegétale; La maîtrise technique de la production, Vol. 2, Paris, 2ª ed., Ed. Lavoisier Tec & Doc., 1997. ISBN: 2-7430-0127-5.

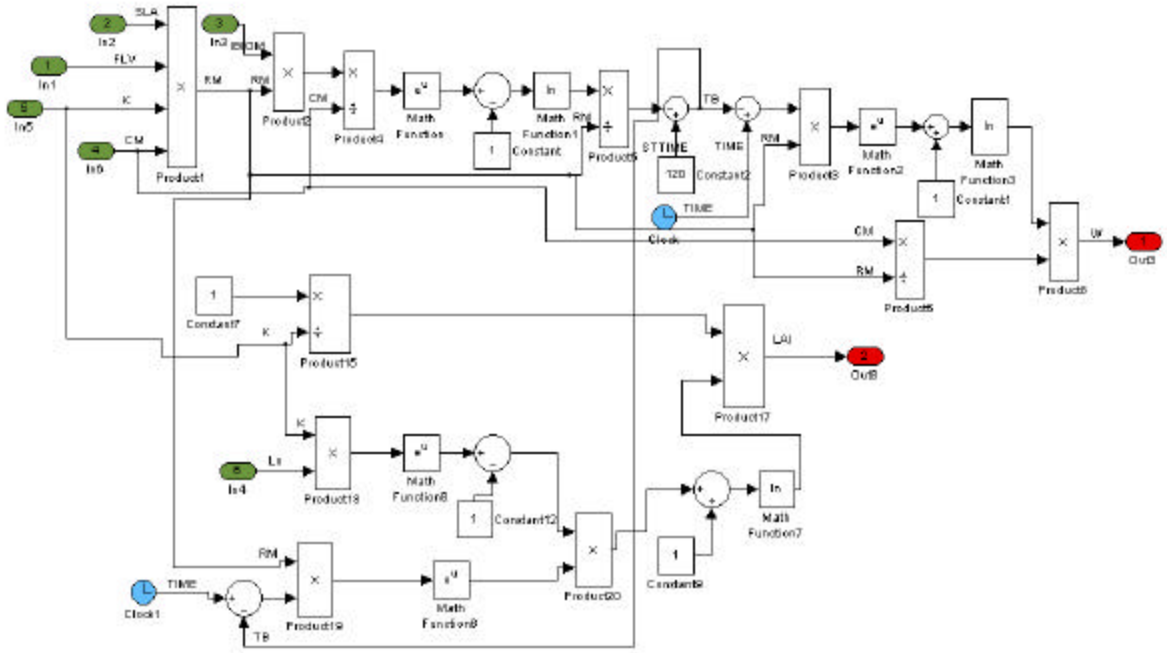
Anexo. Diagramas y listados de los ejercicios del Capítulo 2.



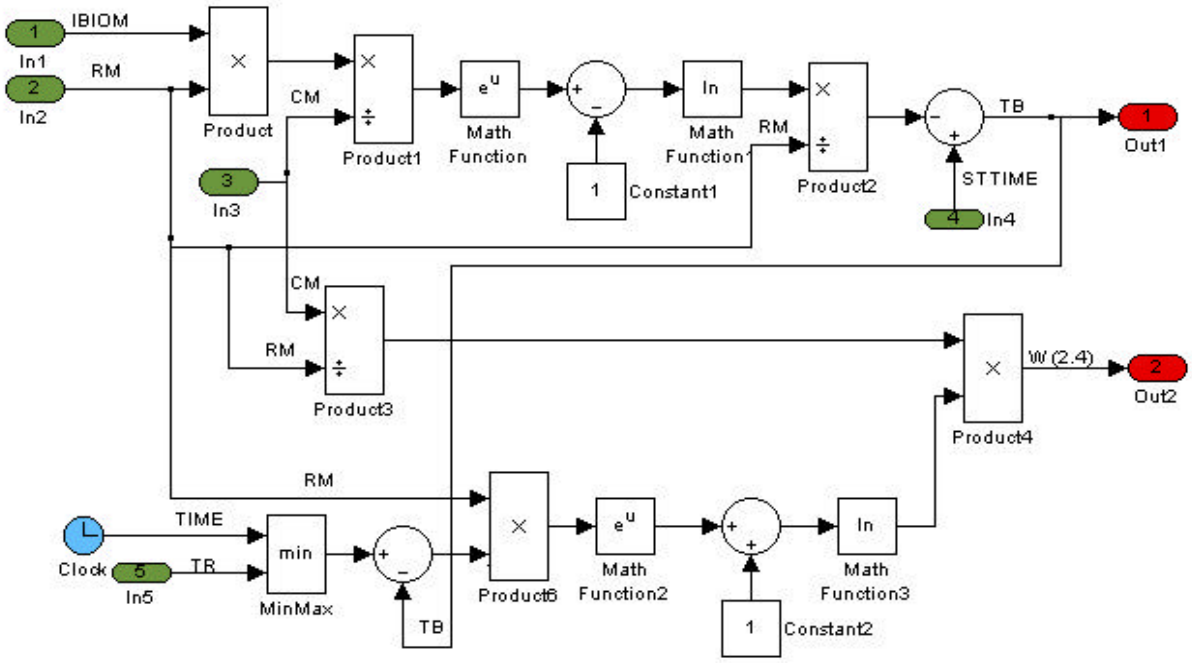
Programa 5.1. Cálculo de biomasa, usando la ecuación expolineal y la compara con el crecimiento.



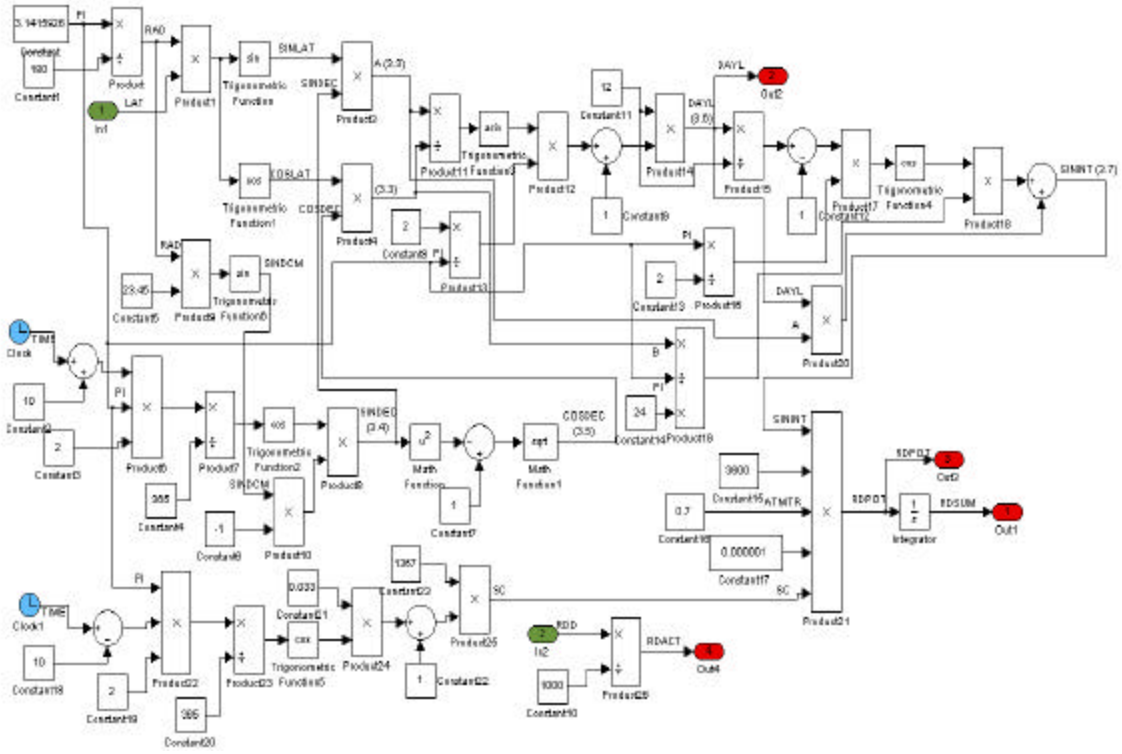
Programa 5.2. Gráfica de L vs Tiempo Lo=0.5 y Lo=0.05.



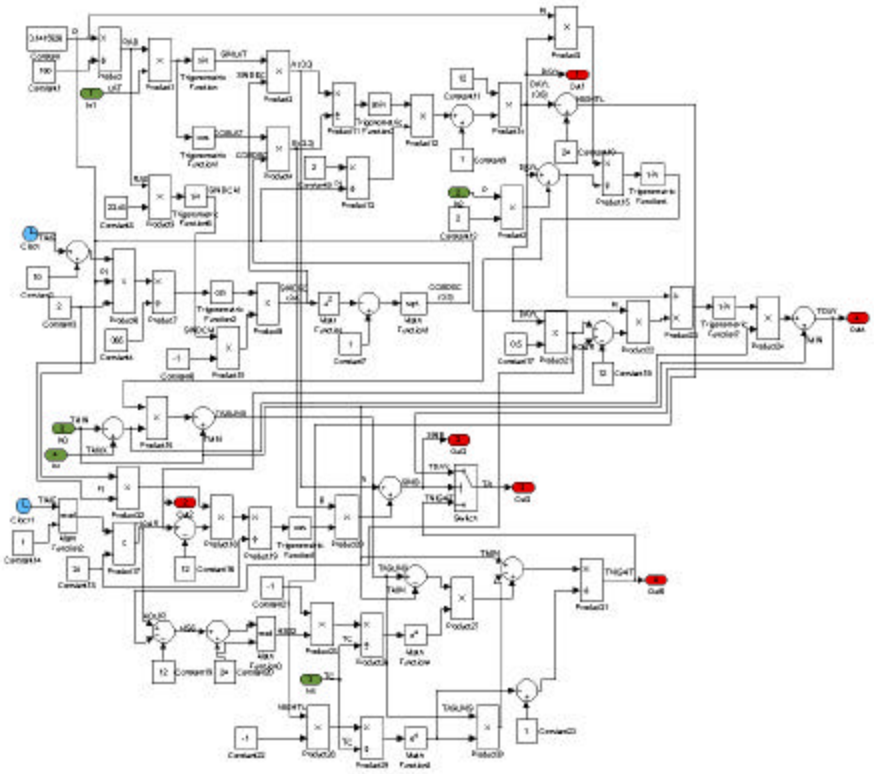
Programa 5.3. Gráfica de L vs W.



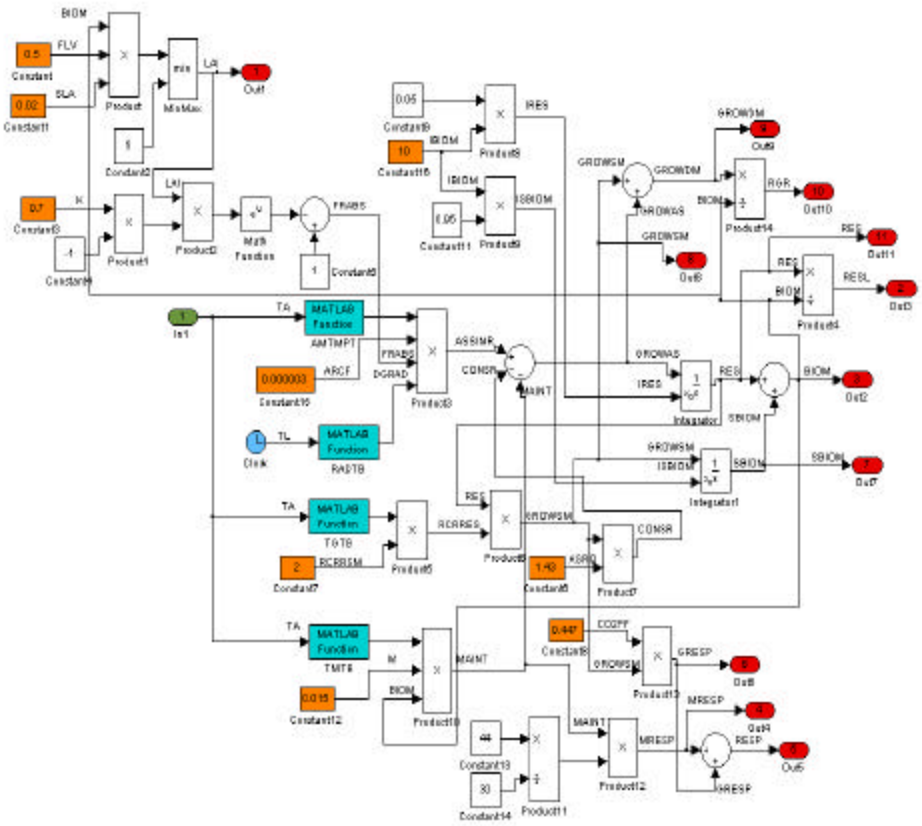
Programa 5.4. Ecuación expolineal truncada.



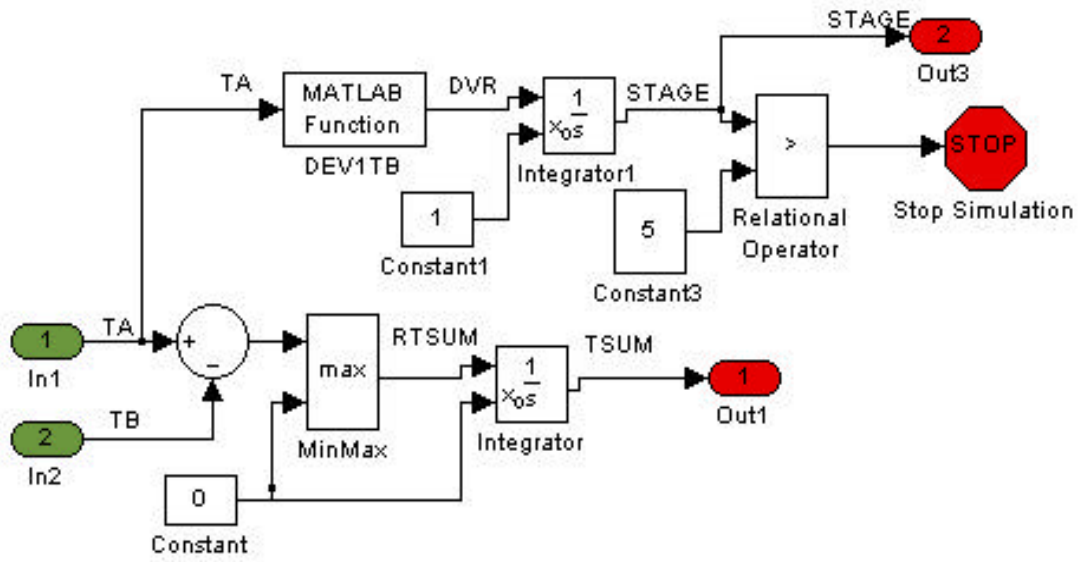
Programa 5.5. Curso climático anual.



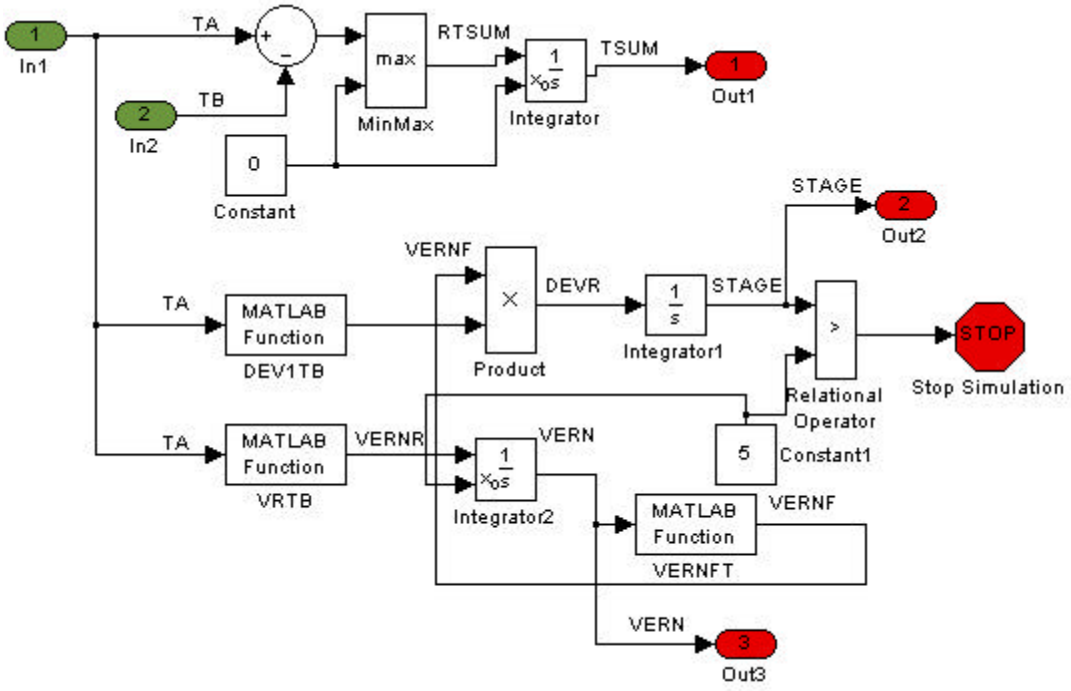
Programa 5.6. Curso de la temperatura diurna.



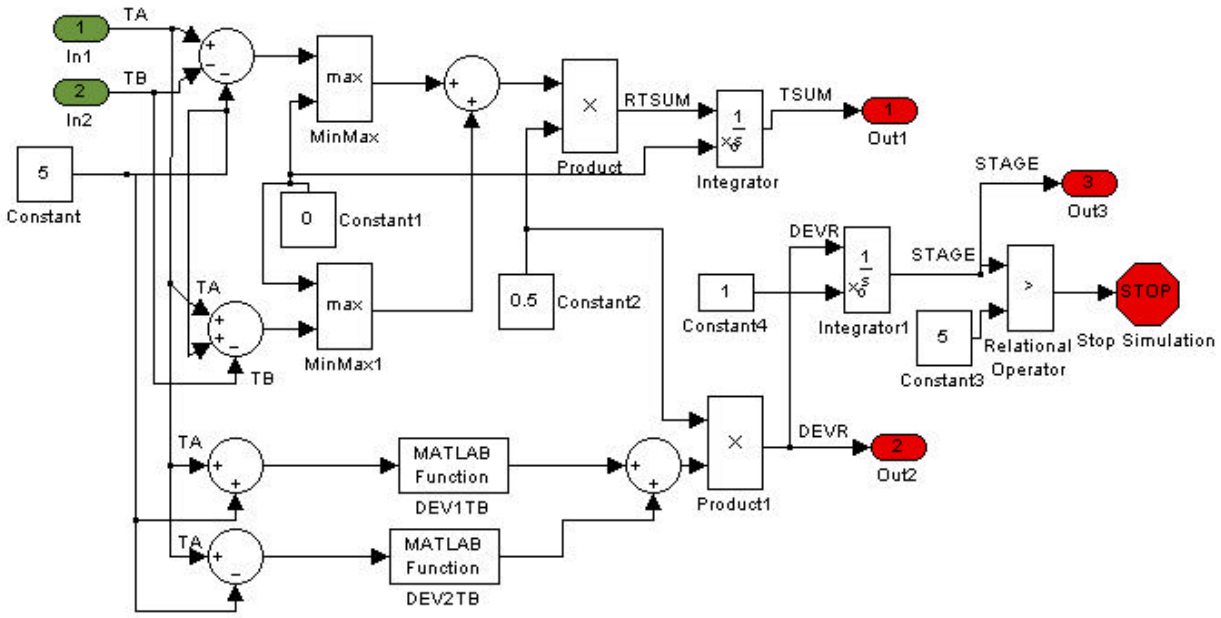
Programa 5.7. Cálculo de la biomasa estructural y de asimilados.



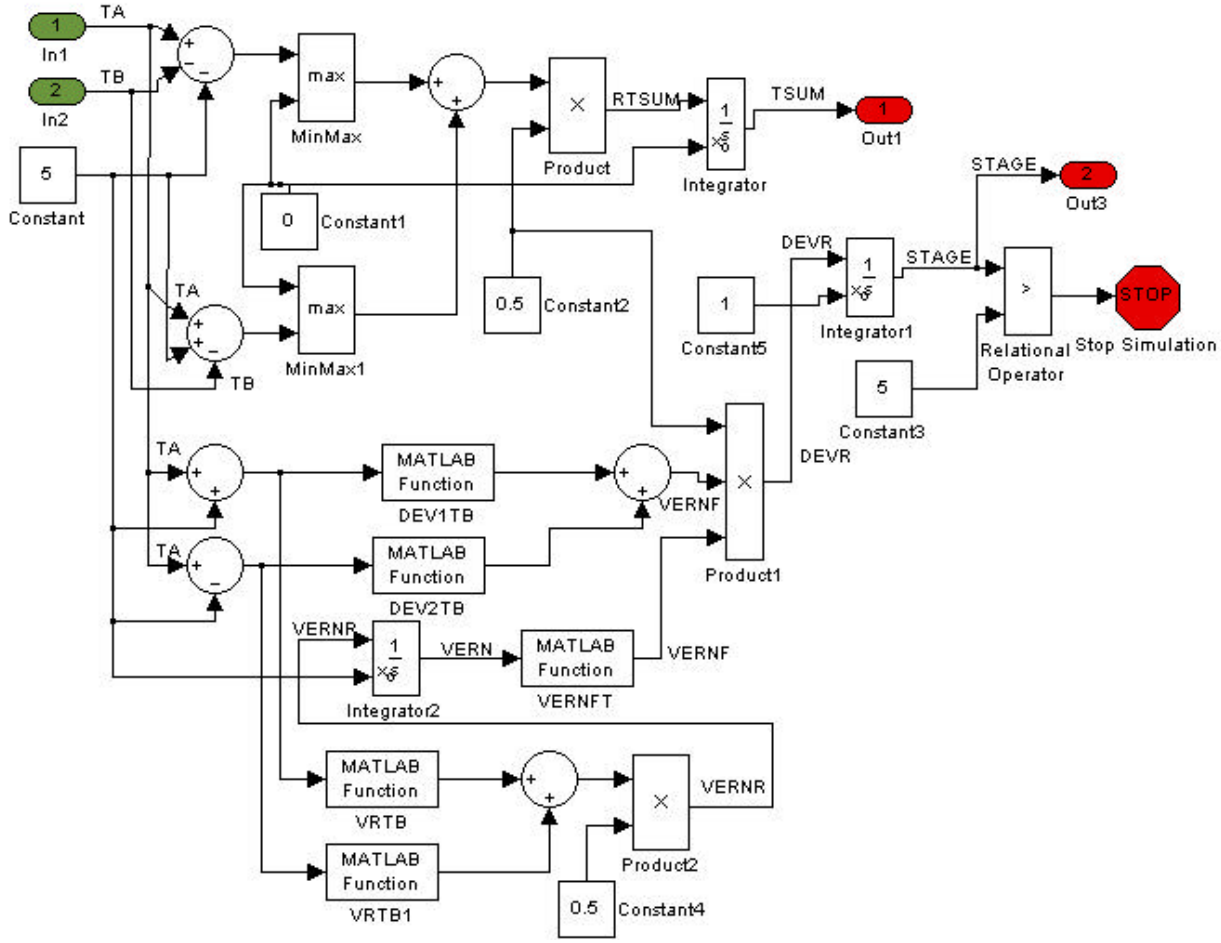
Programa 5.8. Desarrollo de la colza, suma de temperatura hasta la floración.



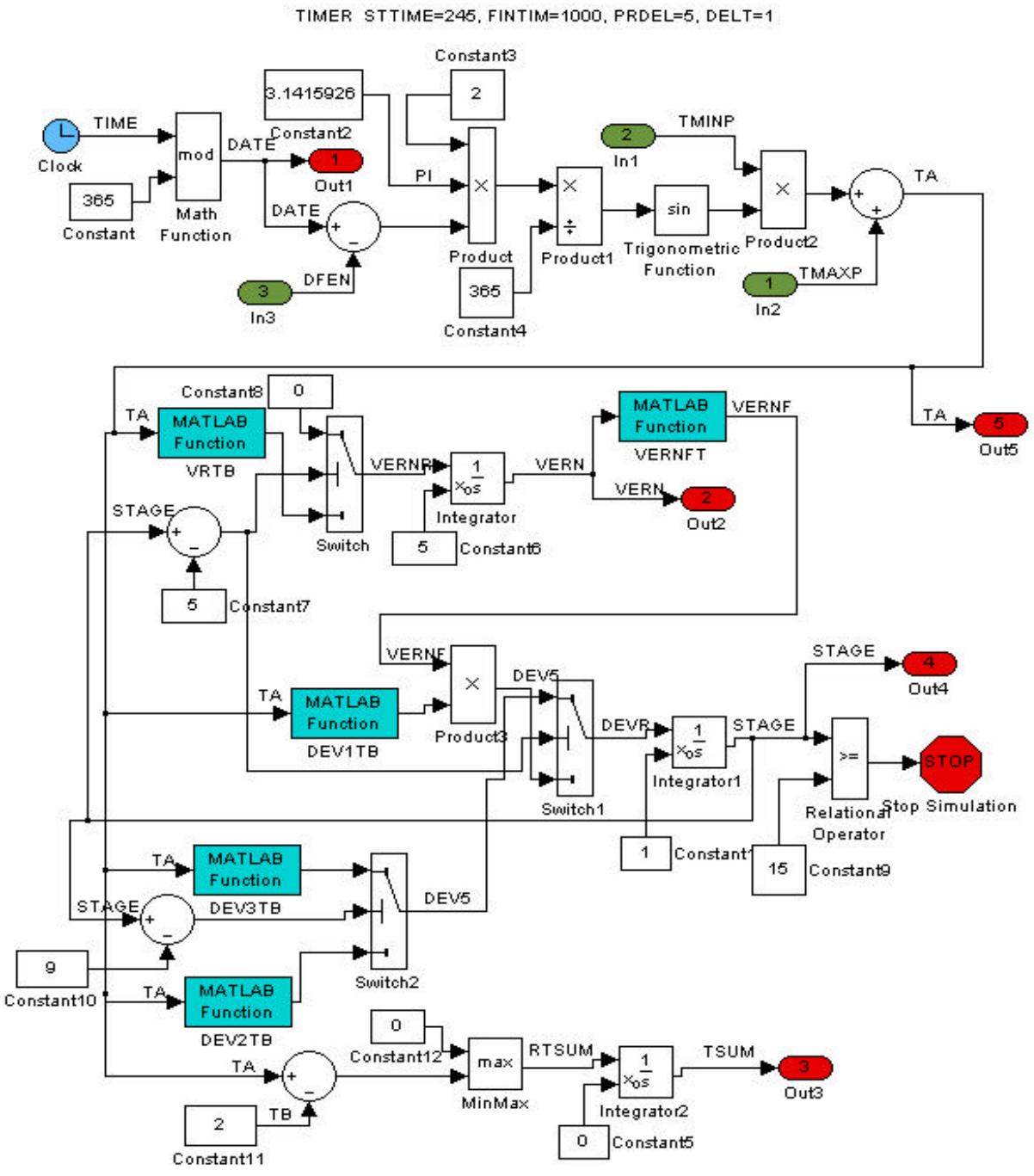
Programa 5.9. Desarrollo de la colza, incluyendo vernalización.



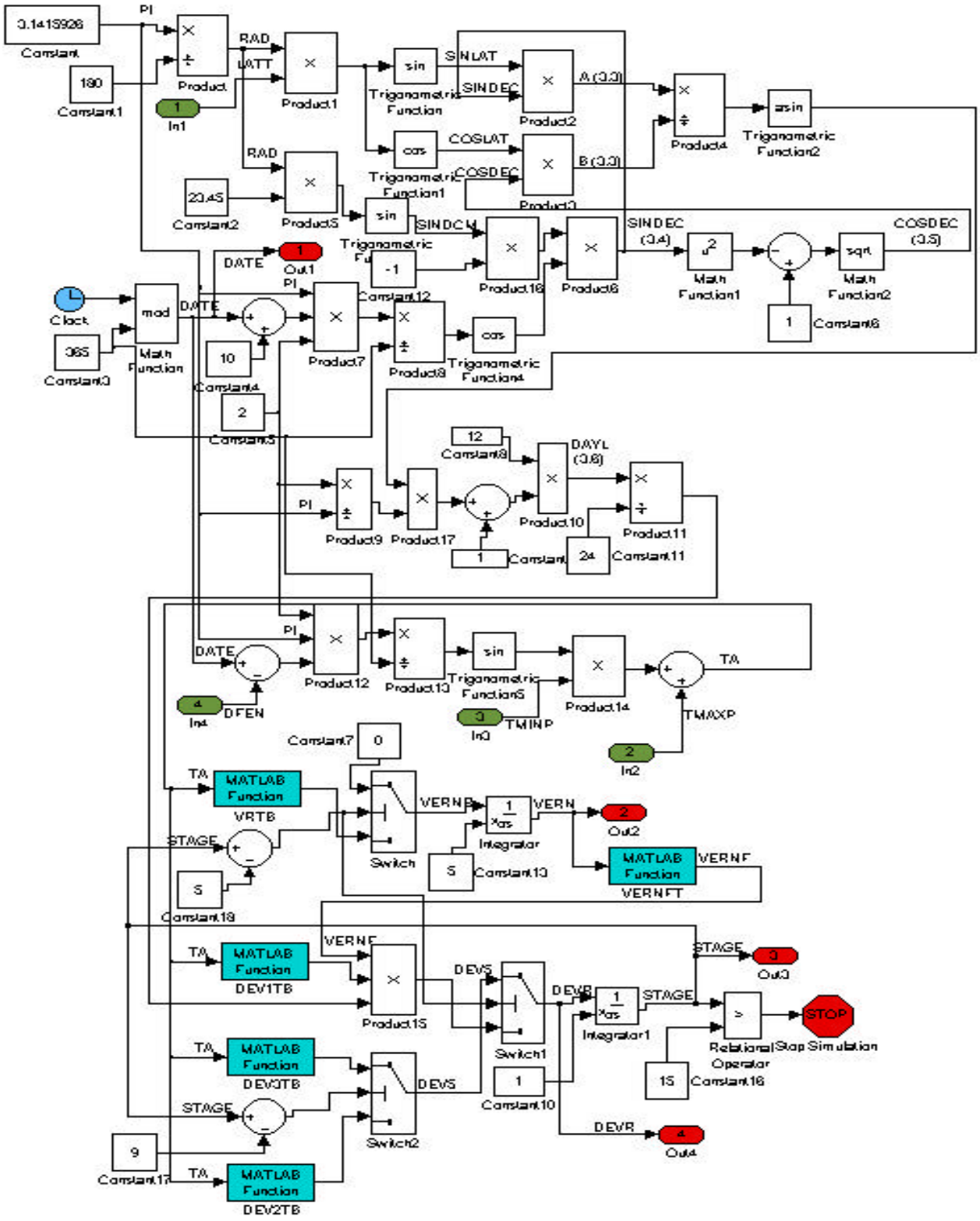
Programa 5.10. Desarrollo de la colza, incluyendo temperatura día/noche.



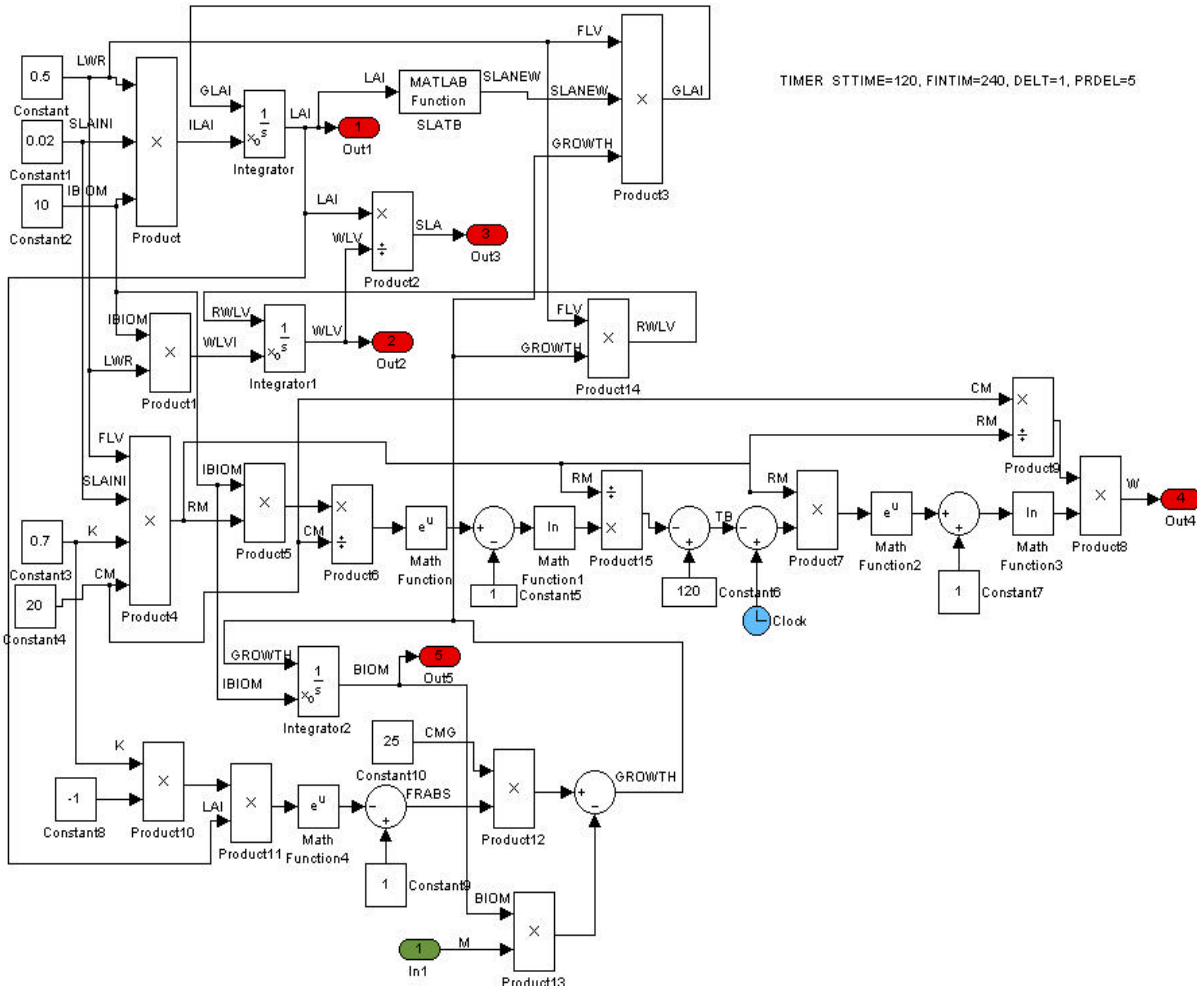
Programa 5.11. Desarrollo de la colza, incluyendo vernalización, alternando temperatura día/noche



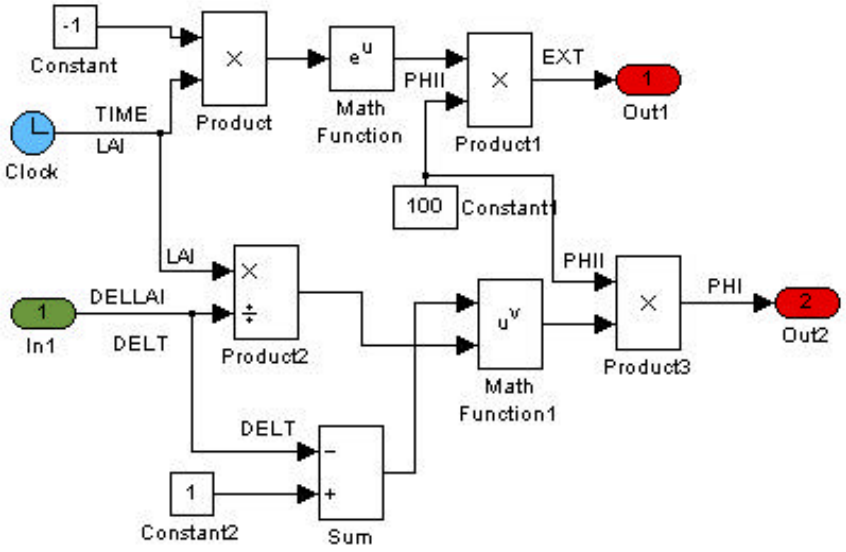
Programa 5.12. Desarrollo de la colza, incluyendo vernalización (sin fotoperíodo).



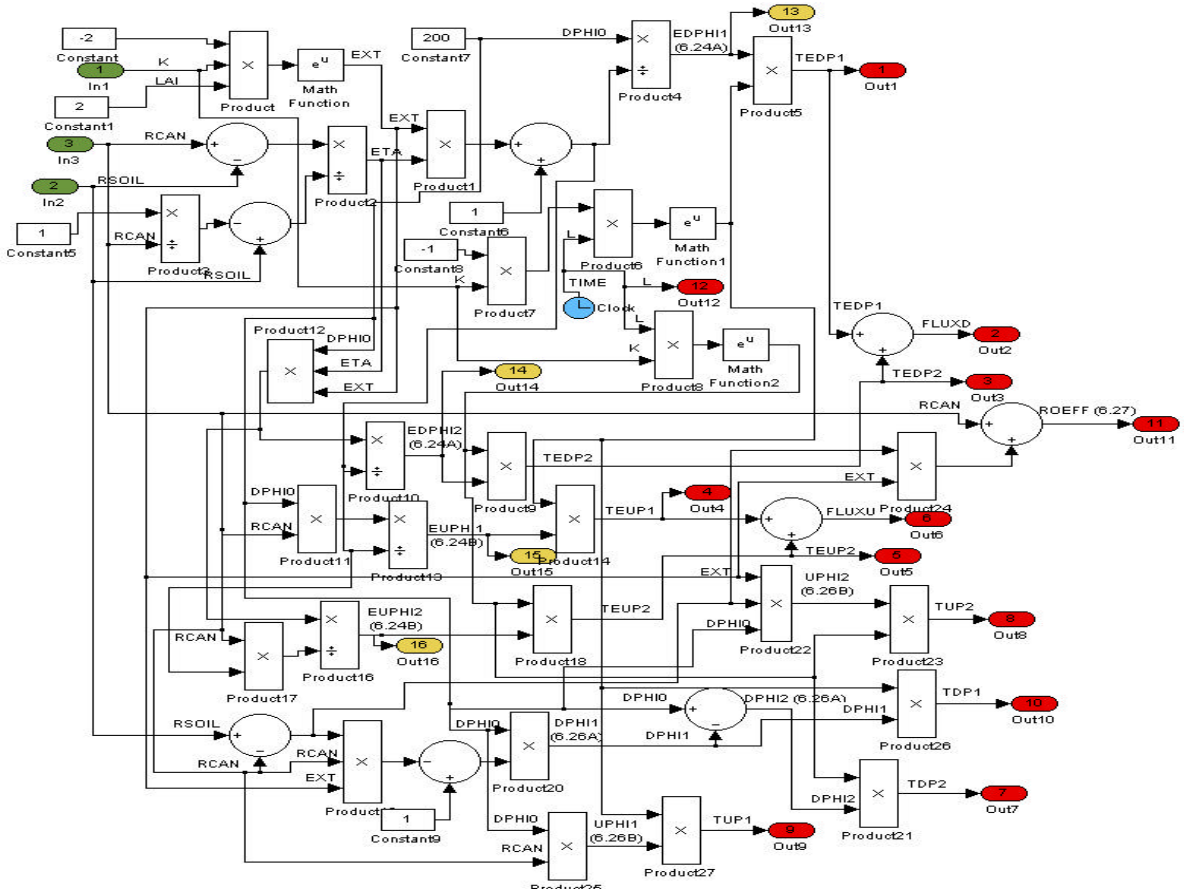
Programa 5.13. Desarrollo de la colza, incluyendo vernalización y fotoperíodo.



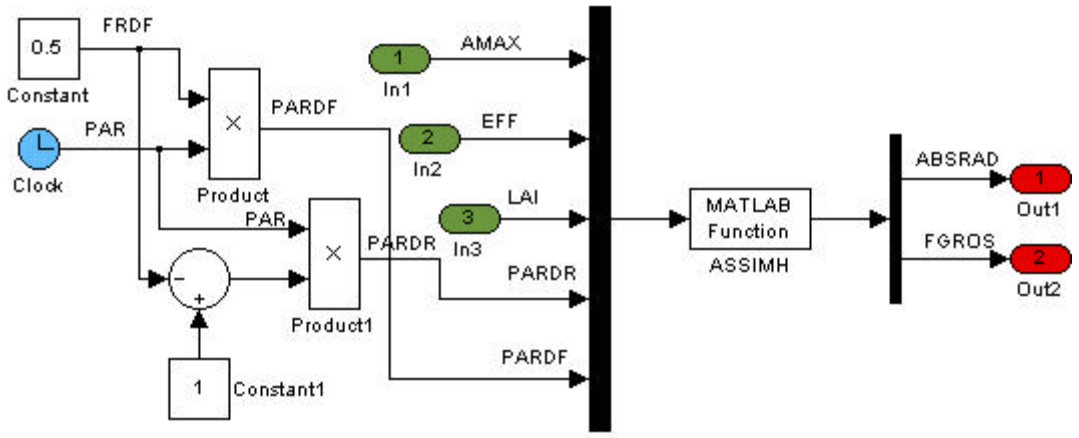
Programa 5.14. Crecimiento del cultivo con una variable SLA.



Programa 5.15. Simulación de un perfil de radiación descendente.



Programa 5.16. Perfil de la radiación incluyendo el efecto de la reflexión del suelo

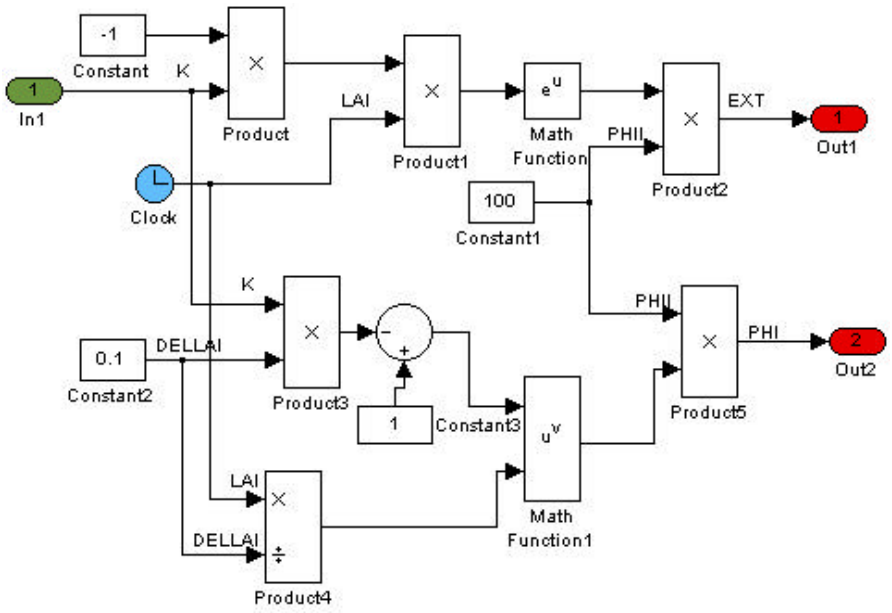


Programa 5.17. Asimilación del dosel instantáneo, usando una subrutina de fotosíntesis para hojas horizontales.

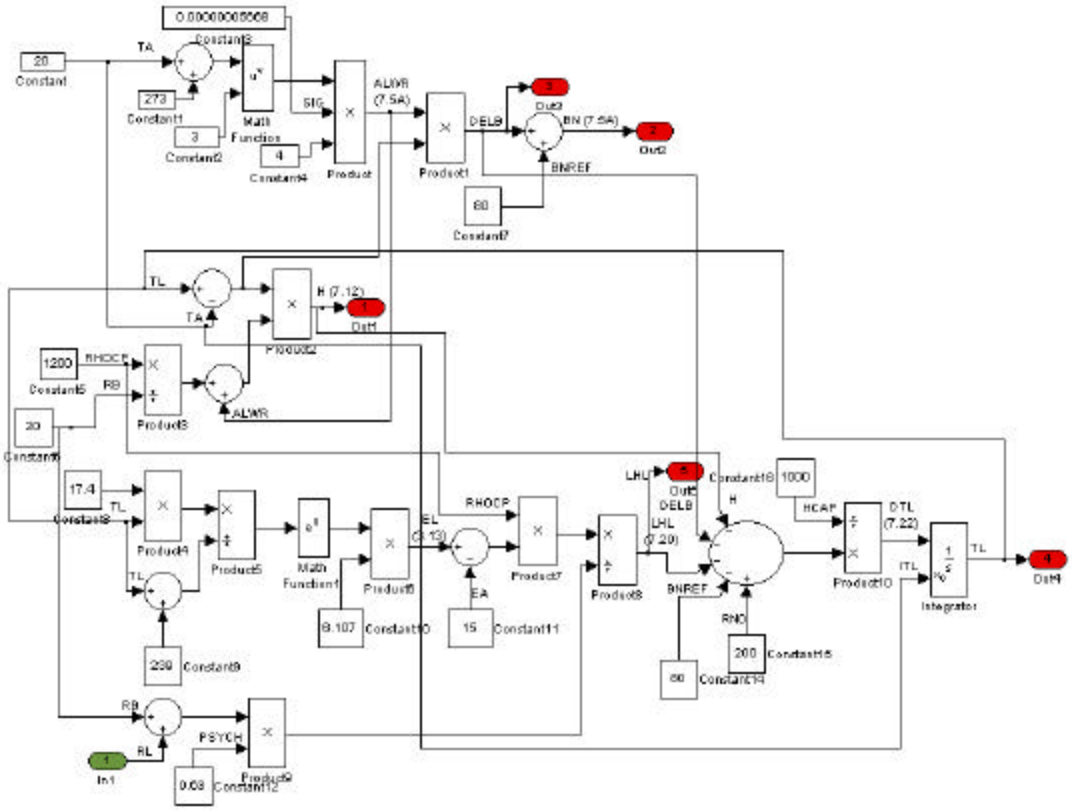
```
function [OUT] = ASSIMH(u)


AMAX = u(1);
EFF = u(2);
LAI = u(3);
PARDR = u(4);
PARDF = u(5);

%Subrutina ASSIMH:
%realiza una integración Gaussiana sobre la profundidad del dosel
%seleccionando tres diferentes LAI's y calculando la asimilación
%en esos niveles de LAI. La variable integrada es FGROS.
%Esto es para una situación simple: hojas horizontales y negras.

%Pesos de Gauss para tres puntos de Gauss
XGAUSS=[0.112702 0.500000 0.887298];
WGAUSS=[0.277778 0.444444 0.277778];


%selección de profundidad del dosel, la asimilación del dosel es clocada en
cero.
FGROS=0;
ABSRAD=0;

for i=1:3,
```

```
  LAIC=LAI*XGAUSS(1,i);
  EXT=exp(-1*LAIC);

  %flujo absorbido (J/m2 hoja/s) para hojas sombreadas y asimilación de hojas
sombreadas.

  VISSHD=PARDF*EXT;
  FGRSH=AMAX*(1-exp(-VISSHD*EFF/AMAX));

  %flujo absorbido directo por hojas  y asimilación de área de hoja iluminada.

  VISSUN=VISSHD+PARDR;
  FGRSUN=AMAX*(1-exp(-VISSUN*EFF/AMAX))

  %fracción solar FSLLA igual a EXT.
  FSLLA=EXT;

   %La razon de asimilacion local FGL es suma de peso de la contribución de
iluminado y sombreado.
  FGL=FSLLA*FGRSUN+(1-FSLLA)*FGRSH;

   %integración de la razón de asimilación local para la asimilación del dosel
(FGROS).
  ABSRAD=ABSRAD+(FSLLA*VISSUN+(1-FSLLA)*VISSHD)*WGAUSS(1,i);
  FGROS=FGROS+FGL*WGAUSS(1,i);
end

ABSRAD=ABSRAD*LAI;
FGROS=FGROS*LAI;
OUT=[ABSRAD,FGROS]
end
```

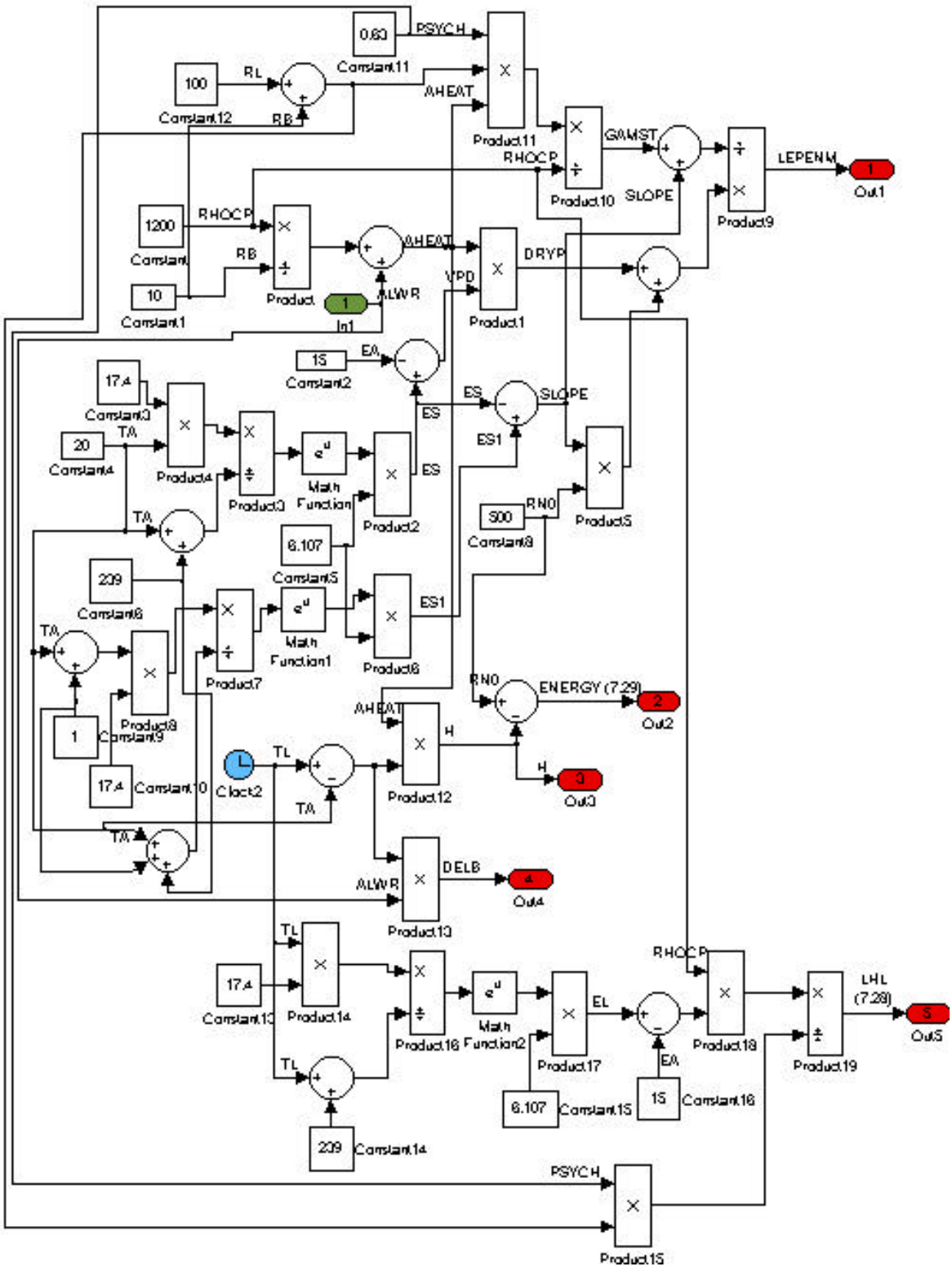
Subrutina de fotosíntesis para hojas horizontales.



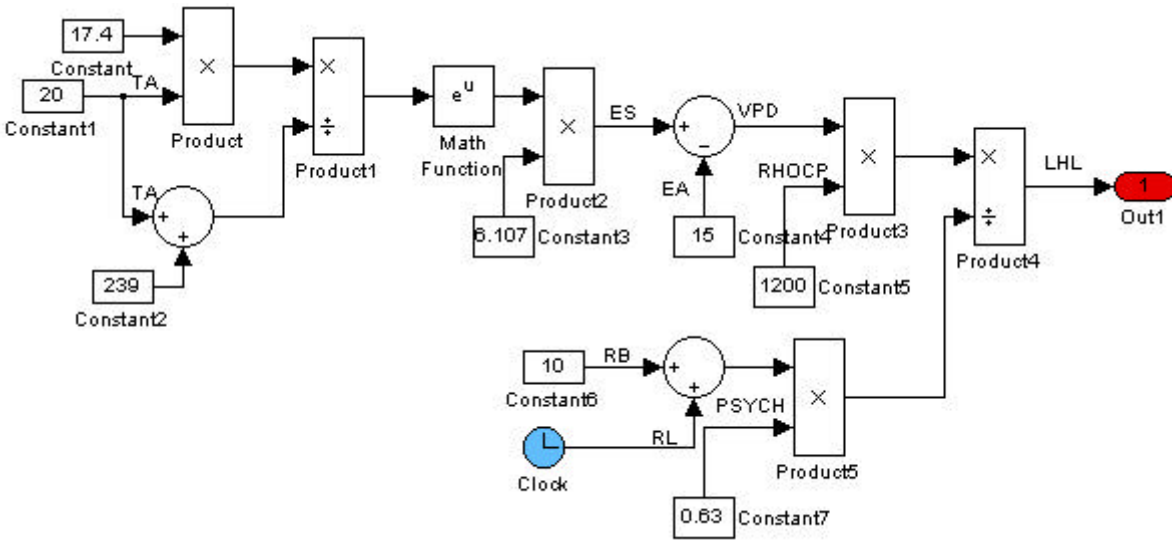
Programa 5.18. Perfil de radiación para hojas negras, radiación cerca del infrarrojo y radiación fotosintética (PAR). El ángulo de distribución de la hoja es horizontal.



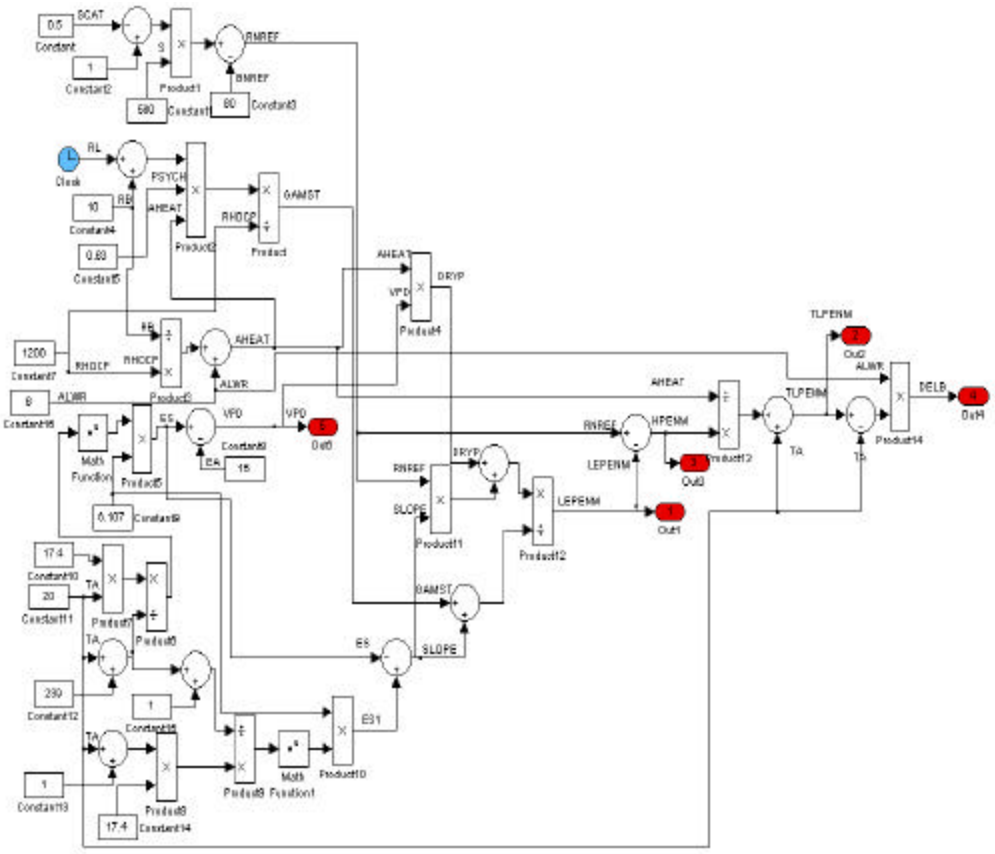
Programa 5.19. Transpiración de una sola hoja.



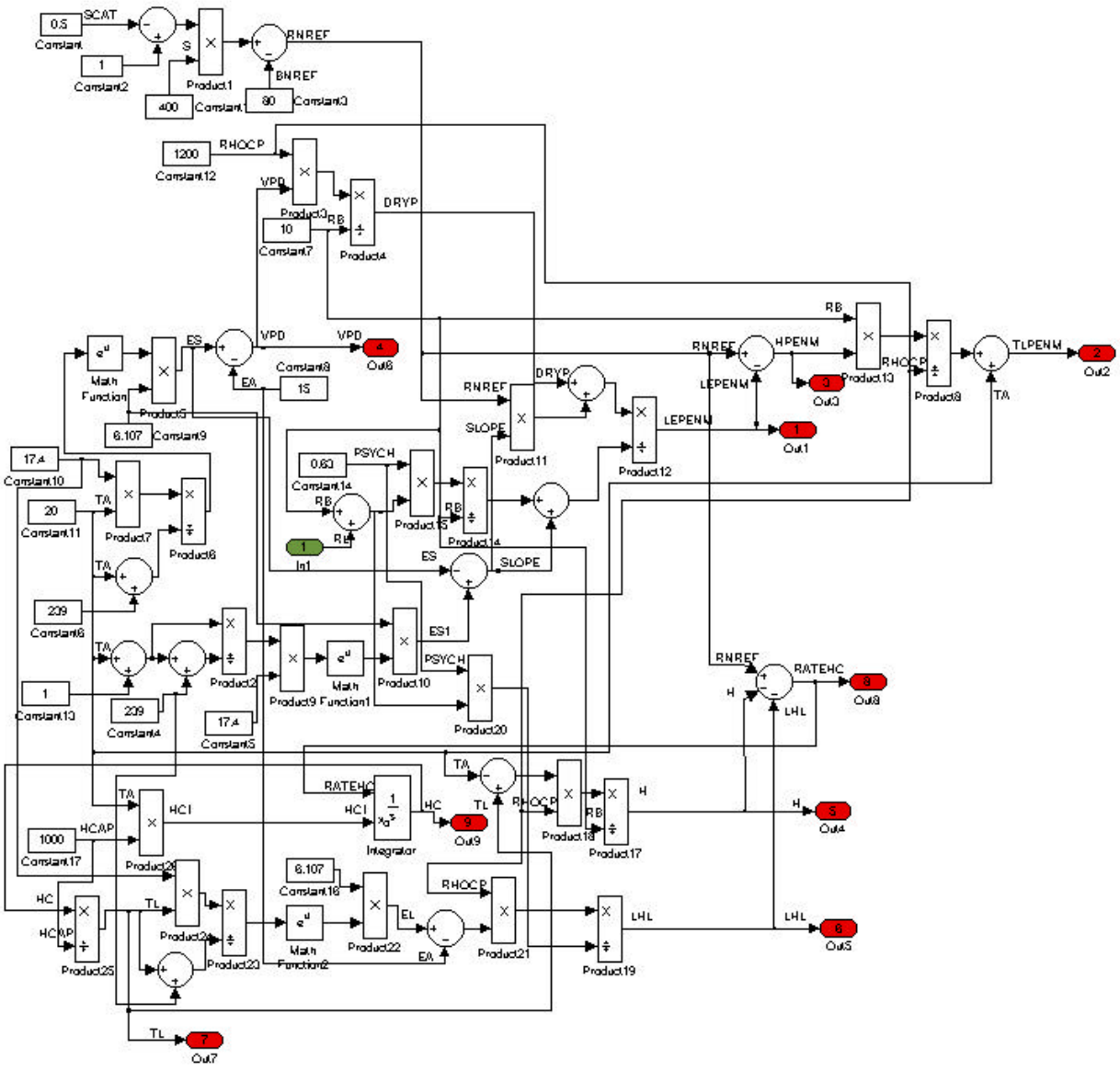
Programa 5.20. Transpiración de una sola hoja, comparación del método de simulación dinámica con la ecuación de combinación de Penman-Monteith.



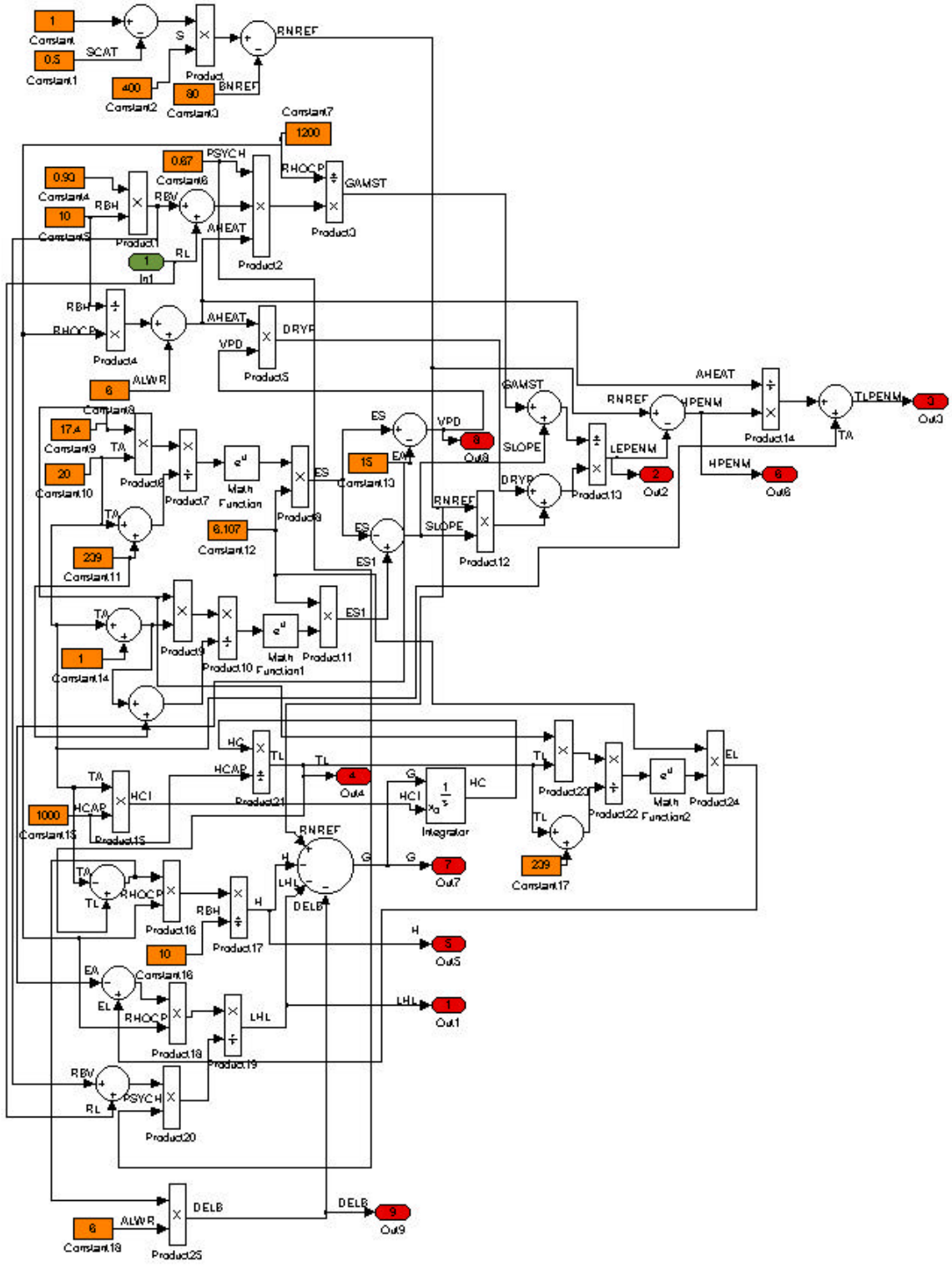
Programa 5.21. Transpiración de una sola hoja a temperatura fija.



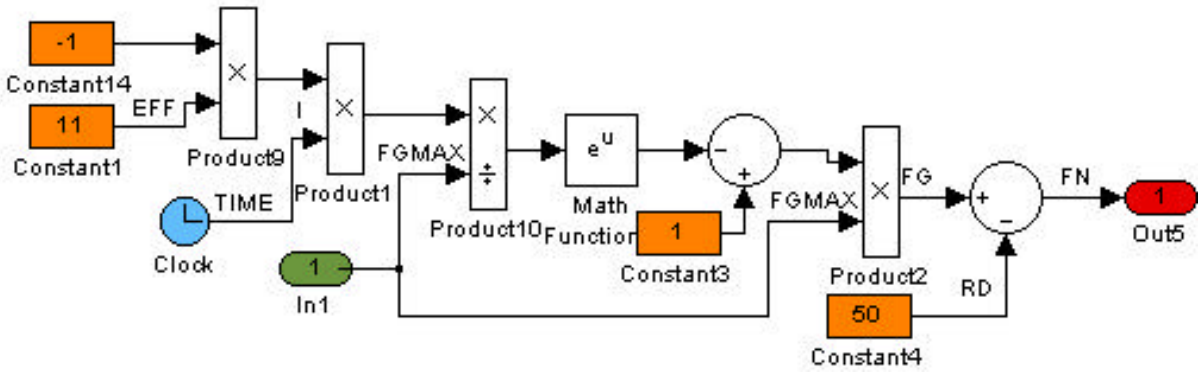
Programa 5.22. Dependencia de la transpiración de una sola hoja en la resistencia estomatal, cuando la resistencia de la hoja es calculada de acuerdo al balance de energía.



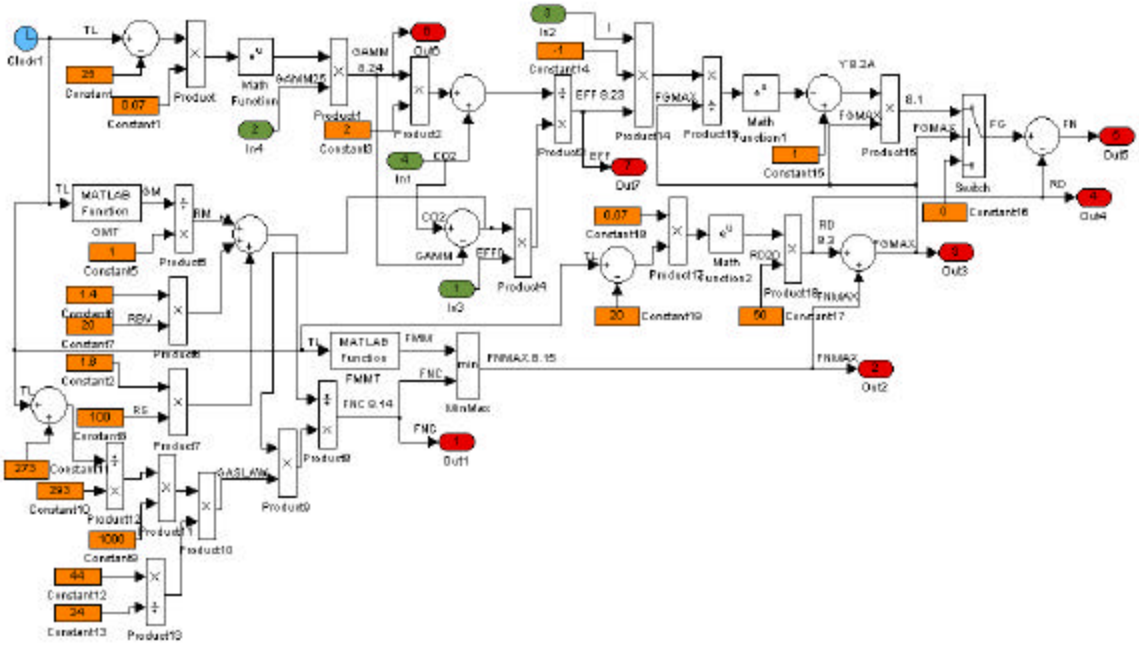
Programa 5.23. Simulación dinámica simplificada del balance de energía de la hoja, para tres resistencias estomatal características.



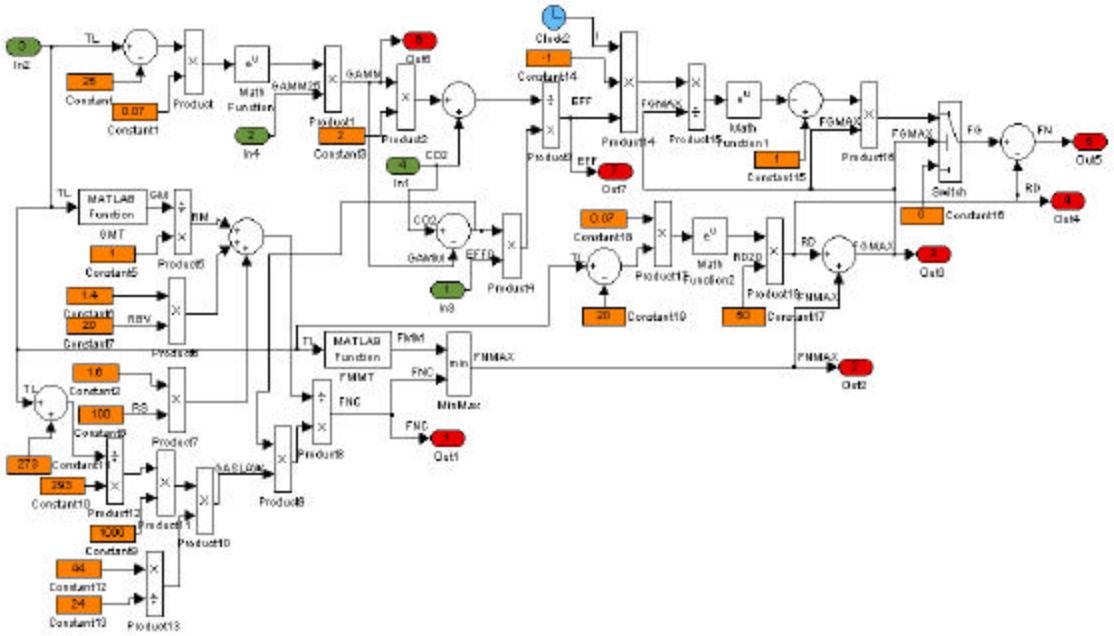
Programa 5.24. Simulación dinámica del balance de energía de la hoja, para tres resistencias. El efecto de la radiación térmica es agregado, así como el factor en el que el coeficiente de difusión del vapor de agua es más grande que el del calor.



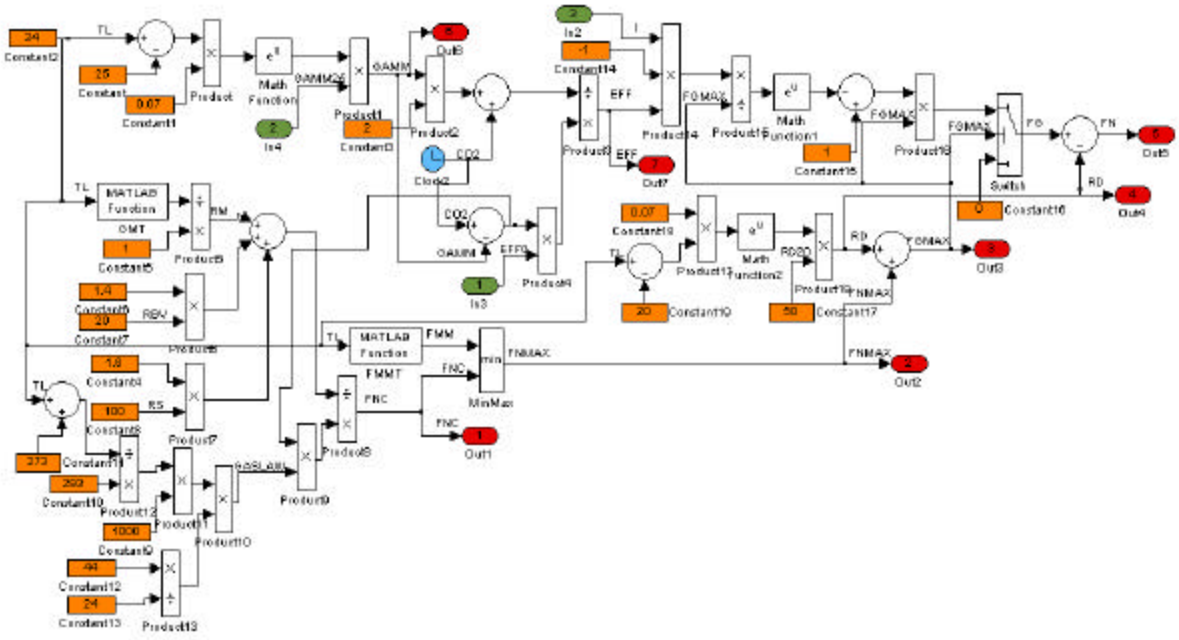
Programa 5.25. Curva de respuesta fotosíntesis - luz.



Programa 5.26. Respuesta fotosíntesis - temperatura.



Programa 5.27. Respuesta fotosíntesis - luz con diferente concentración de CO_2.



Programa 5.28. Respuesta fotosíntesis - temperatura, estimación de la resistencia del mesófilo.