

**PREDICCIÓN DEL CRECIMIENTO, DESARROLLO Y  
PRODUCCIÓN DE CULTIVOS FORRAJEROS CON UN MODELO  
BIOFÍSICO DE SIMULACIÓN Y EL PROGRAMA DSSAT, EN EL  
SUR DE NUEVO LEÓN, MÉXICO.**

**FIDEL MAXIMIANO PEÑA RAMOS**

**T E S I S**

Presentada como Requisito Parcial para  
Obtener el Grado de:

**MAESTRO EN CIENCIAS  
EN ZOOTECNIA.**



**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA  
ANTONIO NARRO**

Buenavista, Saltillo, Coahuila, México  
Febrero del 2011

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO  
SUBDIRECCIÓN DE POSTGRADO**

**PREDICCIÓN DEL CRECIMIENTO, DESARROLLO Y PRODUCCIÓN  
DE CULTIVOS FORRAJEROS CON UN MODELO BIOFÍSICO DE  
SIMULACIÓN Y EL PROGRAMA DSSAT, EN EL SUR DE NUEVO  
LEÓN, MÉXICO.**

**TESIS**

**POR:**

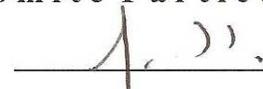
**FIDEL MAXIMIANO PEÑA RAMOS**

**Elaborada bajo la supervisión del comité de asesoría y aprobada como  
requisito parcial, para optar al grado de:**

**Maestro en Ciencias  
en Zootecnia**

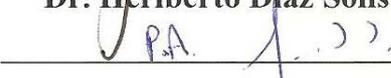
**Comité Particular**

**Asesor principal:**

  
\_\_\_\_\_

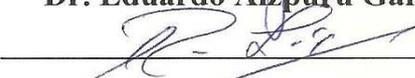
**Dr. Heriberto Díaz Solís**

**Vocal:**

  
\_\_\_\_\_

**Dr. Eduardo Aizpuru García**

**Vocal:**

  
\_\_\_\_\_

**Dr. Ramiro López Trujillo**

**Vocal:**

  
\_\_\_\_\_

**Dr. Froylan Rincón Sánchez**

**Vocal:**

  
\_\_\_\_\_

**Dr. Víctor Manuel Zamora Villa**

\_\_\_\_\_  
**Dr. Fernando Ruíz Zárate**  
**Subdirector de Postgrado**  
**Buenvista Saltillo, Coahuila, México.**  
**Febrero 2011**

## **AGRADECIMIENTOS**

A la **Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro**, por formarme profesionalmente.

**Al Dr. Heriberto Díaz Solís**, por la confianza otorgada y la conducción del presente trabajo, lo que permitió mi proceso de formación profesional y personal.

**Al Dr. Eduardo Aizpuru García**, por sus consejos y aportaciones en el desarrollo de este trabajo.

**Al Dr. Ramiro López Trujillo**, por sus aportaciones en esta investigación.

**Al Dr. Froylan Rincón Sánchez**, por sus aportaciones y consejos a esta investigación.

**Al Dr. Víctor Manuel Zamora Villa**, por su paciente revisión, aportaciones y consejos del documento

**Al consejo nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT)**, por el apoyo económica durante mis estudios de posgrado.

**AL Dr. Raúl Rodríguez García**, por sus comentarios a esta investigación.

**AL Dr. Francisco Rodríguez Martínez**, por sus aportaciones a esta investigación.

**Al F. M. Jesús Ricardo Canales Ramos**, por su valiosa contribución en esta investigación.

**A la Ing. María de Lourdes Hernández Hernández**, por la medición de área foliar, pesado de muestras, disposición del laboratorio y de su valioso tiempo.

**A la Biol. Silvia Guerrero Martínez**, por su colaboración en análisis de muestras de suelo.

**A la Lic. Ma. Del Socorro Míreles Vázquez**, su colaboración en análisis de muestras de suelo.

**Al Sr. Jesús H. Cabrera Hernández**, por su disposición y apoyo durante las mediciones de campo.

**Al Sr. Elías A. García López**, por su colaboración en el muestreo de campo y pesado de muestras.

**COMPENDIO**

**PREDICCIÓN DEL CRECIMIENTO, DESARROLLO Y  
PRODUCCIÓN DE CULTIVOS FORRAJEROS BAJO UN MODELO  
BIOFÍSICO DE SIMULACIÓN Y EL PROGRAMA DSSAT, EN EL  
SUR DE NUEVO LEÓN, MÉXICO.**

**POR**

**FIDEL MAXIMIANO PEÑA RAMOS**

**MAESTRÍA EN CIENCIAS  
EN ZOOTECNIA**

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO  
BUENAVISTA, SALTILLO, COAHUILA, MÉXICO, FEBRERO 2011**

**DR. HERIBERTO DÍAZ SOLÍS --ASESOR--**

**Palabras clave: Simulación, modelo biofísico, maíz, cebada,  
triticale, trigo avena, alfalfa, STELLA, DSSAT, Coeficientes  
genéticos.**

Los modelos biofísicos de simulación son una alternativa para predecir eventos importantes en un cultivo, y son una herramienta para investigar procesos en todo tipo de sistemas.

Los modelos biofísicos de simulación ayudan a tomar decisiones anticipadas de las prácticas de manejo con lo que ayudan a reducir los costos de producción en sistemas productivos. En sistemas agrícolas, juegan un papel importante porque explican los mecanismos fisiológicos de los cultivos en función del sistema clima.

Los objetivos planteados en este trabajo fueron: -Construir y evaluar con el programa Stella, modelos biofísicos de simulación del crecimiento, desarrollo y producción para los cultivos de maíz (JAGUAN), cebada (Narro-95-02), triticale (AN-31-B), trigo (AN-239) y avena (Cuauhtémoc) -Calibrar el programa DSSAT mediante coeficientes genéticos para las variedades de maíz (JAGUAN) y para cebada (Narro-92-05), triticale (AN-31-B) trigo (AN-239), y - Evaluar el modelo de alfalfa ALFAMOD propuesto por Rojas (2008).

Los trabajos experimentales se desarrollaron en el campo agrícola de una unidad de producción en la comunidad "El Prado" y en el campo experimental de la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, ubicados en el municipio de Galeana, Nuevo León, México.

El maíz se sembró el 21 de mayo de 2008, en este cultivo se establecieron tres niveles de fertilización con tres densidades de población, el ciclo de este cultivo concluyó el 31 de octubre de 2008. Para el maíz y los cultivos de invierno se evaluaron las variables: materia seca parcial aérea, materia seca parcial en hoja, materia seca parcial en tallo e índice de área foliar. Estas variables se utilizaron para calibrar el programa DSSAT.

En los cereales de invierno se utilizaron los cultivos de cebada (Narro-95-02), triticale (AN-31-B), trigo (AN-239) y avena (Cuauhtémoc). La siembra se realizó el 15 de noviembre de 2008 en una superficie de 2500 m<sup>2</sup> para cada uno de los materiales y una densidad de siembra de 160 kg/ha. Dentro de cada cultivo se establecieron 15 parcelas de 16x10 m. Los muestreos se realizaron cada 14 días durante el ciclo del cultivo (15/11/2008-17/04/2009).

El cultivo de la alfalfa se estableció el 7 de marzo de 2007 con la variedad cuf-101. La siembra se realizó al voleo con una densidad de 35 kg/ha, la toma de datos (cortes) comenzó el 26 de junio del mismo año, este cultivo se muestreo durante dos años consecutivos. Las variables evaluadas fueron: Materia seca parcial aérea, Número de hojas, Altura, Índice de área foliar, Proteína cruda, Fibra detergente ácido, Fibra detergente neutral y Rendimiento anual. Estos resultados se utilizaron para evaluar el modelo ALFAMOD en su versión estocástica y ALFAMOD en su versión determinística.

Para simular las variables de estudio en cereales de invierno, maíz y alfalfa se utilizó el programa STELLA. Los resultados obtenidos en la simulación son cercanos a los observados en campo con coeficientes de determinación ( $R^2$ ) entre los valores observados y simulados superiores a 0.9. El programa DSSAT también mostró buenos resultados en los cultivos de maíz y cereales de invierno, ya que, al igual que en STELLA, los valores de  $R^2$  en su mayoría son mayores a 0.9. El valor de la raíz cuadrada del cuadrado medio del error (RMSE) fue aceptable en todas las variables simuladas (Cereales de invierno y maíz).

## **ABSTRACT**

### **GROWTH, DEVELOPMENT AND YIELD PREDICTION OF FORAGE CROPS BY A BIOPHYSICAL SIMULATION MODEL AND THE DSSAT PROGRAM APPLIED TO DATA FROM SOUTHERN NUEVO LEON, MEXICO.**

Biophysical simulation models are an alternative to predict important events in culture and a tool to investigate processes in all types of systems. Biophysical simulation models help to make advanced decisions of the management practices that help to reduce production costs in production systems. Biophysical simulation models play an important role agricultural system because they explain the physiological responses of crops to climate.

The objectives of this study were: -To build and evaluate program Stella, to biophysical models simulating growth, development and yield of corn (Jaguar), barley (Narro-95-02), triticale (AN-31 -B), wheat (AN-239) and oats (Cuauhtemoc) -To calibrate the DSSAT program by means of genetic coefficients for maize (JAGUAN), barley (Narro-92-05), triticale (AN-31-B) wheat (AN-239), and-evaluate alfalfa model ALFAMOD designed by Rojas (2008).

The experimental research was developed in the agricultural field production unit from the "El Prado" community and in the experimental field of Antonio Narro University, located in Galeana, Nuevo Leon, Mexico.

Corn was seeded by May 21 of 2008. This cultivar was subjected to three levels of fertilizing applied to three growth densities. Yield was determined in October. Variables considered for corn and winter cultivars were partial dry matter, leaf dry matter, stem dry matter, and leaf area index. The DSSAT program was calibrated by means of previous variables.

Varieties for winter cereals were as follows: (Narro-95-02) for barley, (AN-31-B) for triticale, (AN-239) for wheat and (Cuauhtémoc var.). These cultivars were seeded by November 15 of 2008 in an area 2500 squared meter for each at 160 kg/ha density. Each sampling unit was divided in 15 subunits (16x10 m.). Sampling was undertaken every 14 day during the cycle of the crop (11/15/2008-04/17/2009).

## ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE CUADROS.....	xii
ÍNDICE DE FIGURAS.....	xvii
I. INTRODUCCIÓN.....	1
Objetivos.....	2
Objetivo general.....	2
Objetivos específicos.....	2
Hipótesis.....	3
II. REVISIÓN DE LITERATURA.....	4
Modelos biofísicos de simulación.....	5
Aplicación en la agricultura.....	7
Elementos del modelo biofísico de simulación.....	9
Radiación.....	10
Temperatura.....	11
La temperatura como parámetro de control en los modelos fenológicos.....	11
Acumulación de materia seca.....	12
Altura, número de hojas, peso seco en tallo y peso seco total.....	14
Descripción y uso de DSSAT.....	14
Descripción de Stella.....	15
III. MATERIALES.....	Y
MÉTODOS.....	177
Cultivo de maíz.....	17
Descripción del experimento.....	17
Variables de respuesta.....	17
Datos climáticos.....	19
Información básica para el funcionamiento del programa DSSAT.....	21
Descripción del modelo MAIZ-UAN.....	23
Cultivos de cereales de invierno.....	31
Descripción del experimento.....	31
Variables de respuesta.....	31
Datos climáticos.....	33

Información básica para el funcionamiento del programa DSSAT	34
Descripción del modelo CER-UAN	35
Cultivo de Alfalfa	37
Descripción del experimento	37
Variables de respuesta	38
Descripción del modelo ALFAMOD	39
IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	40
Cultivo de maíz (DSSAT)	40
Materia seca parcial aérea (MSA)	41
Materia seca parcial en hoja (MSH)	43
Materia seca parcial en tallo (MST)	45
Índice de área foliar (IAF)	47
Resultados del modelo MAIZ-UAN (STELLA 9.0.2)	49
Materia seca parcial aérea (MSA)	49
Materia seca parcial en hoja (MSH)	52
Materia seca parcial en tallo (MST)	54
Índice de área foliar (IAF)	55
Valor nutritivo	57
Cereales de invierno (DSSAT)	58
Materia seca parcial aérea (MSA)	60
Materia seca parcial en hoja (MSH)	61
Materia seca parcial en tallo (MST)	63
Índice de área foliar (IAF)	65
Resultados del modelo CER-UAN (STELLA 9.0.2)	66
Materia seca parcial aérea (MSA)	67
Materia seca parcial en hoja (MSH)	68
Materia seca parcial en tallo (MST)	70
Índice de área foliar (IAF)	71
Valor nutritivo	73
Contenido de proteína en el dosel (CPD) por el modelo CER-UAN	77
Cultivo de alfalfa	79
Resultados de ALFAMOD estocástico	79
Valor nutritivo	79
Resultados de ALFAMOD determinístico	80
Valor nutritivo	83
Prueba de t para valores simulados y observados	87
V. CONCLUSIONES	89
VI. LITERATURA CITADA	92
VII. APÉNDICE	99
Apéndice A	99

## ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 3.1. Variables meteorológicas (Radiación Y Temperatura) promedio mensual de los años 2007-2009 y promedios de largo plazo (13 años) registrada en la comunidad el Prado, Navidad y el Cuije, Galeana, Nuevo León, México. ....	24
Cuadro 3.2. Secuencias de corte en el cultivo alfalfa variedad CUF-101 en Navidad, Galeana Nuevo León, México. ....	37
Cuadro 4.1. Coeficientes genéticos utilizados en DSSAT para un buen nivel de ajuste en el cultivo de maíz var JAGUAN. ....	40
Cuadro 4.2. Materia seca parcial aérea máxima simulada y observada, y estimadores estadísticos de las series para 3 densidades de población y 3 niveles de fertilización en el programa DSSAT ....	43
Cuadro 4.3. Materia seca en hoja máxima simulada y observada, y estimadores estadísticos de las series para 3 densidades de población y 3 niveles de fertilización en el programa DSSAT....	45
Cuadro 4.4. Materia seca en tallo máxima simulada y observada, y estimadores estadísticos de las series para 3 densidades de población y 3 niveles de fertilización en el programa DSSAT....	46
Cuadro 4.5. Índice de área foliar máxima simulada y observada, y estimadores estadísticos de las series para 3 densidades de población y 3 niveles de fertilización en el programa DSSAT....	48
Cuadro 4.6. Materia seca parcial aérea máxima simulada y observada, y estimadores estadísticos de las series para 3 densidades de población y 3 niveles de fertilización en el modelo MAIZ-UAN..	51

Cuadro 4.7. Materia seca parcial en hoja máxima simulada y observada, y estimadores estadísticos de las series para 3 densidades de población y 3 niveles de fertilización en el modelo MAIZ-UAN. .	53
Cuadro 4.8. Materia seca parcial en tallo máxima simulada y observada, y estimadores estadísticos de las series para 3 densidades de población y 3 niveles de fertilización en el modelo MAIZ-UAN. .	55
Cuadro 4.9. Índice de área foliar simulada y observada máxima, y estimadores estadísticos de las series para 3 densidades de población y 3 niveles de fertilización. ....	56
Cuadro 4.10. Proteína cruda (pc), fibra en detergente-ácido (FDA) y fibra en detergente-neutral (FDN) máxima simulada y observada, y estimadores estadísticos de la serie para tres densidades de población y tres niveles de fertilización (unidades) en el modelo MAIZ-UAN. ....	58
Cuadro 4.11. Coeficientes genéticos utilizados durante la calibración de los modelos DSSAT .....	59
Cuadro 4.12. Materia seca parcial aérea máxima observada y simulada, y estimadores estadísticos de las series en el modelo CER-UAN. ....	68
Cuadro 4.13. Materia seca parcial en hoja máxima observada y simulada, y estimadores estadísticos de las series en el modelo CER-UAN. ....	69
Cuadro 4.14. Materia seca parcial en tallo máxima observada y simulada, y estimadores estadísticos de las series en el modelo CER-UAN. ....	71
Cuadro 4.15. Valores máximos simulados y observados e indicadores estadísticos de las variables (var) PC, FDA Y FDN, en alfalfa con 35 días de rebrote. ....	86

## INDICE DE FIGURAS

- Figura 3.1. Submódulo clima (a), submódulo crecimiento y desarrollo (b) y submódulo manejo (c) del MAIZ-UAN variedad JAGUAN..... 25
- Figura 4.1 Materia seca parcial aérea (MSA) simulada y observada para tres niveles de fertilización nitrogenada (0, 60 y 120 unidades de nitrógeno) y tres densidades de población (DP1=30000, DP2=50000 Y DP3=70000 plantas/ha) por el programa DSSAT..... 42
- Figura 4.2. Materia seca parcial en hoja (MSH) simulada y observada para tres niveles de fertilización nitrogenada (0, 60 y 120 unidades de nitrógeno) y tres densidades de población (DP1=30000, DP2=50000 Y DP3=70000 plantas/ha) por el programa DSSAT. .... 44
- Figura 4.3. Materia seca parcial en tallo (MST) simulada y observada para tres niveles de fertilización (0, 60 y 120 unidades de nitrógeno) y tres densidades de población (DP1=30000, DP2=50000 Y DP3=70000 PLANTAS/HA) por el programa DSSAT..... 46
- Figura 4.4. Índice de área foliar (iaf) simulado y observado para tres niveles de fertilización nitrogenada (0, 60 y 120 unidades de nitrógeno) y tres densidades de población (DP1=30000, DP2=50000 Y DP3=70000 plantas/ha) por el programa DSSAT..... 48
- Figura 4.5. materia seca parcial aerea (msa) simulada y observada para tres niveles de fertilización nitrogenada (0, 60 y 120 unidades de nitrógeno) y tres densidades de población (DP1=30,000; DP2=50,000 y DP3=70,000 plantas/ha) por el modelo MAIZ-UAN. .... 51
- Figura 4.6. Materia seca parcial en hoja (MSH) simulada y observada para tres niveles de fertilización nitrogenada (0, 60 y 120 unidades de nitrógeno) y tres densidades de población

(DP1=30,000; DP2=50,000 y DP3=70,000 PLANTAS/HA) por el modelo MAIZ-UAN. ....	53
Figura 4.7. Materia seca parcial en tallo (mst) simulada y observada para diferentes niveles de nitrógeno (0, 60 y 120 unidades de nitrógeno) y tres densidades de población (DP1=30,000; DP2=50,000 y DP3=70,000 PLANTAS/HA) por el modelo MAIZ-UAN. ....	55
Figura 4.8. Índice de área foliar (iaf) simulado y observado para diferentes niveles de nitrógeno (0, 60 y 120 unidades de nitrógeno) y tres densidades de población por el modelo MAIZ-UAN. ....	56
Figura 4.9. (a) Proteína cruda (PC), (b) Fibra en detergente ácido (FDA) y (c) fibra en detergente neutral observada y simulada con tres niveles de fertilización por MAIZ-UAN. ....	57
Figura 4.10. Materia seca parcial aérea (MSA) simulado y observado en tres variedades de los cultivos; Cebada (a), Triticale (b) y Trigo (c), durante los ciclo (15 de Noviembre 2008 al 17 de abril de 2009). ....	61
Figura 4.11. Materia seca parcial en hoja (MSH) simulado y observado en tres variedades de los cultivos; Cebada (a), Triticale (b) y Trigo (c), durante los ciclo (15 de noviembre 2008 al 17 de abril de 2009) ....	62
Figura 4.12. materia seca parcial en tallo (mst) simulado y observado en tres variedades de los cultivos; Cebada (a), Triticale (b) Y Trigo (c), durante los ciclo (15 de Noviembre 2008 al 17 de Abril de 2009). ....	64
Figura 4.13. Índice de área foliar (IAF) simulado y observado en tres variedades de los cultivos; Cebada (a), Triticale (b) y Trigo (c), durante los ciclo (15 DE Noviembre 2008 al 17 de Abril de 2009). ....	66
Figura 4.14. Materia seca parcial aérea en los cultivos de cebada (a), triticale (b), Trigo (c) y Avena (d) con datos observados y simulados por el MODELO CER-UAN (Apendice A, Figura A1).....	68

Figura 4.15. Materia seca parcial en hoja (MSH) de los cultivos de cebada (A), TRITICALE (b), Trigo (c) y Avena (d) con datos observados y simulados por el modelo CER-UAN.....	69
Figura 4.16. Materia seca parcial en tallo de los cultivos de Cebada (a), Triticale (b), Trigo (c) y Avena (d) con datos observados y simulados por el modelo CER-UAN.....	70
Figura 4.17. Índice de área foliar (IAF) simulado y observado en cuatro variedades de los cultivos; Cebada (a), Triticale (b), Trigo (c) y Avena (d), durante los ciclo (15 de Noviembre 2008 al 20 de Abril de 2009).....	73
Figura 4.18. Porcentaje de proteína cruda en; a) Triticale (AN-31-B), b) Trigo (AN-239) Y C) Avena (Cuauhtémoc) simulados y observados con el modelo CER-UAN y datos de laboratorio durante el ciclo del cultivo. ....	74
Figura 4.19. Porcentaje de fibra en detergente ácido en; a) Triticale (AN-31-B), B) Trigo (AN-239) y c) Avena (Cuauhtémoc) simulados y observados bajo un CER-UAN y datos de laboratorio durante el ciclo del cultivo. ....	75
Figura 4.20. Porcentaje de fibra en detergente neutral en; a) Triticale (AN-31-B), B) Trigo (AN-239) y c) Avena (Cuauhtémoc) simulados y observados con el modelo CER-UAN y datos de laboratorio durante el ciclo del cultivo. ....	77
Figura 4.21. Calidad nutritiva simulada por cer-uan en los cultivos de Triticale, Trigo y Avena.....	78
Figura 4.22. Media y desviación estándar de valores simulados para las variables: (a) materia seca parcial aérea (MSP); (b) número de hojas (NHJ), (c) altura (ALT) y (d) índice de área foliar (IAF) (n=100). ....	79
Figura 4.23. (a) Proteína cruda %, (b) fibra en detergente ácido % y (c) fibra en detergente neutral % simulada por ALFAMOD estocástico. ....	81

Figura 4.24. Valores simulados y observados de las variables: (a) materia seca parcial aérea (MSA); (c) número de hojas (NHJ); (d) altura (ALT) e (b) índice de área foliar (IAF). .....	82
Figura 4.25. Proteína cruda (a), fibra detergente ácido (b) y fibra detergente neutro (c) simulada y observada para la alfalfa CUF-101 por ALFAMOD determinístico. ....	85
Figura 4.26 Comparación de valores simulados y observados de las variables: (a) materia seca parcial aérea (MSA); (b) número de hojas (NHJ); (c) altura (ALT) y (d) índice de área foliar (IAF).....	86
Figura 4.27.Comparación de valores de cortes observados y simulados de las variables: (a) materia seca parcial aérea; (b) número de hojas; (c) altura e (d) índice de área foliar. ....	87
Figura 4.28. Rendimiento anual simulado durante los periodos (2007-2008 y 2008-2009) por ALFAMOD estocástico y determinístico.....	89
Figura a1. Submodulo clima (a) , submodulo crecimiento y desarrollo (b) y submodulo manejo (c) del del modelo CER-UAN. ....	98
Figura A2. Submodulo clima (a) , submodulo crecimiento y desarrollo (b) y submodulo manejo (c) de ALFAMOD estocastico.....	103

## I. INTRODUCCIÓN

Para tomar decisiones en el área de agronomía se necesita generar diferentes escenarios atmosféricos para simular variables tales como crecimiento, desarrollo, producción y rendimiento de los cultivos. El contar con predicciones acertadas de algunas de estas variables ayuda a tomar mejores decisiones para la calendarización de actividades de campo, la rentabilidad y recomendaciones de cultivos en eventos catastróficos. En este sentido se han sugerido diversas herramientas y métodos como los modelos biofísicos de simulación explicados desde el punto de vista de los mecanismos o procesos (Thornley, 1998) o de sistema de apoyo para la toma de decisiones en la transferencia agro-tecnológica (DSSAT, Decision Support System for Agrotechnology Transfer). Este programa se utiliza actualmente en varios países de Europa, Asia, Norteamérica, Latinoamérica y África (ICASA, 2006).

En México, es escaso el uso de estas herramientas (DSSAT y Modelos biofísicos de simulación) para la toma de decisiones en el sector agropecuario. De ahí, la importancia de usar estas herramientas para el análisis y definición de modelos de predicción de la respuesta en cultivos agrícolas.

Los sistemas de producción agrícolas, tienen procesos no lineales como los estados fenológicos, la evolución de la producción de materia seca por cada función de la planta y el rendimiento en función de la variedad empleada (Carrillo,2000;Forjan,2002).

## **Objetivos**

### **Objetivo general**

Construir y evaluar modelos de simulación del crecimiento, desarrollo y producción de cultivos forrajeros.

### **Objetivos específicos**

- Calibrar el programa DSSAT mediante coeficientes genéticos para las variedades de maíz JAGUAN, cebada (Narro-92-05), triticale (AN-31-B) y trigo (AN-239).
- Construir modelos biofísicos simples en STELLA para los cultivos de maíz, cebada, triticale, trigo y avena.
- Evaluar el modelo de simulación ALFAMOD descrito por Rojas (2008).

## **Hipótesis**

Los modelos creados en STELLA y DSSAT proveen con una buena estimación del crecimiento, desarrollo y producción de cultivos forrajeros.

## II. REVISIÓN DE LITERATURA

El crecimiento, desarrollo y producción de un cultivo es consecuencia del medio ambiente y de la tecnología de producción.

Una de las metodologías que existen para relacionar crecimiento, desarrollo y producción de las especies con el medio en que se producen es la teoría de sistemas, cuya base conceptual consiste en distinguir los fenómenos como un todo indivisible y no tan solo como la suma de sus partes.

La aplicación de la teoría de sistemas en el campo de la biología se inicia en 1938 con Nicolás Rashevsky en la escuela de biofísica-matemática de la Universidad de Chicago, aun cuando se mencionan trabajos precursores como los de Lotka y Volterra desde 1925, y Bertalanffy en 1932 (Carlevaro, 1986).

Leeper *et al.* (1974a) y Stanhill (1977), mencionan que los primeros análisis cuantitativos de la relación cultivo ambiente se inician en los años 20's tomando mayor ímpetu después de la segunda guerra mundial.

Entre los trabajos sobresalientes se mencionan a Hendricks y Scholl (1943), Runge y Odell (1958), y Lomas y Shashua (1973), quienes utilizan la regresión múltiple de Fisher para estimar la producción del cultivo en función de variables climáticas como temperatura y precipitación.

En los últimos años, Johnson y Thornley (1990), Thornley y France (2008), han desarrollado una serie de modelos de simulación tanto mecanísticos, dinámicos, estocásticos y determinísticos, a través de los cuales hacen un análisis matemático e integran estos para obtener modelos biofísicos de simulación.

A partir del estudio del efecto del ambiente sobre cada elemento del sistema de producción se ha obtenido la información necesaria para generar y utilizar los modelos biofísicos en la agricultura como herramienta que facilitan el análisis de crecimiento, desarrollo y producción agrícola.

### **Modelos biofísicos de simulación**

Thornley (1984), y Thornley y Johnson (2000), definen a los modelos como simplificaciones de la realidad que describen y explican los fenómenos ya sea en forma teórica o conceptual (modelos matemáticos), o bien en forma analógica. Al proceso de imitación de un fenómeno se le denomina modelo.

Una característica fundamental de los sistemas biológicos es que son gobernados por las leyes de la termodinámica (modelos biofísicos), es decir responden a condiciones ambientales.

En los últimos años se ha hecho común el uso de modelos teóricos o conceptuales en donde inicialmente se definen los límites del sistema de acuerdo a los objetivos que se manejen, y se realiza una descripción del mismo, posteriormente se construye su estructura mediante diagramas, finalmente se elabora una representación matemática o cuantitativa acompañada por lo general de su implementación en computadora (Dent y Blackie, 1979; Grant *et al.*, 1997).

Dalton (1984), y Jonhson (2007) describen como elementos de los modelos biofísicos de simulación los siguientes:

VARIABLES DE MANEJO O VARIABLES EXTERNAS. Las que afectan al sistema pero no se ven afectadas por este, incluyendo aquellas que el hombre controla (ej. Agua disponible, fertilización).

VARIABLES DE ESTADO. Componentes del sistema que cambian con el tiempo (ej. materia seca).

TASAS. Procesos que cuantifican la transferencia de materia y energía dentro del sistema, por mecanismos físicos, fisiológicos o sociológicos (ej. infiltración de agua, fotosíntesis).

PARÁMETROS. Coeficientes o términos que constituyen las tasas o funciones.

Dent y Blackie (1979), establecen que la simulación de un sistema requiere de los siguientes pasos básicos.

- 1) Definición del sistema y de los objetivos del modelo.
- 2) Análisis de los datos relevantes para el modelo.
- 3) Construcción del modelo.
- 4) Validación del modelo.

5) Análisis de sensibilidad.

6) Uso del modelo.

La simulación presenta ventajas tanto por su naturaleza biofísica, como ser un método sensible de interpolación, extrapolación y predicción, sin embargo requiere un conocimiento profundo del proceso simulado que permita distinguir las variables más importantes a considerar dentro del sistema, para facilitar su manejo conceptual.

### **Aplicación en la agricultura**

Baier (1977), define a los modelos de simulación del crecimiento de un cultivo como una representación simplificada de los mecanismos físicos, químicos y fisiológicos bajo los cuales se desarrollan las especies.

Los modelos que se desarrollan para la predicción presentan grandes ventajas al optimizar el manejo de la información que se obtiene a partir de los experimentos realizados en diferentes regiones y años.

Como ejemplo, el modelo DairyMod y el programa DSSAT (Decision Support System for Agrotechnology Transfer). DairyMod permite distinguir los cambios continuos de diferentes especies de forrajes en relación a las condiciones del medio ambiente, y su efecto en el rendimiento final. DSSAT es un programa de

computación interactivo que permite a los usuarios utilizar datos y modelos de simulación para resolver problemas específicos e incluye un programa que integra los modelos de simulación de cultivos con una base de datos, un programa de utilidades, y programas de aplicación de las simulaciones. La finalidad principal de la aplicación de este sistema es mejorar la eficiencia de quienes toman decisiones, reduciendo el tiempo requerido para analizar interacciones complejas.

En la generación y transferencia de tecnología, un modelo de simulación permite definir los límites regionales al detectar respuestas homogéneas en los efectos del suelo y el clima sobre las especies cultivadas. También permite identificar las características genotípicas deseables para una situación ambiental específica (Baier, 1977; Thornton y Dent, 1987).

En esta última década aparecen los primeros modelos de simulación para los cultivos de maíz, soya, trigo y arroz, incluidos en el programa DSSAT. La simulación de sistemas agrícolas empezó entonces a ser una herramienta para la integración de los diferentes componentes productivos dentro de los cultivos agrícolas. Los avances en el conocimiento de las interacciones dentro del ecosistema, influenciados por el ambiente y por las prácticas de manejo, expandieron el potencial de uso de esta herramienta como ayuda para la toma de decisiones (Barrett y Nearing, 1998).

## **Elementos del modelo biofísico de simulación**

De acuerdo con García (1986), el clima es el conjunto de fenómenos meteorológicos que caracterizan el estado medio de la atmósfera en un punto de la superficie terrestre.

Estos fenómenos meteorológicos o elementos del clima que son observados regularmente por el hombre y que constituyen las principales propiedades físicas de la atmósfera son:

Radiación, duración y brillo del sol, precipitación, temperatura y humedad del aire, temperatura y humedad del suelo, presión atmosférica, dirección y velocidad del viento, nubosidad, evaporación, y evapotranspiración (Wallén, 1974; García, 1986).

Si se considera a la radiación como la principal fuente de energía, al agua y al viento como fluidos de la atmósfera que permiten la circulación y aprovechamiento de esta energía, se puede resumir en la radiación solar, la temperatura del aire, y en la precipitación, a las variables climáticas más importantes dentro del sistema de producción agrícola cuya observación diaria, de acuerdo con Dugas y Ainsworth (1985), son los datos de climas más usuales en los modelos biofísicos de simulación (Jonhson, 2007).

## **Radiación**

Hay y Hanson (1985), manifiestan que la radiación solar presenta fluctuaciones irregulares a través del tiempo y el espacio. La causa principal de estas variaciones es el cambio en cantidad, tipo y distribución de la nubosidad. La energía solar que se disipa debido a la presencia de gases (oxígeno, bióxido de carbono, ozono), y vapor de agua, conforma la radiación difusa.

La radiación de onda corta que llega a la superficie terrestre consiste tanto de la radiación solar directa como de la radiación solar difusa. La suma de ambas se denomina como radiación global (Rg). De ésta (Rg), el 50 % se define como radiación fotosintéticamente activa (RFA), con longitud de onda entre los 0.4 y 0.7  $\mu$ ; y se considera una proporción constante en distintas condiciones atmosférica y elevaciones solares (Thornley y France, 2008).

Richardson y Wright (1981 y 1984), estiman la radiación diaria a partir de generar datos diarios de precipitación utilizando un modelo exponencial de las cadenas de Markov. Parten de considerar a la precipitación como variable primaria y a la radiación como un proceso estocástico multivariado continuo, cuyos valores promedios diarios y las desviaciones están condicionadas al estado húmedo o seco del día.

Best en 1962, citado por Chang (1977), clasifica los efectos de la radiación sobre las plantas en procesos foto energéticos

(fotosíntesis), y procesos fotosensibles que pueden ser de movimientos (tropismo) o formativos (expansión foliar, elongación del tallo). Ross (1975), menciona que más del 70 % de la radiación que absorben las plantas se convierte en calor y es utilizada como energía en la transpiración y en el intercambio convectivo de calor.

## **Temperatura**

La temperatura de un cuerpo es la magnitud de la agitación de sus moléculas; es una medida de su intensidad de calor.

Muchos procesos biológicos como la fotosíntesis, respiración, traslocación, crecimiento celular y desarrollo se ven afectados por la temperatura, mostrando efectos diferentes entre especies y variedades. Es por esto que los modelos biofísicos de simulación consideran a la temperatura como una variable primaria que influye en el desarrollo y producción de los cultivos, asumiendo que las tasas de desarrollo son directamente proporcionales a un rango de temperatura dado.

## **La temperatura como parámetro de control en los modelos fenológicos**

La primera publicación del uso de la temperatura del aire como indicador del crecimiento de las especies vegetales aparece en 1735 escrita por Réaumur, quien asume que la cantidad de calor

requerida por una planta para alcanzar su estado madurez, es una constante térmica expresada por la suma de la temperatura media diaria (Neil y Seeley, 1977).

A la cantidad de calor que requiere una especie se le denomina unidades calor (UC) ó unidades térmicas, traducción al español del término Growth Degree Days (GDD)

En el concepto de unidades calor se asume una relación lineal entre la tasa de desarrollo y la temperatura promedio del aire, la cual se considera dentro de un límite térmico máximo y un mínimo definido para la especie (Cross y Zuber, 1972; Summerfield *et al.* 1988).

Algunos ejemplos sobre el uso de las unidades calor en la predicción del crecimiento y desarrollo del maíz y forrajes en general, y como parámetro de control en modelos de simulación se encuentran en Arkin *et al.* (1976), Daughtry *et al.* (1984), Diaz *et al.* (2006).

### **Acumulación de materia seca**

La estructura superior del dosel determina la penetración de la luz siguiendo la ley de Bouguer-Lambert, en donde se establece que la intensidad luminosa decrece exponencialmente a medida que el índice de área foliar se incrementa (Monteith, 1976; Thornley y France, 2008).

Es así que las hojas participan como filtros que muestran una marcada absorción de la radiación solar hasta las 0.7  $\mu$ , por lo tanto las características ópticas del dosel dependen del área foliar, la orientación de las hojas, el ángulo de inclinación del sol y de la reflectancia del suelo (Spitters *et al.* 1986; Jonhson, 2007).

Arkin *et al.* (1978), desarrollaron un modelo para el cálculo de la radiación interceptada basado en el área foliar del dosel y la distancia entre plantas. El área foliar expuesta depende de la altura del sol, el azimut y la arquitectura de la planta. Para calcular la intensidad luminosa en la base del dosel utilizan la ley de Beer o Bouger-Lambert:

$$I = I_0 e^{-K(IAF)}$$

Dónde:

*I* = Intensidad luminosa en la base del dosel

*I*<sub>0</sub> = Intensidad luminosa inmediatamente arriba del dosel

*K* = Coeficiente de extinción que determina la cantidad de luz atenuada por las plantas

*IAF* = Índice de área foliar

*e* = Base de los logaritmos naturales

Posteriormente, Stapper y Arkin (1980), Thornley y France (2008), estiman la radiación fotosintéticamente activa interceptada para cultivos como maíz y forrajes mediante la ecuación:

$$RFAI = 0.5 \cdot Rg(1 - e^{-K(IAF)})$$

Dónde:

*Rg = Radiación global*

Las especies cultivadas presentan diferentes valores del coeficiente de extinción (K); para maíz y forrajes K se encuentra comúnmente entre 0.35 a 0.98. El valor de K declina con el tiempo cuando el IAF es mayor que uno; a medida que los valores de K disminuyen la producción de materia seca es mayor.

Loomis y Williams (1962), mencionan que la producción máxima depende principalmente de la intercepción de la luz y de la asimilación de CO<sub>2</sub> por el cultivo, ya que del 90 al 95 % de la materia seca total está formada por compuestos de carbono derivados de la fotosíntesis.

### **Altura, número de hojas, peso seco en tallo y peso seco total**

Rojas (2008) y Rodríguez (2008) estiman la altura, número de hojas, relación hoja tallo, peso seco en hoja y peso seco en tallo mediante una relación causal para todas las variables entre los GDD acumulados.

### **Descripción y uso de DSSAT**

El programa DSSAT (Decision Support System for Agrotechnology Transfer) es el mayor producto del proyecto IBSNAT (International Benchmark Site Network for Agrotechnology Transfer)

iniciado en 1982 y finalizado en 1993. Este programa ha sido desarrollado y expandido, desde entonces se ha mantenido y actualizado bajo la protección del ICASA ([www.icasa.net](http://www.icasa.net)). DSSAT fue diseñado para ponerlo a disposición de los usuarios y aplicar el análisis de sistemas y simulación para la evaluación de resultados y riesgos y decidir alternativas de manejo en los cultivos.

El componente central del programa DSSAT son los modelos de simulación y programas para facilitar su aplicación en diferentes regiones del mundo, las principales características que permiten usarlo son: (1) entradas, organización, almacenes de datos de cultivos, suelo y agua; (2) recuperación, análisis y despliegue de datos; calibración del modelo de crecimiento del cultivo; (4) simular diferentes prácticas de manejo del cultivo; y (5) evaluar los riesgos económicos asociados con las diferentes opciones (Jones *et al.*, 2001). Una descripción y uso más detallado de DSSAT se encuentra en Rojas (2008) y Rodríguez (2008).

### **Descripción de Stella**

Stella es un programa que sirve como herramienta para modelar sistemas dinámicos, con pocas matemáticas sofisticadas y poco conocimiento de programación. Para crear un modelo de simulación en Stella se usan símbolos, los cuales representan almacenes, flujos y variables que influyen dentro de un sistema, los símbolos se conectan y se emplean ecuaciones matemáticas para relacionar los componentes del modelo (Grant *et al.*, 1997). Este permite crear

modelos versátiles en cuanto a su posible modificación y adaptación a sistemas y condiciones específicas.

### **III. MATERIALES Y MÉTODOS**

#### **Cultivo de maíz**

#### **Descripción del experimento**

El maíz se sembró el 21 de Mayo de 2008 en el campo agrícola de una unidad de producción en la comunidad El Prado municipio de Galeana, N.L. Se encuentra ubicado en las coordenadas 25° 05' de latitud norte, 100° 42' longitud oeste, a una altura de 1890 msnm. Se sembró la variedad JAGUAN en parcelas de 90 m<sup>2</sup> con 3 niveles de fertilización nitrogenada (0, 60 y 120 unidades de N/ha) y 3 densidades de población (DP), DP1=30,000, DP2=50,000 y DP3=70,000 plantas/ha. Los niveles de fertilización y las densidades de población se utilizaron para parametrizar DSSAT, calibrarlo y además, construir un modelo en STELLA.

#### **Variables de respuesta**

Emergencia. Este muestreo se realizó la segunda semana después de la siembra, este consistió en contar el número de plantas emergidas en tres surcos de 30 m seleccionados al azar dentro de cada unidad experimental.

Materia seca parcial aérea (MSA). Este muestreo se realizó cada 14 días, consistió en cortar tres plantas elegidas al azar dentro de cada unidad experimental, se metieron en bolsas de papel, se secaron en una estufa a 65 °C por 72 h y se pesaron en una balanza analítica, de los tres pesos se obtuvo la media del peso por planta y para expresarlo en kg/ha se multiplicó por la población de plantas por hectárea.

Fenología. Esta observación fue cada 14 días donde se midió altura y se contó el número de hojas en cinco plantas seleccionadas al azar dentro de cada unidad experimental.

Materia seca parcial en hoja (MSH) y Materia seca parcial en tallo (MST). Se utilizaron las mismas plantas que se cortaron para estimar materia seca separando manualmente los componentes y enseguida se secaron en estufa a 65 °C durante 72 h y se pesaron.

Índice de área foliar (IAF). De las tres plantas que se utilizaron para materia seca, el componente hoja se utilizó para determinar el área foliar, este se estimó con un medidor de área foliar LICOR mod. LI-3100A. Para estimar el índice de área foliar (IAF) se utilizaron los datos de muestreo de población de plantas en una hectárea, se estimó el área que ocupaban las tres plantas cortadas y finalmente se dividió el área foliar entre la superficie que ocupaban las plantas.

Calidad nutritiva de la planta. Para determinar la calidad nutritiva de la planta se cortaron tres plantas en cada unidad experimental,

se metieron en bolsa de papel, se secaron en una estufa a 65 °C por 72 h y se enviaron al laboratorio AGRO-LAB MÉXICO, S. A. DE C. V, para realizar el análisis bromatológico mediante un método químico; esto se realizó en tres fechas durante el desarrollo del cultivo (06/27/2008, 09/05/2008 y 10/31/2008), en estas muestras se determinó lo siguiente: PC, FDA y FDN.

### **Datos climáticos**

Los datos climáticos utilizados en este trabajo se obtuvieron de una estación climática automática (Davis Vantage Pro 2) que se instaló al inicio del experimento, y de la estación climática del Cuije perteneciente a la fundación produce Nuevo León.

Los datos que se utilizaron fueron:

Temperatura mínima, máxima y radiación solar. Página web <http://funprol.org.mx/clima/estaciones/histoticos.php> (accesada el 14 de agosto de 2009).

Se calcularon grados días de desarrollo (GDD) según las formulas propuestas por Raiput (1980) y Bradley (1994).

Grados día de desarrollo ó

$$GDD = \sum_{i=1}^n (T_i - T_{base})$$
$$T_i = \frac{T_{max} - T_{min}}{2}$$

Donde:

$T_i$  = Temperatura media en el día

$T_{max}$  = Temperatura máxima en el día

$T_{min}$  = Temperatura mínima en el día

$T_{base}$  = Temperatura base (8 °C)

### Radiación acumulada (RA)

Los datos de radiación solar en la estación climática se registraron cada media hora en  $\text{watts/m}^2$  pero para la construcción de los modelos se requerían en unidades de  $\text{MJ/m}^2/\text{día}$  para hacer esta conversión se siguió la propuesta de Rojas (2008) y Rodríguez (2008) como sigue:

Por definición, un Watts es igual a un  $\text{J seg}^{-1}$  y un MJ es igual a un millón de Joules. Como los registros se hicieron cada 30 minutos se tuvieron 48 valores de radiación en  $\text{W m}^{-2}$  durante el día. Entonces se obtuvo el promedio en  $\text{W m}^{-2} \text{seg}^{-1}$ . El valor acumulado en el día fue el promedio multiplicado por 86,400 segundos que tiene un día y se obtiene el resultado de  $\text{J m}^{-2} \text{día}^{-1}$  que dividido entre 1,000,000 es igual a  $\text{MJ m}^{-2} \text{día}^{-1}$ .

### Radiación fotosintéticamente activa (RFA)

La radiación fotosintéticamente activa fue estimada por la ecuación propuesta por Stapper y Arkin (1980), la cual es como sigue:

$$RFA = 0.5 \cdot Rg(1 - e^{-K(IAF)})$$

Dónde:

$Rg$  = Radiación global

$K$  = Coeficiente de extinción que determina la cantidad de

*luz atenuada por las plantas*

*IAF = Índice de área foliar*

*e = Base de los logaritmos naturales*

Los parámetros descritos de la ecuación RFA fueron tomados del Modelo Parch formulado por Bradley *et al.* (1994).

## **Información básica para el funcionamiento del programa DSSAT**

### Archivos de entrada (Input)

Clima. Se integró la información climática en el submódulo clima, la información cargada fue de tres años (2007, 2008 y 2009), en este archivo se capturó información de la localización de la estación como localidad, estado, país, latitud, longitud, elevación y los datos de clima los cuales fueron: temperatura mínima y máxima diarias expresadas en grados centígrados, radiación solar diaria en  $\text{MJm}^{-2}\text{d}^{-1}$  y precipitación diaria en mm.

Genotipo. En este archivo (GECER040) se dio de alta a la variedad de maíz que se usó en la investigación (JAGUAN). En GECER040 se buscaron a los coeficientes genéticos que más se ajustaron a los datos observados en campo (Calibración).

A continuación se presentan algunos parámetros en conjunto con su descripción que se encuentran en los archivos mencionados

- VAR#: Código de identificación o número de cada variedad
- VAR-NAME: Nombre de la variedad
- ECO#: Código del ecotipo al que pertenece el cultivar
- P1: Tiempo térmico (expresado en grados día sobre una temperatura base de 8 °C) para el sub-período que va desde la emergencia de la plántula hasta el final de la fase juvenil, durante el cual la planta no responde a cambios en el fotoperiodo.
- P2: Retraso del desarrollo del cultivo (expresado en días) por cada hora de incremento en el fotoperiodo por encima de un valor umbral de 12.5 horas.
- P5: Tiempo térmico (expresado en grados/día sobre una temperatura base de 8 °C), desde la antesis hasta madurez fisiológica.
- G2: Máximo número posible de granos por planta.
- G3: Tasa de llenado de granos durante la fase lineal, bajo condiciones óptimas (mg/d).
- PHINT: Intervalo del filocrono; tiempo térmico (expresado como suma de GDD), entre apariciones sucesivas de ápices foliares.

Suelo. Se capturaron datos como país, nombre del sitio, código del instituto, latitud, longitud, clasificación etc.

De acuerdo con la descripción por capas del perfil del suelo se introdujeron los siguientes datos: profundidad de la capa en cm, nombre del horizonte, % de arcilla, % de limo, % de arena, % de

carbono orgánico, % de nitrógeno total, capacidad de intercambio catiónico en cmol/kg, contenido de  $\text{CaCO}_3$  expresados en g/kg.

Experimento. En este apartado se integraron los datos observados del ciclo de cultivo del material genético utilizado (JAGUAN). Se crearon dos archivos: el archivo "A" y el archivo "T" (datos experimentales cada 15 días). En el archivo "A" se registró información de rendimiento a la madurez y datos máximos observados en el experimento y días julianos correspondientes a fechas sobresalientes al ciclo del cultivo. En el archivo T se capturaron los datos de muestreos de las variables observadas durante el ciclo del cultivo, la información necesaria en este apartado son: Fecha (día juliano), índice de área foliar, peso seco del tallo (kg/ha), peso seco de la hoja (kg/ha) y peso seco de la biomasa aérea (kg/ha). Una descripción más detallada del funcionamiento de DSSAT (manual) para el cultivo de maíz se encuentra en Rojas (2008).

### **Descripción del modelo MAIZ-UAN.**

Se construyó un modelo dinámico de simulación para maíz denominado MAIZ-UAN, para la construcción se utilizó el software STELLA ver 9.0.2 con cálculos diarios.

El modelo, mediante una serie de ecuaciones lineales considera el efecto del tiempo térmico o GDD (grados días-desarrollo) y el efecto de la radiación solar. El modelo de simulación está constituido por tres Submódulos que son: Submódulo clima (SC), Submódulo de crecimiento y desarrollo (SCD) y Submódulo de manejo (SM) los cuales son mostrados en la Figura 3.1.

### Submódulo clima (SC)

La base del SC son un generador de temperaturas medias diarias (TMD) denominado Temperatura y un generador de radiación media diaria (RMD) denominado Radiación, estos generadores se desarrollaron con una distribución Normal bajo los supuestos de la teoría de límite central con las temperaturas y radiaciones medias y desviaciones estándar obtenidas de datos de temperatura y radiación durante 13 años del lugar de estudio (Cuadro 3.1 y Figura 3.1) y la variable RFA se estimó con la metodología de Bradley y Crut (1994). Esta metodología establece que RFA es el resultado del producto de  $RMD \cdot 0.5$ .

Cuadro 3.1. Variables meteorológicas (Radiación y Temperatura) promedio mensual de los años 2007-2009 y promedios de largo plazo (13 años) registrada en la comunidad el Prado, Navidad y El Cuije, Galeana, Nuevo León, México.

Mes	Radiación media mensual		Temperatura media mensual		Temperatura media mensual	
	2007-2009		2007-2009		13 años	
	Media	± DE	Media	± DE	Media	± DE
Enero	14.242	4.635	9.948	2.897	8.457	3.208
Febrero	18.313	4.603	11.250	3.364	9.660	3.966
Marzo	22.133	4.177	14.025	3.355	13.559	3.527
Abril	24.002	4.480	16.499	2.253	15.433	3.085
Mayo	23.106	5.345	17.907	1.890	18.054	2.363
Junio	23.093	5.327	18.963	2.288	19.075	2.210
Julio	22.060	5.726	18.870	2.382	18.448	2.387
Agosto	20.214	4.698	18.894	1.295	18.303	2.035
Septiembre	18.978	4.426	17.701	2.198	17.434	2.595
Octubre	18.667	2.855	15.045	2.955	14.840	3.113
Noviembre	14.653	3.598	11.819	1.949	11.427	3.223
Diciembre	14.123	4.582	10.680	2.817	9.572	3.390

Para calcular los grados días desarrollo (GDD) se utilizó el método residual, el cual establece que a la temperatura media diaria (TMD Figura 3.1 a), se le resta la temperatura base (TB, 8 °C) del cultivo (Temperatura por debajo de la cual, se suspende el crecimiento). Con la variable GDD se estimó GDD\_AC (GDD ACUMULADOS) mediante la ecuación siguiente,

$$\text{GDD\_AC}(t+1) = \text{GDD\_AC}(t) + (\text{GDD}) * \Delta t, \quad (1)$$

Donde GDD representa los GDD de cada día, y como se mencionó en el párrafo anterior  $\text{GDD} = \text{TMD} - \text{TB}$  cuando  $\text{TMD} > \text{TB}$ ; y cuando  $\text{TMD} < \text{TB}$ , entonces  $\text{GDD} = 0$ .

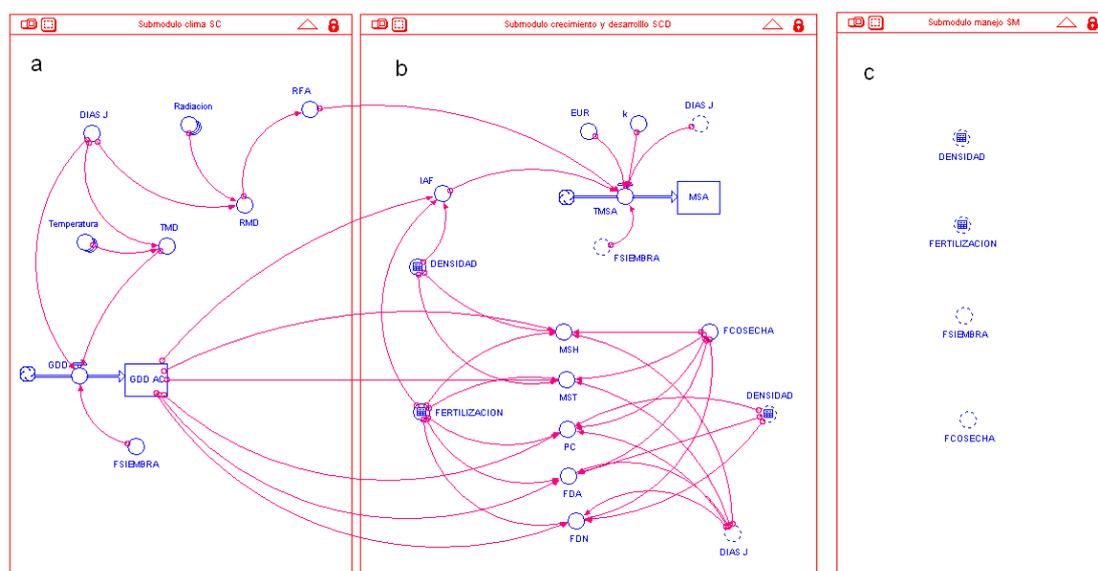


Figura 3.1. Submódulo clima (a), Submódulo crecimiento y desarrollo (b) y Submódulo manejo (c) del MAIZ-UAN variedad JAGUAN.

### Submódulo crecimiento y desarrollo (SCD)

En este submódulo se integraron variables tales como; Materia seca parcial aérea (MSA, kg/ha), Materia seca parcial en hoja (MSH; kg/ha), Materia seca parcial en tallo (MST, kg/ha), Índice de área

foliar (IAF), Proteína cruda (PC), Fibra en detergente ácido (FDA) y Fibra en detergente neutral (FDN).

#### Materia seca parcial aérea (MSA)

La dinámica de la materia seca parcial aérea (kg MSA/ha) se representó como:

$$MSA(t+1)=MSA(t)+(TMSA)*\Delta t \quad (2)$$

Donde TMSA es la tasa de acumulación de materia seca aerea en g/m<sup>2</sup>/d. Multiplicando la ecuación (2) por 10 obtenemos kg MSA/ha (Figura 3.1 b), MSA.

La variable TMSA fue estimada de acuerdo con la ley de Beer-Lambert, esta ley describe la atenuación del perfil del dosel en función del área foliar acumulada y la orientación de las hojas (Bradley y Crut, 1994). Con este principio y los coeficientes que utiliza el programa DSSAT tal como coeficiente de extinción= 0.85 y EUR (Eficiencia en el uso de la radiación solar=2), encontramos la tasa de crecimiento del cultivo que se calculo como sigue,

$$TMSA=RFA*EUR*(1-\exp(-k*IAF)) \quad (3)$$

Donde RFA es la radiación fotosintéticamente activa (MJ m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>) fue estimada de los datos climáticos registrados en el sitio experimental; EUR es la eficiencia en el uso de la radiación solar g(MSA)MJ<sup>-1</sup>; k es el coeficiente de extinción; e IAF es el índice de área foliar (IAF) calculado con las ecuaciones (22-30).

#### Materia seca parcial en hoja (MSH)

Calculamos la variable MSH (MSH; kg/ha) al relacionarla con la variable independiente GDD\_AC (ecuación 1) (datos

experimentales). Esto se realizó para las 9 combinaciones de tres densidades de población (DP1, DP2 y DP3) y tres niveles de fertilización (0, 60 y 120 unidades de N/ha). Los modelos de mejor ajuste fueron; un modelo de distribución normal (ecuaciones 4-6) y el modelo Hoerl (ecuaciones 7-12).

#### Densidad DP1

$$MSH_0=2402.57*EXP(-((1268.68-GDD\_AC)^2)/(2*344.82^2)); R^2=0.99, \quad (4)$$

$$MSH_{60}=2608.91*EXP(-((1283.97-GDD\_AC)^2)/(2*342.68^2)); R^2=0.99, \quad (5)$$

$$MSH_{120}=2631.88*EXP(-((1286.95-GDD\_AC)^2)/(2*342.99^2)); R^2=0.97, \quad (6)$$

#### Densidad DP2

$$MSH_0=2.91E-18*(0.99^{GDD\_AC})*(GDD\_AC^{7.89}); \quad R^2=0.98, \quad (7)$$

$$MSH_{60}=2.42E-18*(0.99^{GDD\_AC})*(GDD\_AC^{7.99}); \quad R^2=0.98, \quad (8)$$

$$MSH_{120}=6.89E-18*(0.99^{GDD\_AC})*(GDD\_AC^{7.75}); \quad R^2=0.98, \quad (9)$$

#### Densidad DP3

$$MSH_0=1.26E-17*(0.99^{GDD\_AC})*(GDD\_AC^{7.70}); \quad R^2=0.99, \quad (10)$$

$$MSH_{60}=3.09E-18*(0.99^{GDD\_AC})*(GDD\_AC^{7.91}); \quad R^2=0.97, \quad (11)$$

$$MSH_{120}=8.09E-18*(0.99^{GDD\_AC})*(GDD\_AC^{7.74}); \quad R^2=0.97, \quad (12)$$

#### Materia seca parcial en tallo (MST)

Estimamos la variable MST (MST; kg/ha) al relacionar la variable independiente GDD\_AC (ecuación 1) con la variable dependiente MST (datos experimentales). Esto se realizó para las 9 combinaciones de tres densidades de población (DP1, DP2 y DP3) y

tres niveles de fertilización (0, 60 y 120 unidades de N/ha). Los modelos de mayor ajuste fueron; modelo Richards (ecuaciones 13, 14, 15 y 19), distribución normal (ecuaciones 16, 17 y 18) y el modelo presión-vapor (ecuaciones 20 y 21). Las ecuaciones utilizadas fueron las que mostraron el mejor ajuste al relacionar las dos variables.

#### Densidad DP1

$$MST_0=3005.09/(1+EXP(2.85-0.006*GDD\_AC))^{(1/0.03)}; \quad R^2=0.99, \quad (13)$$

$$MST_{60}=3609.69/(1+EXP(5.26-0.007*GDD\_AC))^{(1/0.14)}; \quad R^2=0.99, \quad (14)$$

$$MST_{120}=4585.52/(1+EXP(3.33-0.005*GDD\_AC))^{(1/0.11)}; \quad R^2=0.99, \quad (15)$$

#### Densidad DP2

$$MST_0=3554.32*EXP(-((1480.25-GDD\_AC)^2)/(2*351.97^2)); \quad R^2=0.98, \quad (16)$$

$$MST_{60}=3955.39*EXP(-((1476.18-GDD\_AC)^2)/(2*353.20^2)); \quad R^2=0.98, \quad (17)$$

$$MST_{120}=4916.75*EXP(-((1518.21-GDD\_AC)^2)/(2*344.83^2)); \quad R^2=0.98, \quad (18)$$

#### Densidad DP3

$$MST_0=3186.41/(1+EXP(12.55-0.01*GDD\_AC))^{(1/1.29)}; \quad R^2=0.98, \quad (19)$$

$$MST_{60}=EXP(115+(-183.2/GDD\_AC)+(-13*\text{LogN}(GDD\_AC))); \quad R^2=0.98, \quad (20)$$

$$MST_{120}=EXP(61+(-11043/GDD\_AC)+(-6*\text{LogN}(GDD\_AC))); \quad R^2=0.98, \quad (21)$$

#### Índice de área foliar (IAF)

Calculamos la variable IAF al relacionar la variable independiente (ecuación 1) con la variable dependiente IAF (datos experimentales). Esto se realizó para las 9 combinaciones de tres densidades de población (DP1, DP2 y DP3) y tres niveles de

fertilización (0, 60 y 120 unidades de N/ha). Los modelos de mayor ajuste fueron; un modelo de distribución normal (ecuaciones 22-24) y el modelo Hoerl (ecuaciones 25-30). Las ecuaciones utilizadas fueron las que mostraron el mejor ajuste al relacionar las dos variables.

#### Densidad DP1

$$IAF_0=2.37*EXP(-((1201.37-GDD\_AC)^2)/(2*366.66^2)); \quad R^2=0.98, \quad (22)$$

$$IAF_{60}=2.85*EXP(-((1294.34-GDD\_AC)^2)/(2*399.14^2)); \quad R^2=0.99, \quad (23)$$

$$IAF_{120}=3.26*EXP(-((1327.23-GDD\_AC)^2)/(2*388.35^2)); \quad R^2=0.99, \quad (24)$$

#### Densidad DP2

$$IAF_0=1.02E-21*(0.99^{GDD\_AC})*(GDD\_AC^{8.22}); \quad R^2=0.97, \quad (25)$$

$$IAF_{60}=2.33E-17*(0.99^{GDD\_AC})*(GDD\_AC^{6.41}); \quad R^2=0.98, \quad (26)$$

$$IAF_{120}=9.32E-18*(0.99^{GDD\_AC})*(GDD\_AC^{6.55}); \quad R^2=0.99, \quad (27)$$

#### Densidad DP3

$$IAF_0=1.65E-21*(0.99204^{GDD\_AC})*(GDD\_AC^{8.23}); \quad R^2=0.97, \quad (28)$$

$$IAF_{60}=3.49E-20*(0.99344^{GDD\_AC})*(GDD\_AC^{7.62}); \quad R^2=0.99, \quad (29)$$

$$IAF_{120}=2.65E-18*(0.99^{GDD\_AC})*(GDD\_AC^{6.82}); \quad R^2=0.99, \quad (30)$$

#### Proteína cruda (PC)

La variable PC (Figura 1) fue estimada al relacionar la variable independiente GDD\_AC (ecuación 1) con la variable dependiente PC (datos experimentales). Esta se realizó para la densidad de

población DP3 (densidad de población óptima) y tres niveles de fertilización (0, 60 y 120 unidades de N/ha). Los modelos de mayor ajuste fueron; un modelo de ajuste logarítmico (ecuación 31), un modelo de ajuste con cambio de potencia (ecuación 32) y el modelo Harris (ecuación 33). Las ecuaciones utilizadas de mejor ajustes fueron:

$$PC_0=99.41+(-11.79)*\text{LOGN}(\text{GDD\_AC}); \quad R^2=0.98, \quad (31)$$

$$PC_{60}=71118.48*((\text{GDD\_AC}+621.56))^{-1.14}; \quad R^2=0.97 \quad (32)$$

$$PC_{120}=1/(0.018+(0.000079*\text{GDD\_AC}^{0.95})); \quad R^2=0.98, \quad (33)$$

#### Fibra en detergente ácido (FDA)

La variable FDA se estimó utilizando el mismo procedimiento de la variable PC. Los modelos de mayor ajuste fueron; un modelo de ajuste logarítmico (ecuación 34), y un modelo de ajuste con logaritmos inversos (ecuación 35 y 36)

$$\text{FDA}_0=12.19+(3.52*\text{LOGN}(\text{GDD\_AC})); \quad R^2=0.98, \quad (34)$$

$$\text{FDA}_{60}=1/(0.085+(-0.008*\text{LOGN}(\text{GDD\_AC}))); \quad R^2=0.99, \quad (35)$$

$$\text{FDA}_{120}=1/(0.073+(-0.0064*\text{LOGN}(\text{GDD\_AC}))); \quad R^2=0.99, \quad (36)$$

#### Fibra en detergente neutral (FDN)

Se estimó a la variable FDN utilizando el mismo procedimiento de la variable FDA, los modelos de mayor ajuste fueron:

##### Modelo de ajuste logarítmico

$$\text{FDN}_0=-61.77+(16.78*\text{LOGN}(\text{GDD\_AC})); \quad R^2=0.99, \quad (37)$$

Modelo de ajuste con cambio de potencia

$$\text{FDN}_{60}=1.83*(\text{GDD\_AC}-(-243.39))^{0.459}; \quad R^2=0.99, \quad (38)$$

Modelo ajuste con logaritmos inversos

$$\text{FDN}_{120}= 1/(0.082+(-0.009*\text{LOGN}(\text{GDD\_AC}))); \quad R^2=0.97, \quad (39)$$

## **Cultivos de cereales de invierno**

### **Descripción del experimento**

En la comunidad El Prado municipio de Galeana, N.L. se estableció un experimento de cereales de invierno y los materiales (variedades) fueron: T1=Triticale (AN-31-B), T2=Trigo (AN-239), T3=Cebada (Narro-95-02) y T4=Avena (Cuauhtémoc), la siembra se realizó el 15 de Noviembre de 2008 en una superficie de 2500 m<sup>2</sup> para cada uno de los materiales, y una densidad de siembra de 40 kg/ha para cada material. Los muestreos se realizaron cada 14 días durante el ciclo del cultivo (15 de Noviembre de 2008-17 de Abril de 2009).

### **Variables de respuesta**

Emergencia. En cada material (variedades) se contó el número de plantas emergidas en un metro cuadrado (15 parcelas). Esto se realizó en la segunda semana después de la siembra.

Materia seca parcial aérea (MSA). Se cortaron las plantas encontradas en un metro cuadrado, después se colocaron en bolsas de papel, se secaron en una estufa a 65 °C por 72 h y se pesaron

en una balanza analítica, posteriormente se separó manualmente tallos, y espigas para pesar cada una de las muestras, esto se hizo desde la primera semana hasta la madurez de cada uno de los cultivares, este proceso se realizó cada 14 días. Para estimar el rendimiento por hectárea se usó el peso de dichas plantas, extrapolado en base a los muestreos de densidad de población realizados al principio y al final del cultivo.

Fenología. En este muestreo se registró cada catorce días; altura, número de hijuelos así como números de hojas verdes y secas en cinco plantas cada catorce días. Estas plantas fueron seleccionadas al azar dentro de cada unidad experimental.

Materia seca parcial en hoja (MSH) y Materia seca parcial en tallo (MST). Se utilizaron las mismas plantas que se cortaron para estimar materia seca separando manualmente los componentes y enseguida se secaron en estufa a 65 °C durante 72 h y se pesaron.

Índice de área foliar (IAF). De las plantas muestreadas en el metro cuadrado, el componente hoja se utilizó para determinar área foliar, este se cuantificó con un medidor de área foliar LICOR mod. LI-3100A. Para estimar el índice de área foliar (IAF) se utilizaron los datos de muestreo de población de plantas en una hectárea, finalmente se dividió el área foliar entre la superficie.

Para estimar la calidad nutritiva del forraje se cosechó un metro cuadrado de plantas en cada unidad experimental, se metieron en

bolsas, se secaron a 65 °C durante 72 h y se pesaron. Este muestreo se realizó en seis fechas (12/26/2008, 01/09/2009, 02/20/2009, 03/03/2009, 03/20/2009 y 04/14/2009) del ciclo de los materiales, posteriormente se llevaron al análisis bromatológico por método químico, para esto las muestras pertenecientes de cada material (variedad) se mezclaron (para cada fecha) para formar una sola muestra y se enviaron a los laboratorios de AGRO-LAB MÉXICO, S. A. DE C. V. Cabe señalar que en estos cultivares no se consideró el peso seco del grano.

La información de estos cultivos; Cebada, Triticale y Trigo, se utilizara para calibrar DSSAT y Cebada, Triticale, Trigo y Avena para construir un modelo en STELLA.

### **Datos climáticos**

La información climática se obtuvo de la misma estación meteorológica utilizada para el maíz. Se utilizó el mismo procedimiento descrito para el cultivo de maíz en; RA y RFA. Para estimar los GDD se utilizó una temperatura base de 0. Los coeficientes de extinción (k), y la eficiencia en el uso de la radiación (EUR) fueron tomadas de Jones *et al.*, (1998). Estos coeficientes son usados en el modelo construido con STELLA.

## **Información básica para el funcionamiento del programa DSSAT**

Para registrar la información de entrada al programa DSSAT de cultivos de invierno se utilizó el mismo procedimiento del cultivo de maíz, no obstante con algunos cambios en los siguientes archivos:

Experimento. Se capturaron los datos observados durante el ciclo de cultivo de cada uno de los cultivos-variedades utilizados, Cebada (Narro-92-05), Triticale (AN-31-B) y Trigo (AN-239). Se usaron los archivos A y T para capturar datos de rendimiento máximo, fecha de antesis, número de espigas por m<sup>2</sup> y datos experimentales obtenidos en campo en tiempos de cada 15 días.

Genotipo. En el archivo .CUL se incorporaron las variedades de cada uno de los cultivos utilizados en la investigación. Se utilizaron como coeficientes genéticos iniciales, los valores de las variedades más semejantes a los materiales registrados en el programa, una descripción detallada sobre carga de datos y calibración en DSSAT se encuentra en Rodríguez (2008).

A continuación se presenta la descripción de algunos parámetros que se encuentran integrados en el archivo CUL:

Coeficiente genético	Descripción
PIV	Días con temperatura óptimas para vernalización.
PID	Porcentaje de reducción en la tasa de desarrollo con un fotoperíodo de 10 horas

	menor a la del umbral.
P5	Tiempo térmico de la fase llenado del grano (expresado en °C días por arriba de la temperatura base)
G1	Número de semillas por unidad de peso del dosel en en antesis (#/g).
G2	Tamaño normal de la semilla en condiciones óptimas mg
G3	Peso seco normal de un solo vástago no estresado en la madurez (g).
PHINT	Tiempo térmico entre la aparición sucesiva de hojas (°C).

### **Descripción del modelo CER-UAN**

Para la construcción del modelo dinámico de simulación de cereales de invierno (CER-UAN) se siguió el mismo procedimiento utilizado en la sección **Descripción del modelo MAIZ-UAN**. La descripción y formulación matemática de CER-UAN se ubica en el apéndice A, los submódulos se describen a continuación:

#### Submódulo clima

La base del submódulo climático es un generador de temperatura media diaria (TD), este generador utiliza una distribución normal con las temperaturas medias y desviaciones estándar mensuales obtenidas de datos de temperatura de 13 años del lugar de estudio (Cuadro 3.1).

Para calcular los grados días desarrollo (GDD) se usaron las temperaturas medias diarias generadas por la variable TD menos la temperatura base del cultivo que fue 0 °C. La variable de estado de GDD acumulados (GDD\_AC) tiene una entrada que son los ingresos diarios de GDD.

#### Submódulo crecimiento y desarrollo

En este submódulo se utilizó la variable de estado GDD acumulados (GDD\_AC) para simular las variables: materia seca parcial aérea (MSA), materia seca parcial en hoja (MSH), materia seca parcial en tallo (MST), índice de área foliar (IAF) y valor nutritivo (PC, FDA y FDN) Apéndice A, Figura A1 b.

#### Submódulo manejo

Este submódulo está compuesto por tres variables auxiliares que son variedades, fecha de siembra y fecha de cosecha; estas variables se pueden cambiar dentro de un rango razonable para el cultivo, según el interés de simulación. Es decir, el modelo tiene la capacidad de simular diferentes fechas de siembra, así como programar fechas de cosecha, para cuatro materiales (variedades) de cereales, donde se utiliza un código (1 a 4) para cada variedad: el 1 para la cebada (Narro 92-05), el 2 para el triticale (AN-31-B), 3 para el trigo (AN-239), y 4 para avena (Cuauhtémoc).

## Cultivo de Alfalfa

### Descripción del experimento

El cultivo de alfalfa se sembró (07/03/2007) en el campo experimental "Navidad". Se encuentra ubicado en las coordenadas 25° 02' de latitud norte, 100° 37' longitud oeste, a una altura de 1895 msnm en el municipio de Galeana, N.L. Se sembró la variedad cuf-101 en 15 parcelas de 100 m<sup>2</sup>. Los muestreos se realizaron del 4 de julio de 2008 al 13 de junio de 2009, se utilizó un programa de cinco cortes semanales de acuerdo con la metodología utilizada por Gutiérrez (1991), Gómez (2005) y Rojas (2008). Se inició con el corte 1, consecutivamente cada semana se cortó según correspondió a los cortes 2, 3, 4 y 5, iniciando otro ciclo en este orden, los cortes se repitieron hasta el 13 de junio de 2009, por ello todas las parcelas se cortaron con 35 días de rebrote.

La secuencia de cortes por fecha de muestreo se presenta en el Cuadro 3.2.

**Cuadro 3.2. Secuencias de corte en el cultivo alfalfa variedad CUF-101 en Navidad, Galeana Nuevo León, México.**

Muestreo	Fecha	Programa de cortes
1	04/07/2008	1
2	11/07/2008	2
3	18/07/2008	3
4	25/07/2008	4
5	01/08/2008	5
6	08/08/2008	1
7	15/08/2008	2
8	22/08/2008	3
9	29/08/2008	4
10	06/09/2008	5
.	.	.
.	.	.
68	13/06/2009	5

## **Variables de respuesta**

Materia seca parcial aérea (MSA). El muestreo se realizó cada 7 días, durante este periodo se tomaron dos muestras de un área de 0.25 x 0.20 m (0.05 m<sup>2</sup>), se cortaron las plantas a una altura de 4 cm, se metieron en bolsa de papel y se secaron en una estufa a 65 °C por 72 h y se pesaron. Los resultados se expresaron en kg/ha.

Número de hojas (NHJ) y Altura (ALT). El muestreo fue semanal y se midió la altura, se contó el número de hojas en 5 plantas seleccionadas al azar dentro de cada unidad experimental.

Índice de área foliar (IAF). Se utilizó la ecuación de regresión obtenida por Rojas (2008), a esta ecuación se le asignaron los pesos secos del componente hoja como variable independiente. Para estimar IAF se realizó el muestreo de población de plantas en un área de 25 x 30 cm y así determinar el área que utilizaban las cinco plantas y finalmente se dividió el área foliar entre la superficie cosechada.

Componentes del rendimiento. Se utilizaron cinco plantas por parcela con altura de corte de 4 cm y se recolectó el material vegetativo, enseguida se separaron manualmente los componentes del rendimiento: hoja y tallo después se secaron en estufa a 65 °C durante 72 h y se pesaron. Los resultados de este cultivo se utilizarán para construir un modelo estocástico y dinámico en STELLA.

## **Descripción del modelo ALFAMOD**

La formulación, estructura y descripción de ALFAMOD se presentan en el APENDICE A (Figura A2), en este se presenta una completa formulación matemática del modelo ALFAMOD

## IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### Cultivo de maíz (DSSAT)

Los coeficientes genéticos utilizados para tres densidades de población de plantas (DP), DP1= 30000, DP2=50000 y DP3=70000 plantas/ha) y tres niveles de fertilización (0, 60 y 120 unidades de nitrógeno) en el cultivo de maíz variedad JAGUAN se reportan en el Cuadro 4.1. Estos coeficientes mostraron mejor ajuste entre la información observada y simulada por el programa DSSAT. Las variables consideradas en estos ajustes fueron; materia seca parcial aérea (MSA), materia seca parcial en hoja (MSH), materia seca parcial en tallo (MST) e índice de área foliar (IAF).

Cuadro 4.1. Coeficientes genéticos utilizados en DSSAT para un buen nivel de ajuste en el cultivo de maíz var JAGUAN.

	<b>*Coeficientes Genéticos</b>	<b>Unidades</b>
G2	607	granos/pta.
G3	9.9	mg/d
P1	320	°C días
P2	0.8	H
P5	685	°C días
PHINT	48	GDD

\*Descritos en Materiales y Métodos

El material genético utilizado en esta investigación (JAGUAN) es de latitudes altas y requiere de menos GDD para producir una hoja (PHINT).

Los coeficientes genéticos (Cuadro 4.1) encontrados para PHINT en esta investigación difieren con los reportados por Rojas (2008) (75 y 80 GDD). Una explicación sería que los materiales (AN447, AN388 y A7573) experimentados por Rojas (2008) tienen su origen en latitudes bajas, y necesitaron más temperaturas para producir una hoja.

### **Materia seca parcial aérea (MSA)**

La variable MSA se estimó adecuadamente con el programa DSSAT ya que al hacer la comparación de los simulados con los observados (Figura 4.1) se encontró una diferencia mínima (Cuadro 4.2). En la Figura 4.1, se presentan los valores máximos simulados y observados de MSA, los valores de esta variable son máximos en el día 150 después de la siembra cuando termina la etapa vegetativa (Cuadro 4.2).

Los sesgos promedios de MSA simulada y observada a la cosecha para diferentes densidades de población y niveles de fertilización son bajos. La producción promedio de MSA simulado a la cosecha para DP1 y tres niveles de fertilización fue 12210 kg/ha y el observado de 12300 kg/ha, así que él observado sobrestima con 90 kg/ha, este sesgo es ligeramente menor al encontrado por Rojas (2008). Este autor encontró una sobrestimación 980 kg/ha. Sin embargo, Téllez (1999) reporta una sobrestimación de 4,051 kg/ha para la variedad AN-388, al utilizar el modelo EPIC con diferentes condiciones de humedad en el suelo; para DP2 y tres niveles de fertilización la producción promedio de MSA fue 15633 kg/ha él

simulado y el observado 13330 kg/ha él simulado sobrestima con 2303 kg/ha, este valor es mayor al encontrado por Rojas (2008). Este autor reporta una sobrestimación de 1500 kg/ha para la variedad A7573; para DP3 y tres niveles de fertilización la MSA fue 16700 kg/ha para simulados, 16166 kg/ha en observados, el simulado sobrestima con 534 kg/ha, este sesgo es mayor al encontrado por Rojas (2008). Rojas reporta una sobrestimación 430 kg/ha para la variedad AN-447.

Como era de esperarse, a mayores niveles de fertilización se incrementó la producción de MSA.

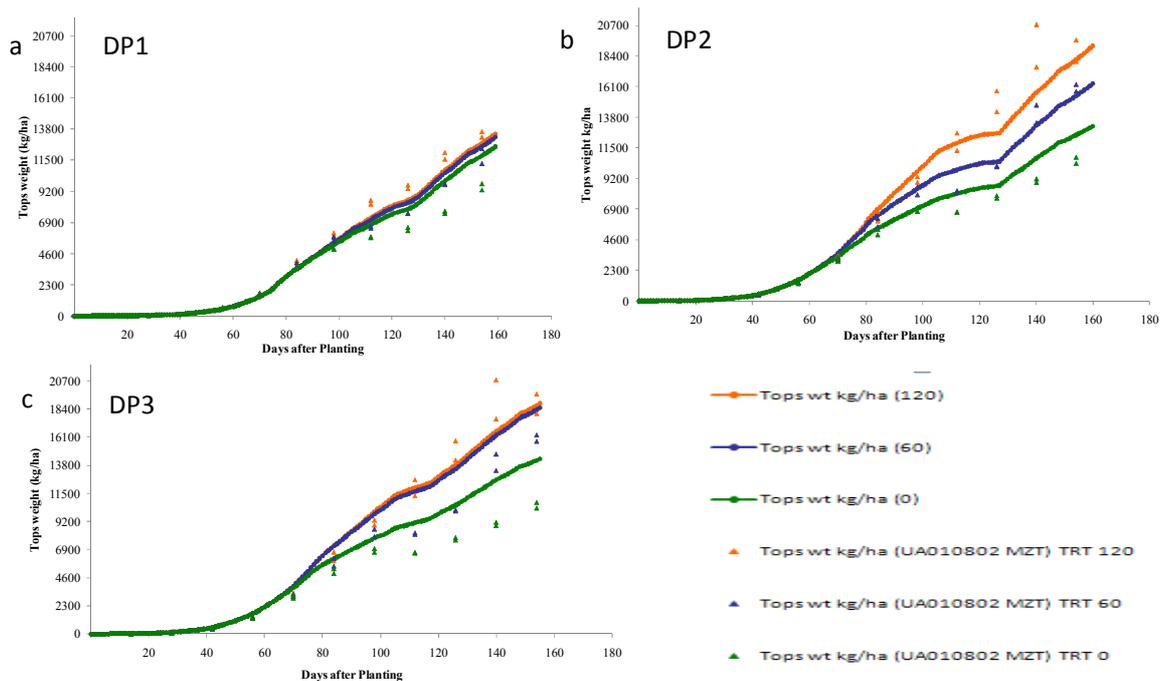


Figura 4.1 Materia seca parcial aérea (MSA) simulada y observada para tres niveles de fertilización nitrogenada (0, 60 y 120 unidades de nitrógeno) y tres densidades de población (DP1=30000, DP2=50000 y DP3=70000 plantas/ha) por el programa DSSAT.

Cuadro 4.2. Materia seca parcial aérea máxima simulada y observada, y estimadores estadísticos de las series para 3 densidades de población y 3 niveles de fertilización en el programa DSSAT

*DP	*F	MSA (kg/ha)		RMSE	R <sup>2</sup>
		Simulados	Observados		
DP1	0	11600	11200	720.14	0.97
	60	12030	12400	505.16	0.95
	120	13000	14300	665.87	0.93
DP2	0	12600	12200	884.84	0.90
	60	16300	16100	1204.62	0.95
	120	18000	18500	1018.00	0.96
DP3	0	13600	12200	1060.24	0.88
	60	17400	16500	1094.59	0.98
	120	19100	19800	961.71	0.97

\*Mencionados en materiales y métodos

### **Materia seca parcial en hoja (MSH)**

Con tres densidades de población (DP1=30000, DP2=50000 y DP3=70000 plantas/ha) y tres niveles de fertilización (0, 60 y 120 unidades de N) la variable MSH fue simulada de forma aceptable, al comparar la tendencia entre observados y simulados (Figura 4.2). Los valores máximos simulados y observados, y parámetros estadísticos se encuentran en el Cuadro 4.3.

La Figura 4.2 presenta las tendencias de valores simulados y observados. La tendencia del modelo fue a sobrestimar MSH debido a que la estimación presentó valores altos (Cuadro 4.3). Se puede observar que a mayor fertilización y densidad de población, se alcanza máxima producción de MSH, esta se observa en los días 100 y 120 (Cuadro 4.3). Una relación similar aunque inversa, la registran Wright y Keener (1982) con el modelo CORN-F al obtener valores menores a los observados en MSH. Sin embargo, Rojas

(2008) reporta valores similares (Cuadro 4.3) de MSH a los encontrados en la variedad que se observó.

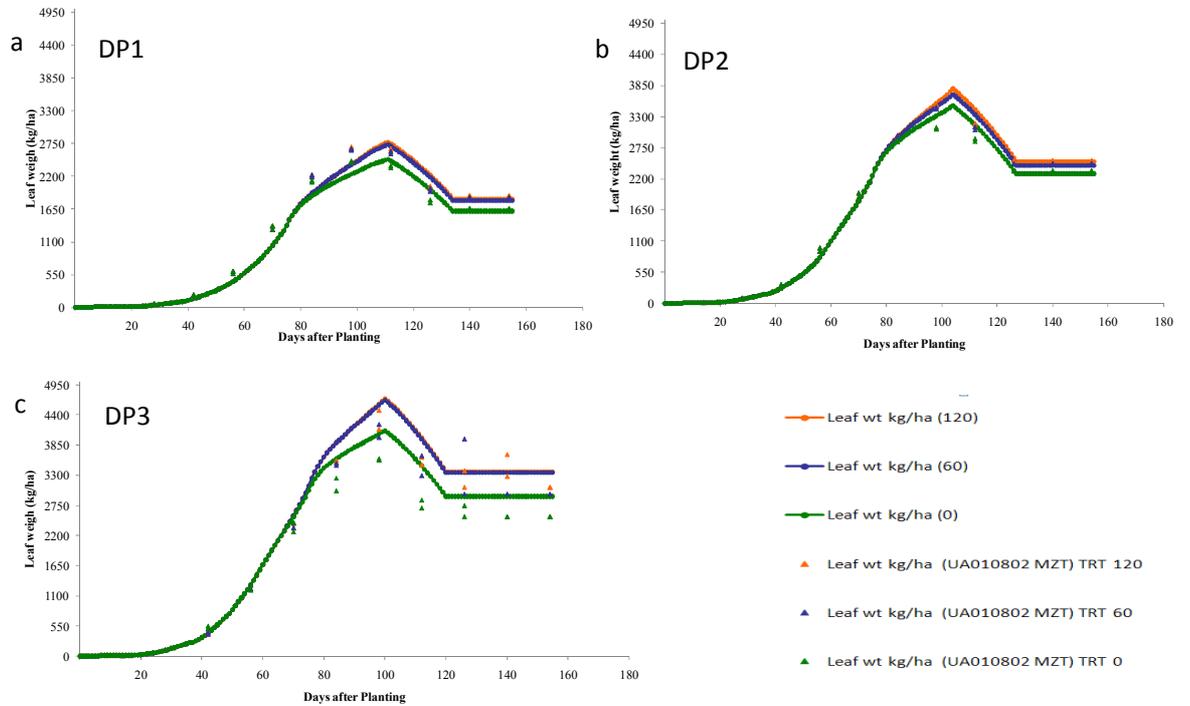


Figura 4.2. Materia seca parcial en hoja (MSH) simulada y observada para tres niveles de fertilización nitrogenada (0, 60 y 120 unidades de nitrógeno) y tres densidades de población (DP1=30000, DP2=50000 y DP3=70000 plantas/ha) por el programa DSSAT.

Cuadro 4.3. Materia seca en hoja máxima simulada y observada, y estimadores estadísticos de las series para 3 densidades de población y 3 niveles de fertilización en el programa DSSAT.

<b>MSH (kg/ha)</b>					
<b>DP</b>	<b>F</b>	<b>Simulados</b>	<b>Observados</b>	<b>RMSE</b>	<b>R<sup>2</sup></b>
	0	2200	2000	155.57	0.97
DP1	60	2350	2300	171.35	0.98
	120	2740	2750	173.53	0.97
DP2	0	3300	2830	120.05	0.99
	60	3420	2960	95.12	0.99
	120	3600	3100	191.52	0.99
DP3	0	2400	2600	237.81	0.97
	60	4400	4482	291.00	0.99
	120	4410	4483	237.82	0.95

### **Materia seca parcial en tallo (MST)**

La variable MST se simuló de manera aceptable en observados y simulados, en estos, se aprecia un buen nivel de ajuste y una diferencia mínima. Los valores de MST y parámetros estadísticos se indican en el Cuadro 4.4. Sin embargo, aunque los estadísticos explican un buen nivel de ajuste y márgenes de errores mínimos, en la Figura 4.3 se observa que existen diferencias entre observados y simulados. Lo anterior se relaciona con lo expuesto por Rojas (2008). Este autor encontró valores de MST (en tres variedades de maíz) similares a los indicados en el Cuadro 4.4.

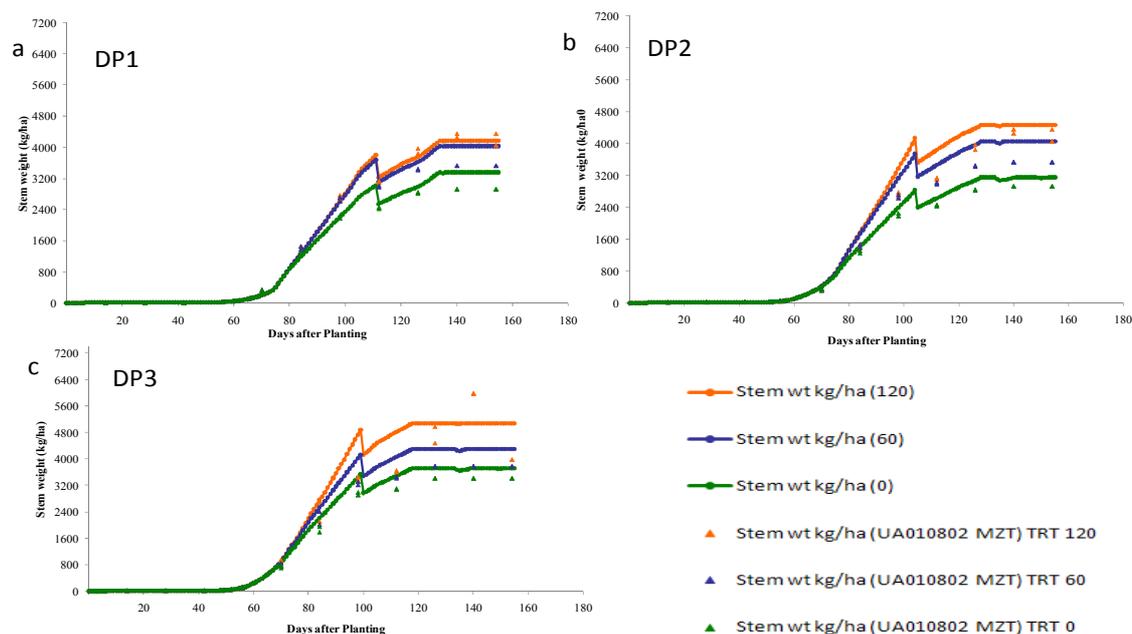


Figura 4.3. Materia seca parcial en tallo (MST) simulada y observada para tres niveles de fertilización (0, 60 y 120 unidades de nitrógeno) y tres densidades de población (DP1=30000, DP2=50000 y DP3=70000 plantas/ha) por el programa DSSAT.

Cuadro 4.4. Materia seca en tallo máxima simulada y observada, y estimadores estadísticos de las series para 3 densidades de población y 3 niveles de fertilización en el programa DSSAT.

DP	F	MST(kg/ha)		RMSE	R <sup>2</sup>
		Simulados	Observados		
DP1	0	2500	2400	200.92	0.99
	60	3400	3200	231.22	0.91
	120	3900	4000	111.28	0.99
DP2	0	3300	3000	279.10	0.99
	60	3800	3200	418.10	0.99
	120	5000	4500	713.10	0.97
DP3	0	3410	3300	156.05	0.90
	60	3600	3450	349.51	0.98
	120	4800	5600	362.20	0.95

## **Índice de área foliar (IAF)**

La variable IAF se simuló con un buen nivel de ajuste, ya que al comparar los observados y simulados se registró una diferencia mínima entre ambos durante el ciclo del cultivo de las diferentes densidades y niveles de fertilizaciones, así como los valores estadísticos de la serie, se presentan en el Cuadro 4.5. Los valores de este Cuadro son similares a los reportados por Rojas (2008). No obstante difieren de los encontrados por De León (1983). En la Figura 4.4 se presentan las tendencias de simulados y observados durante el ciclo del cultivo.

Como era de esperarse, a mayores niveles de fertilización se incrementó el IAF. A este respecto Donald y Hamblin (1976) citan que a una densidad alta y altos niveles de nitrógeno conducen a un incremento en el IAF. Este incremento se refleja en la producción de MSA.

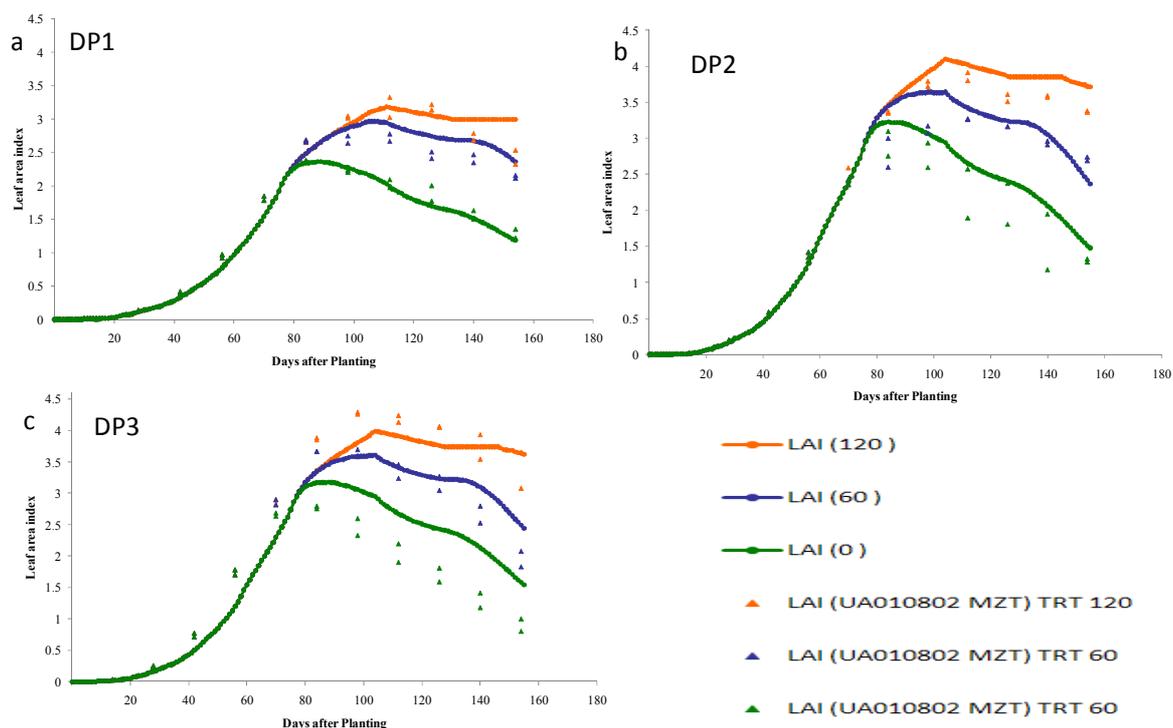


Figura 4.4. Índice de área foliar (IAF) simulado y observado para tres niveles de fertilización nitrógenada (0, 60 y 120 unidades de nitrógeno) y tres densidades de población (DP1=30000, DP2=50000 y DP3=70000 plantas/ha) por el programa DSSAT.

Cuadro 4.5. Índice de área foliar máxima simulada y observada, y estimadores estadísticos de las series para 3 densidades de población y 3 niveles de fertilización en el programa DSSAT.

IAF					
DP	F	Simulados	Observados	RMSE	R <sup>2</sup>
DP1	0	2.3	2.3	0.23	0.96
	60	3.0	2.9	0.20	0.97
	120	3.5	3.5	0.23	0.98
DP2	0	2.6	3.0	0.32	0.93
	60	3.5	3.7	0.28	0.96
	120	4.0	3.9	0.19	0.99
DP3	0	2.8	3.0	0.53	0.80
	60	3.6	3.9	0.34	0.93
	120	4.3	4.6	0.37	0.96

## **Resultados del modelo MAIZ-UAN (STELLA 9.0.2)**

Para presentar los resultados se corrió 100 veces el modelo MAIZ-UAN con el fin de obtener la media y la desviación estandar del comportamiento simulado de cada variable estudiada para las tres densidades y niveles de fertilización. Las variables aleatorias del modelo fueron la temperatura media diaria y la radiación solar media diaria.

### **Materia seca parcial aérea (MSA)**

La Figura 4.5 (a), (b) y (c) presenta la acumulación de forraje máximo cuando se alcanza el IAF máximo (Cuadro 4.6) y comienza a declinar después de que éste ha sido alcanzado, ya que las hojas en las partes inferiores son sombreadas por debajo de los puntos de compensación de la luz, por lo que hay pérdidas de carbono a través de esas hojas vía respiración. La máxima producción (Simulada y Observada), así como los indicadores estadísticos (RMSE y  $R^2$ ) y parámetros fisiológicos (EUR y k) se presentan en el Cuadro 4.6.

La simulación del modelo MAIZ-UAN presentó buena estimación al comparar MSA simulada y observada durante el ciclo del cultivo comprendido del día 165 al 305 (días julianos) después de la siembra (15/11/2008). De acuerdo a los estadísticos, el sesgo más significativo y el nivel de ajuste más bajo entre observados y simulados se presentó con la densidad de población de 50000 plantas/ha (Figura 4.5 b) y los tres niveles de fertilización (00, 60 y 120 unidades de nitrógeno); esto es evidente en la Figura 4.5 b por la sub y sobreestimación del modelo, la cual se comienza a notar a partir de 900-7500 kg/ha y 7500-13000 kg/ha en los períodos 160-

240 y 240-300 días julianos después de la siembra aproximadamente, los valores máximos de MSA, RMSE y  $R^2$  se presentan en el Cuadro 4.6. Los valores de este cuadro no difieren de mucho con los reportados por Rojas (2008) y Téllez (1999). Sin embargo, Latournerie *et al.* (2001) trabajando con diferentes densidades de siembra reportó una producción máxima simulada de 27,070 kg/ha.

La producción de MSA esta en función de la fertilización ya que esta, ayuda a la reestructuración del aparato fotosintetizador. Esto significa que a mayor IAF se intercepta mayor energía solar, la cual (intercepción) esta en función de los procesos de conversión de materia seca en donde juega un papel importante el coeficiente eficiencia en el uso de la radiación y el coeficiente de extinción (Bradley *et al.*, 1994). Los valores (4.02 y 0.65) de estos coeficientes fueron tomados del programa DSSAT, con estos coeficientes el modelo MAIZ-UAN estima producción MSA. Lo anterior se observa en la Figura 4.5, en esta se presenta el efecto de la fertilización, este efecto es mas notorio a medida que se incrementa el nivel de fertilización, lo que significa que a mayor fertilización mayor es la producción MSA, este efecto coincide con lo mencionado en Wright y Keener (1982).

Los valores máximos simulados y observados de MSA se presentan en el Cuadro 4.6. Estos valores no difieren de mucho con lo reportado por Rojas (2008) y Téllez (1999). Por otro lado, Donald y Hamblin (1976) trabajando con diferentes densidades de siembra y fertilización reportan valores que difieren significativamente con los encontrados en esta investigación (Cuadro 4.6).

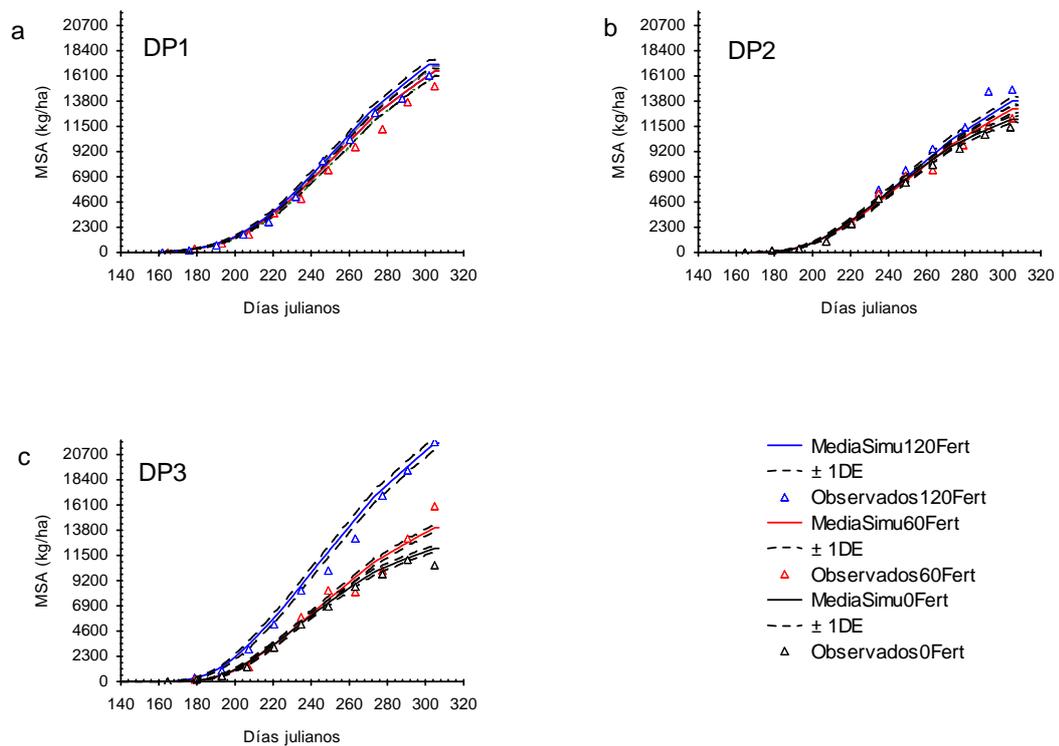


Figura 4.5. Materia seca parcial aerea (MSA) simulada y observada para tres niveles de fertilización nitrógenada (0, 60 y 120 unidades de nitrógeno) y tres densidades de población (DP1=30,000; DP2=50,000 y DP3=70,000 plantas/ha) por el modelo MAIZ-UAN.

Cuadro 4.6. Materia seca parcial aérea máxima simulada y observada, y estimadores estadísticos de las series para 3 densidades de población y 3 niveles de fertilización en el modelo MAIZ-UAN.

DP	F	MSA(kg/ha)		RMSE	R <sup>2</sup>
		Simulado	Observado		
DP1	00	15175	14475	262	0.91
	60	16543	15238	315	0.87
	120	17141	16217	248	0.89
DP2	00	11138	11494	118	0.98
	60	13081	11577	197	0.92
	120	13816	14757	129	0.93
DP3	00	11274	11024	199	0.92
	60	14019	15998	315	0.93
	120	21726	21814	304	0.96

### **Materia seca parcial en hoja (MSH)**

En la Figura 4.6, se presenta la dinámica de producción en MSH estimada en campo y simulada por el modelo MAIZ-UAN. En esta Figura se observan los efectos que tienen la densidad de población (DP1, DP2 y DP3) y la fertilización en la producción de MSH. Los valores máximos simulados y observados para los 9 escenarios de MSH fueron muy semejantes con coeficientes de 0.89 a 0.97 (Cuadro 4.7). Estos valores son similares a los encontrados por Rojas (2008) en la variedad AN-447. Sin embargo, Barcenas (1989), al trabajar con diferentes variedades en un modelo dinámico de simulación para maíz encontró valores de MSH que difieren con los reportados en esta investigación. Por otro lado, el sistema hoja juega un papel importante en los forrajes, esta es un indicador del crecimiento y desarrollo del cultivo, con el desarrollo se puede distinguir visualmente etapas fenológicas y con estas observar la dinámica de producción de MSH en función de la producción de carbohidratos (Robson *et al.*, 1988; Lemaire, 1997).

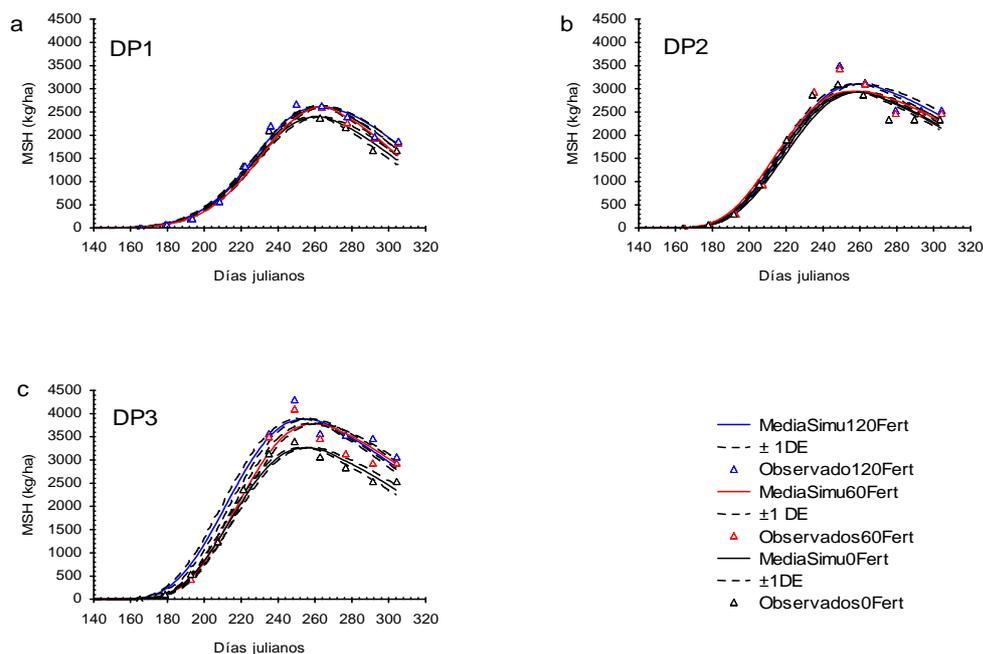


Figura 4.6. Materia seca parcial en hoja (MSH) simulada y observada para tres niveles de fertilización nitrogenada (0, 60 y 120 unidades de nitrógeno) y tres densidades de población (DP1=30,000; DP2=50,000 y DP3=70,000 plantas/ha) por el modelo MAIZ-UAN.

Cuadro 4.7. Materia seca parcial en hoja máxima simulada y observada, y estimadores estadísticos de las series para 3 densidades de población y 3 niveles de fertilización en el modelo MAIZ-UAN.

DP	F	MSH(kg/ha)		RMSE	R <sup>2</sup>
		Simulado	Observado		
DP1	00	2392	2445	55	0.97
	60	2602	2656	57	0.97
	120	2625	2639	54	0.98
DP2	00	2924	3091	133	0.89
	60	2928	3441	95	0.96
	120	3096	3497	82	0.96
DP3	00	3233	3389	53	0.96
	60	3771	3495	92	0.96
	120	3853	4314	100	0.97

## Materia seca parcial en tallo (MST)

En la Figura 4.7 se observa, como es de esperar que a mayor densidad de población y mayor dosis de fertilizante fuera mayor MST. Además, se observa que la dosis de fertilización tiene mayor efecto a medida que se incrementa la densidad de población (Figura 4.7).

Los valores simulados para los nueve escenarios, fueron muy semejantes a los observados con coeficientes de determinación de 0.96 a 0.99 (Cuadro 4.8). Los resultados son comparables, a los reportados por Rojas (2008). Sin embargo difieren de los encontrados por Bárcenas (1989) con el modelo CORN-F.

En relación a lo anterior, el modelo MAIZ-UAN responde a los cambios de fertilización, estos hacen más ajustables a las predicciones del modelo con respecto a los observados (Figura 4.7).

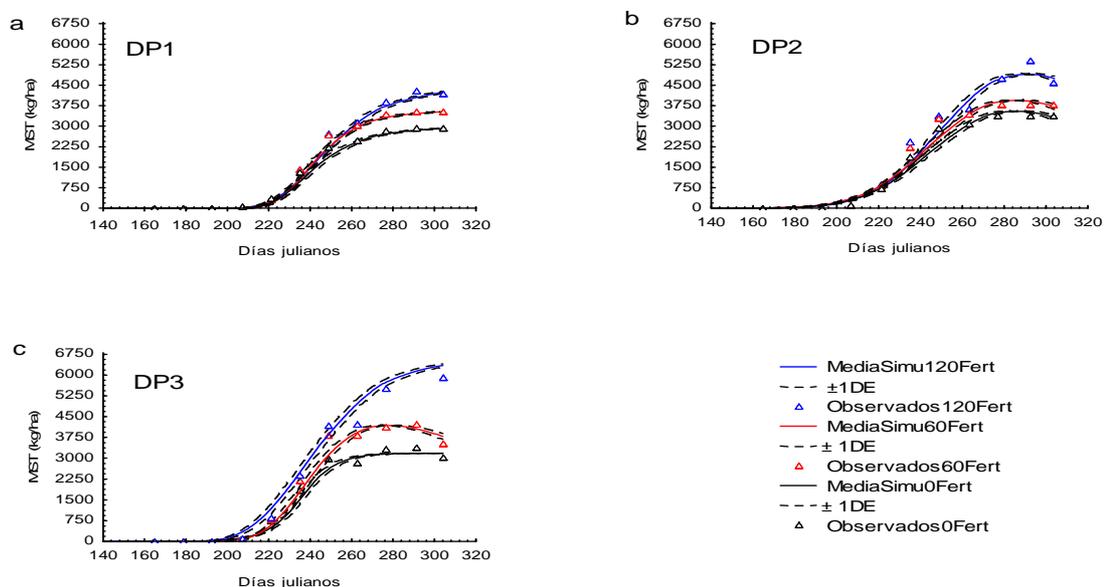


Figura 4.7. Materia seca parcial en tallo (MST) simulada y observada para diferentes niveles de nitrógeno (0, 60 y 120 unidades de nitrógeno) y tres densidades de población (DP1=30,000; DP2=50,000 y DP3=70,000 plantas/ha) por el modelo MAIZ-UAN.

Cuadro 4.8. Materia seca parcial en tallo máxima simulada y observada, y estimadores estadísticos de las series para 3 densidades de población y 3 niveles de fertilización en el modelo MAIZ-UAN.

DP	F	MST(kg/ha)		RMSE	R <sup>2</sup>
		Simulado	Observado		
DP1	00	2914	2918	60	0.98
	60	3529	3533	67	0.99
	120	4239	4300	78	0.98
DP2	00	3507	3401	89	0.97
	60	3909	3778	105	0.96
	120	4899	5374	128	0.97
DP3	00	3176	3371	73	0.98
	60	4189	4245	98	0.97
	120	6346	6835	140	0.97

### Índice de área foliar (IAF)

En la Figura 4.8 se observa, como es de esperar, que a mayor densidad de población y mayor dosis de fertilizante fuera mayor el IAF. Además, se observa que la dosis de fertilización tiene mayor efecto a medida que se incrementa la densidad de población (Figura 4.8).

Los valores simulados para los 9 escenarios, fueron muy semejantes a los observados con coeficientes de determinación de 0.95 a 0.99 (Cuadro 4.9). Los resultados de IAF máximos simulados y observados se acercan a los obtenidos por Rojas (2008).

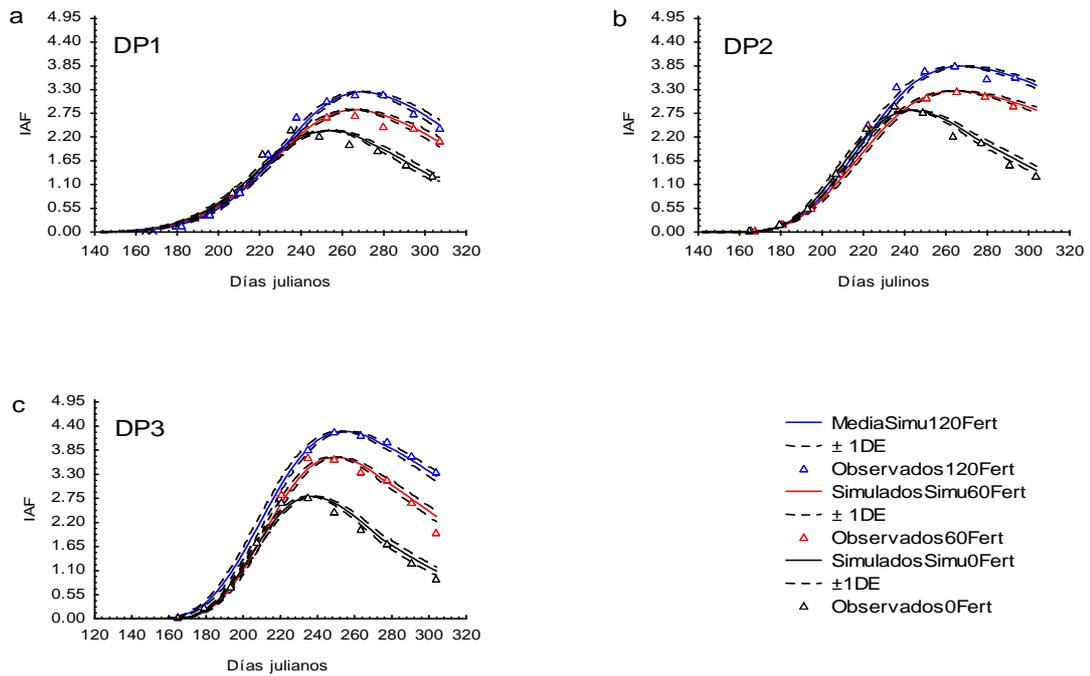


Figura 4.8. Índice de área foliar (IAF) simulado y observado para diferentes niveles de nitrógeno (0, 60 y 120 unidades de nitrógeno) y tres densidades de población por el modelo MAIZ-UAN.

Cuadro 4.9. Índice de área foliar simulada y observada máxima, y estimadores estadísticos de las series para 3 densidades de población y 3 niveles de fertilización.

DP	F	IAF		RMSE	R <sup>2</sup>
		Simulado	Observado		
DP1	00	2.3297	2.3750	0.06	0.95
	60	2.8352	2.7149	0.07	0.96
	120	3.1591	3.1699	0.05	0.98
DP2	00	2.7881	2.9294	0.05	0.98
	60	3.2694	3.2649	0.04	0.98
	120	3.8379	3.8550	0.05	0.99
DP3	00	2.7892	2.7799	0.04	0.97
	60	3.6867	3.6700	0.06	0.98
	120	4.2231	4.2750	0.05	0.99

## Valor nutritivo

En la Figura 4.9 se observa que a mayor fertilización mayor es el contenido de PC, FDA y FDN. Se observa que la dosis de fertilización 120 tiene mayor efecto en PC, FDA y FDN en comparación con las dosis 60 y 0. En relación a lo anterior se observa una relación directa de PC con FDA y FDN, lo que explica que a medida disminuye PC se incrementan los valores (Cuadro 4.10) de FDA y FDN (Figura a y b)

Los valores máximos simulados y observados del valor nutritivo no difieren de mucho con los reportados por Latournerie *et al.* (2001) y Rojas (2008) en las variedades AN-447 y AN388.

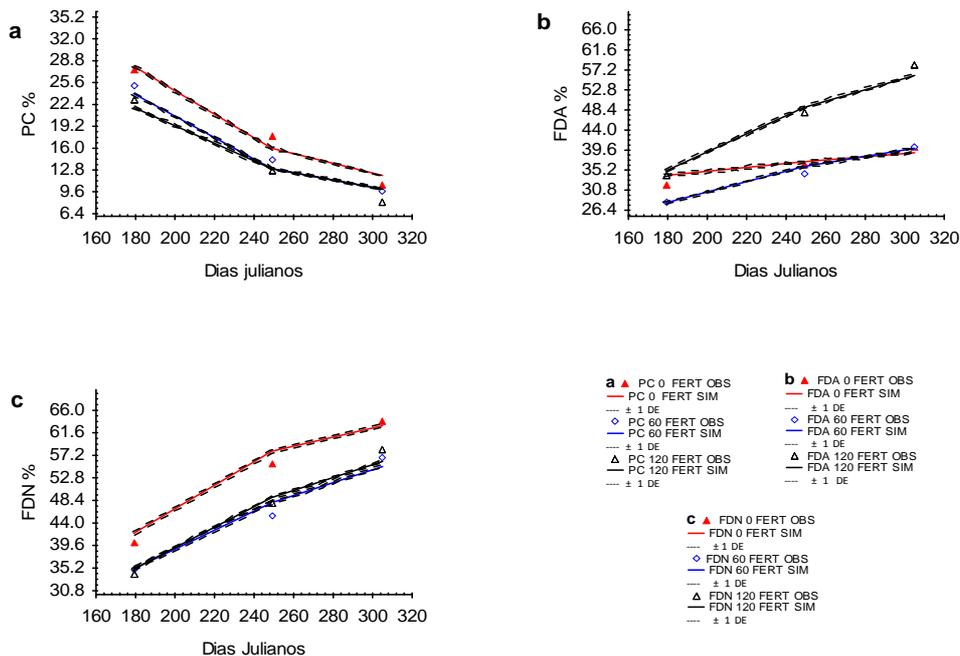


Figura 4.9. (a) Proteína cruda (PC), (b) Fibra en detergente ácido (FDA) y (c) Fibra en detergente neutral observada y simulada con tres niveles de fertilización por MAIZ-UAN.

Cuadro 4.10. Proteína cruda (PC), fibra en detergente-ácido (FDA) y fibra en detergente-neutral (FDN) máxima simulada y observada, y estimadores estadísticos de la serie para tres densidades de población y tres niveles de fertilización (Unidades) en el modelo MAIZ-UAN.

<b>Promedios %</b>					
<b>Var</b>	<b>F</b>	<b>Simulados</b>	<b>Observados</b>	<b>RMSE</b>	<b>R<sup>2</sup></b>
	0	27.45	25.12	0.25	0.92
PC	60	22.00	24.21	0.19	0.98
	120	22.00	23.25	0.25	0.99
	0	36.20	36.66	0.25	0.98
FDA	60	35.20	36.66	0.17	0.95
	120	59.10	60.51	0.12	0.99
	0	60.22	57.03	0.33	0.97
FDN	60	49.61	50.00	0.25	0.92
	120	50.24	52.06	0.29	0.97

### **Cereales de invierno (DSSAT)**

Los coeficientes genéticos para las variedades de los cultivos; Cebada (Narro-92-05), Triticale (AN-31-B) y Trigo (AN-239) obtenidos mediante la calibración de los modelos integrados en DSSAT se presentan en el Cuadro 4.11. Estos coeficientes presentaron un buen nivel de ajuste entre los valores observados y simulados por el programa DSSAT. Las variables consideradas fueron; materia seca parcial aérea (MSA), materia seca parcial en hoja (MSH), materia seca parcial en tallo (MST) e índice de área foliar (IAF). Los resultados (Cuadro 4.11) de las variedades para las variables mencionadas encontrados y utilizados en el presente estudio muestran sensibilidad al fotoperiodo, este es un factor que

define la iniciación floral y el inicio de llenado de grano (Hogemboom *et al.*, 2003). Este efecto es más notorio en Triticale (AN-31-B) y en Trigo (AN-239), el Triticale es el que presenta mayor porcentaje de reducción en la tasa de desarrollo con 60 %, siguiéndole el trigo con un 55%. En cuanto a la fase de llenado de grano se observa que la cebada es precoz ya que lo que requiere son 250 GDD mientras que el trigo requiere de 400 GDD. Esto coincide en lo tardío que se muestra en el cultivo durante el ciclo. Una segunda explicación sería; en el triticale (AN-31-B) se presenta mayor porcentaje de reducción en la tasa de desarrollo con un 60 % y en el trigo (AN-239) la reducción es 55%, mientras que en la cebada (Narro-92-05) es del 5%, esto quiere decir que las variedades de trigo y triticale son más lentas en comparación con la variedad cebada.

El filocrono (PHINT) explica que los ciclos de las variedades de los cultivos de la cebada es el más precoz que las otras dos variedades, esto se menciona por los 55 GDD que hay entre la aparición de cada una de sus hojas. Estos resultados (Cuadro 4.11) son similares a reportados por Rodríguez (2008).

Cuadro 4.11. Coeficientes genéticos utilizados durante la calibración de los modelos DSSAT

Cultivo (Variedad)	Coeficientes genéticos						
	*P1V	*P1D	*P5	*G1	*G2	*G3	*PHINT
Cebada(Narro-92-05)	5	5	250	12	50	1	55
Triticale (AN-31-B)	20	60	370	30	24	1.7	60
Trigo (AN-239)	20	55	400	25	24	1.5	60

\*Descritos en materiales y métodos

### **Materia seca parcial aérea (MSA)**

En la Figura 4.10 se presenta la producción de MSA, se observa que los incrementos de MSA en el cultivo de Cebada comienzan desde la germinación a la cosecha, mientras que en los cultivos de Triticale y Trigo (Figura 4.10 a y b) son más notorios a los 46 días después de la siembra. Además se puede observar mayor producción de MSA a la cosecha en el cultivo triticale.

En relación a lo anterior la Cebada presenta un rápido crecimiento desde el inicio del ciclo, comparado con las demás variedades y finaliza su velocidad de crecimiento aproximadamente a los 98 días después de la siembra con un rendimiento aproximado de 10,000 kg/ha, por otra parte el Triticale (AN-31-B) presenta lento crecimiento en la primer etapa de desarrollo lo que indica que necesita días de vernalización para iniciar el amacollamiento (Ewert *et al.*,1996) y la finalización de su ciclo se encuentra aproximadamente a los 128 días después de la siembra con un rendimiento aproximado de 14,500 kg/ha. Sin embargo, la finalización del ciclo del cultivo de trigo se encuentra aproximadamente a los 120 días después de la siembra con un rendimiento aproximado de 10400 kg/ha.

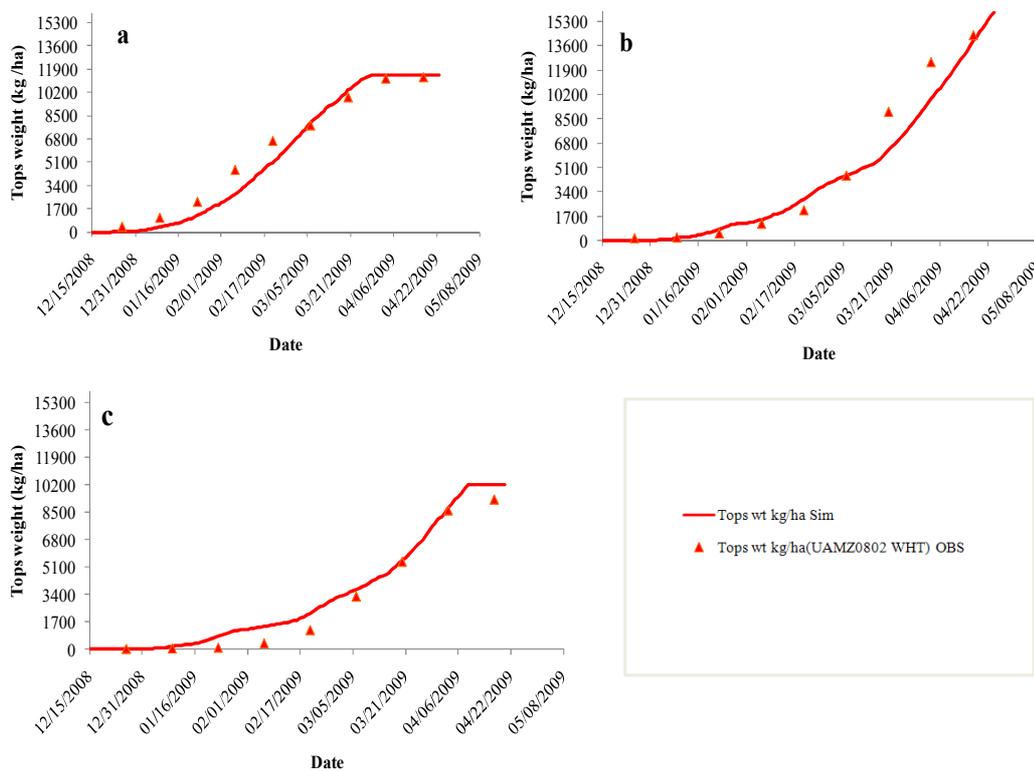


Figura 4.10. Materia seca parcial aérea (MSA) simulado y observado en tres variedades de los cultivos; Cebada (a), Triticale (b) y Trigo (c), durante los ciclo (15 de Noviembre 2008 al 17 de Abril de 2009).

### Materia seca parcial en hoja (MSH)

En la Figura 4.11 se presentan resultados simulados y observados de la variable MSH. En esta Figura se observa un comportamiento aceptable de los valores simulados y observados de la variable MSH, los valores estadísticos son como siguen: Para Cebada (Narro-92-05) el valor de RMSE fue de 199.24 kg/ha con  $R^2$  de 0.60 (Figura 4.11 a), para Triticale (AN-31-B) el RMSE fue de 169.93 kg/ha y el coeficiente de determinación  $R^2$  de 0.94 y en la variedad Trigo (AN-239) fue de 175.54 kg/ha y 0.91 de RMSE y  $R^2$  respectivamente. En la Figura 4.11 a, se observa un sesgo en el

ajuste de valores simulados y observados, este comportamiento es explicado por el  $R^2$ , el cual establece que existe baja asociación entre estos valores. Sin embargo, superan a los valores reportados por Rodríguez (2008) (RSME=424.8  $R^2=0.09$ ). Por otra parte, se observa una tendencia con un buen nivel de ajuste en la Figura 4.11 a y b. En relación a lo anterior, el cultivo de Triticale presentó mayor rendimiento de MSH en simulados y observados en la fecha 03/25/2009 (2100-2200 kg/ha) aproximadamente, esto puede observarse en la Figura 4.11 b.

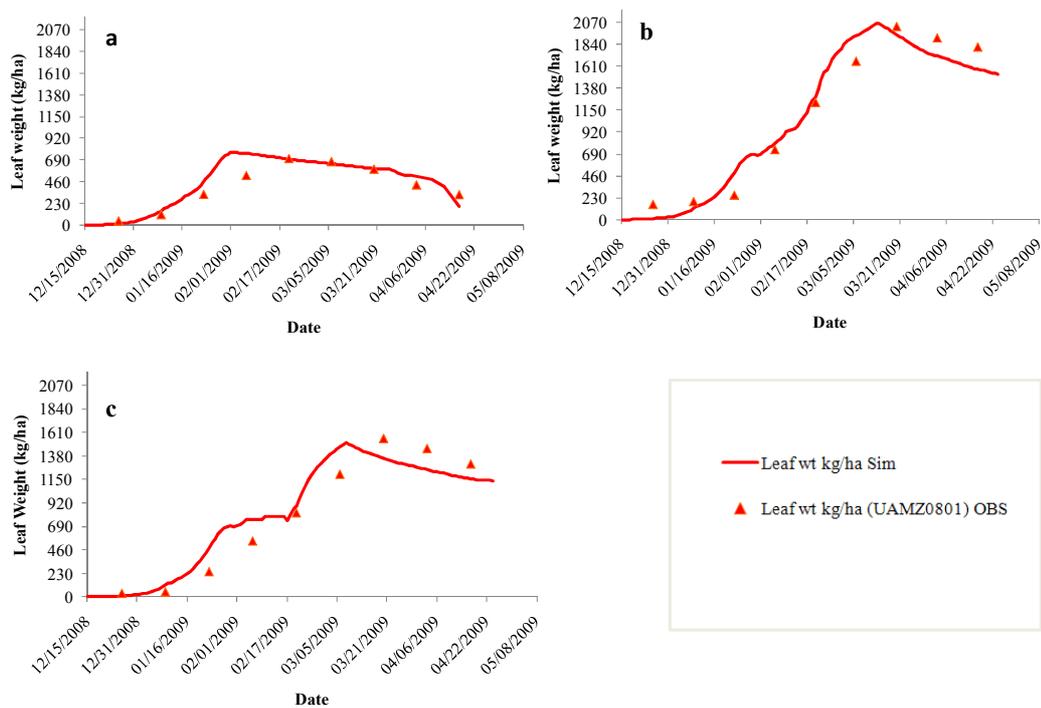


Figura 4.11. Materia seca parcial en hoja (MSH) simulado y observado en tres variedades de los cultivos; Cebada (a), Triticale (b) y Trigo (c), durante los ciclo (15 de Noviembre 2008 al 17 de Abril de 2009)

### **Materia seca parcial en tallo (MST)**

En la Figura 4.12 se observa la dinámica de MST para valores simulados y observados. En esta se aprecia que en el primer período (15 de Diciembre 2008 a 5 de Marzo de 2009) el modelo sobreestima en las variedades (Narro-92-05 y AN-31-B) con rendimientos máximos de 6000 y 6200 kg/ha aproximadamente, después de este periodo hasta terminar el ciclo se observa que el modelo sobreestimó a los valores observados en la variedad Narro-95-02, mientras que en la variedad (AN-31-B) se observa una subestimación. Por otro parte, el modelo sobreestimó los valores observados de la variedad AN-239 durante el ciclo del cultivo.

En relación a lo anterior se puede mencionar que el cultivo de Triticale fue el que presentó mayor rendimiento en la variable MST. Estas tendencias son comparables a las reportadas por Rodríguez (2008).

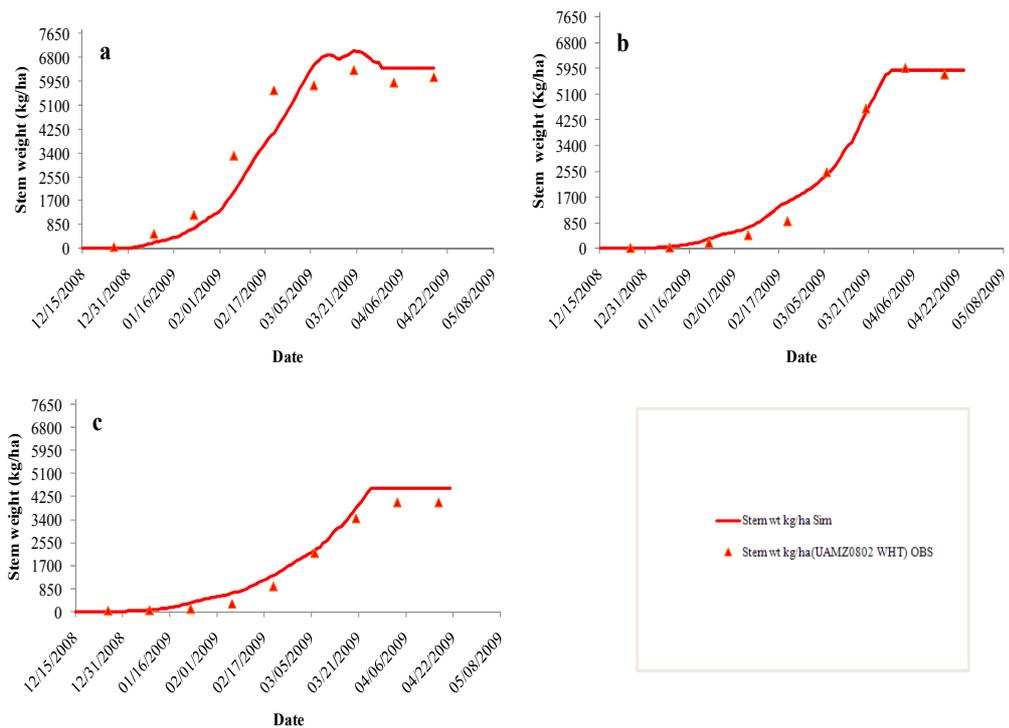


Figura 4.12. Materia seca parcial en tallo (MST) simulado y observado en tres variedades de los cultivos; Cebada (a), Triticale (b) y Trigo (c), durante los ciclo (15 de Noviembre 2008 al 17 de Abril de 2009).

Los indicadores estadísticos que se obtuvieron en el peso seco tallo muestran coeficientes de correlación con buenos niveles de ajustes lo que indica que hay fuerte asociación entre datos observados con simulados, los valores estadísticos del peso seco tallo son como siguen: Para Cebada (Narro-92-05) el valor de RMSE fue de 794.36 con  $R^2$  de 0.93 (Figurar 4.12 a), para Triticale (AN-31-B) el RMSE fue de 892.43 kg/ha con un  $R^2$  de 0.95 y en Trigo (AN-239) fue de 1240.75 kg/ha con 0.90 de RMSE y  $R^2$  respectivamente (Figura 4.12 b y c).

### **Indicé de área foliar (IAF)**

La variable IAF de las variedades de los cultivos mencionados se simularon con un buen nivel de ajuste como se puede apreciar en la Figura 4.13. Esta Figura explica la tendencia de simulados y observados desde el inicio a la cosecha del cultivo, en esta tendencia se observa que la variedad de cebada (Figura 4.13 a) tiene un crecimiento mas rápido en comparación con los IAF de la Figura 4.13 b y c.

Los resultados estadísticos de estas variable son; En cebada (Narro-92-05) se obtuvo un coeficiente de determinación ( $R^2$ ) de 0.912 y la raíz cuadrada del cuadro medio del error (RMSE), el cual indica el grado de error de los simulados en relación a los observados fue de 0.221. Para el Triticale (AN-31-B) se obtuvo un  $R^2$  de 0.874, el cual es superado por el valor 0.98 obtenido por Rodriguez ( 2008), el RMSE obtenido fue de 0.331 y para el Trigo (AN-239) se obtuvo un  $R^2$  de 0.839, un RMSE de 0.303.

Los valores estadísticos indican que existe asociación entre los datos observados y simulados por los modelos integrados en DSSAT, los cuales son una herramienta útil para estimar la forma aceptable de índice de area foliar (IAF).

El IAF de los cultivos mencionados son diferentes para cada una de las variedades estudiadas; en la Cebada (Narro-92-05) el índice de área foliar máximo se alcanza en la fecha 13 de Febrero de 2009 (Figura 4.13 a) después de esta se presenta un decrecimiento lineal y Triticale (AN-31-B), Trigo (AN-239) alcanza el máximo el 5 de Marzo de 2009.

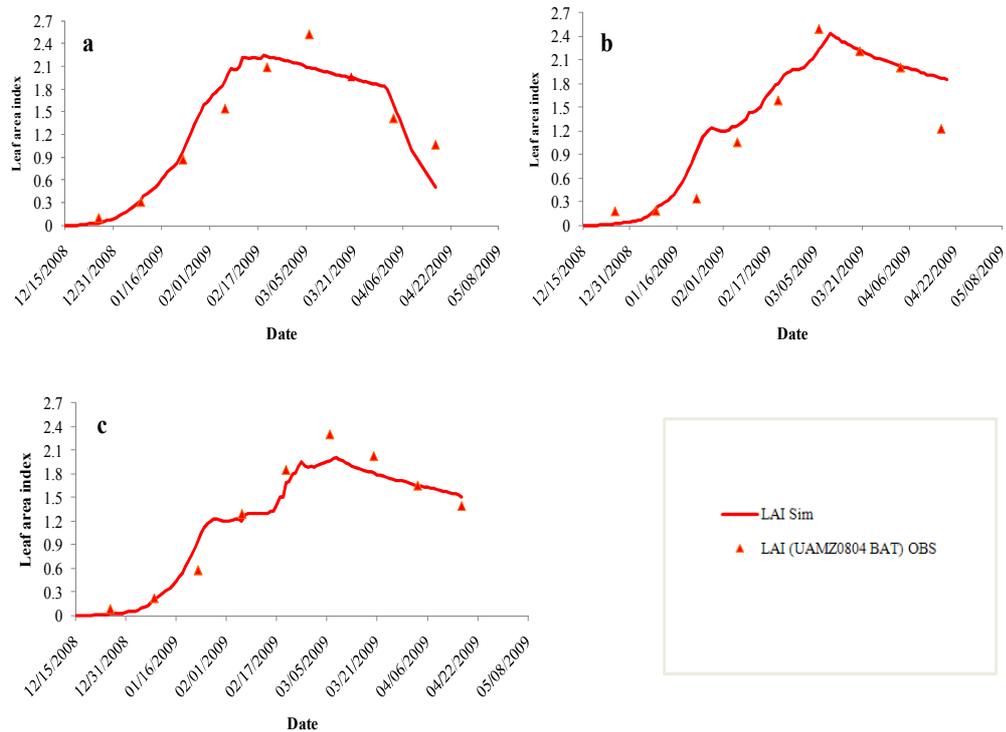


Figura 4.13. Índice de área foliar (IAF) simulado y observado en tres variedades de los cultivos; cebada (a), triticale (b) y trigo (c), durante los ciclo (15 de Noviembre 2008 al 17 de Abril de 2009).

### Resultados del modelo CER-UAN (STELLA 9.0.2)

Las variables que se presentan como resultado de la simulación son: Materia seca parcial aérea (MSA), Materia seca parcial en hoja (MSH), Materia seca parcial en tallo (MST), Índice de área foliar (IAF), Proteína cruda (PC), Fibra detergente ácido (FDA), Fibra detergente neutro (FDN) y Contenido de proteína en el dosel (CPD)

### **Materia seca parcial aérea (MSA)**

Con la ecuación A2 del apéndice A la simulación por el CER-UAN presenta altos valores de MSA en las fechas 9 de Febrero (Cebada) y 23 de Marzo de 2009 en los tres cultivares (Triticale, Trigo y Avena).

La variable MSA se simuló de manera aceptable, se observa en la Figura 4.14 una tendencia similar a lo observado, los indicadores estadísticos encontrados y parámetros usados en CER-UAN para las cuatro materiales (variedades) (Narro-92-05, AN-31-B, AN-239 y Cuauhtémoc) en relación a los valores simulados se presentan en el Cuadro 4.12.

Los valores simulados para los 4 cultivares, fueron muy semejantes a los observados con coeficientes de determinación de 0.93 a 0.99 (Cuadro 4.12). Los resultados de MSA simulados y observados se acercan a los obtenidos por Chávez y Gómez (1999) y Rodríguez (2008).

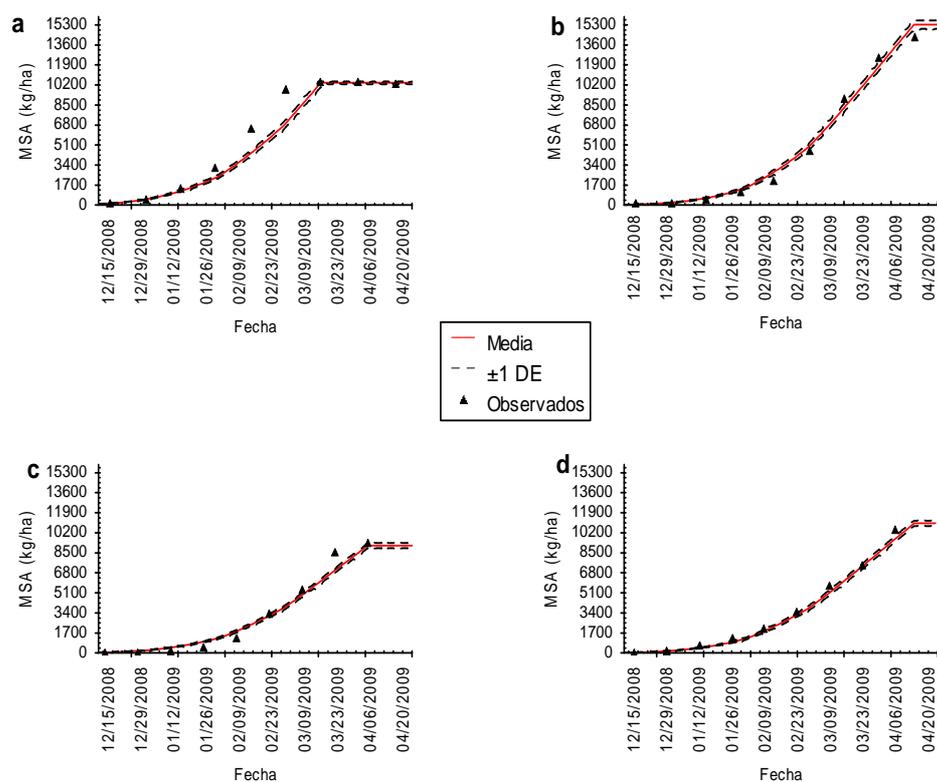


Figura 4.14. Materia seca parcial aérea en los cultivos de Cebada (a), Triticale (b), Trigo (c) y Avena (d) con datos observados y simulados por el modelo CER-UAN (APENDICE A, Figura A1).

Cuadro 4.12. Materia seca parcial aérea máxima observada y simulada, y estimadores estadísticos de las series en el modelo CER-UAN.

Cultivo (Variedad)	MSA (kg/ha)		RMSE	R <sup>2</sup>
	Simulado	Observado		
Cebada(Narro-92-05)	11377	10116	529	0.93
Triticale (AN-231-B)	15869	14934	511	0.99
Trigo(AN-239)	9105	9297	647	0.97
Avena(Cuauhtémoc)	9710	10521	362	0.99

### Materia seca parcial en hoja (MSH)

En la Figura 4.15 se observa la variable MSH de los cultivos (variedades), Cebada (Narro-92-05) Triticale (AN-31-B), Trigo (AN-239) y Avena (Cuauhtémoc).

Los valores simulados para los 4 cultivos, fueron muy semejantes a los observados con coeficientes de determinación de 0.96 a 0.98 (Cuadro 4.13). Los resultados MSH máximos simulados y observados se acercan a los obtenidos por Rodríguez (2008).

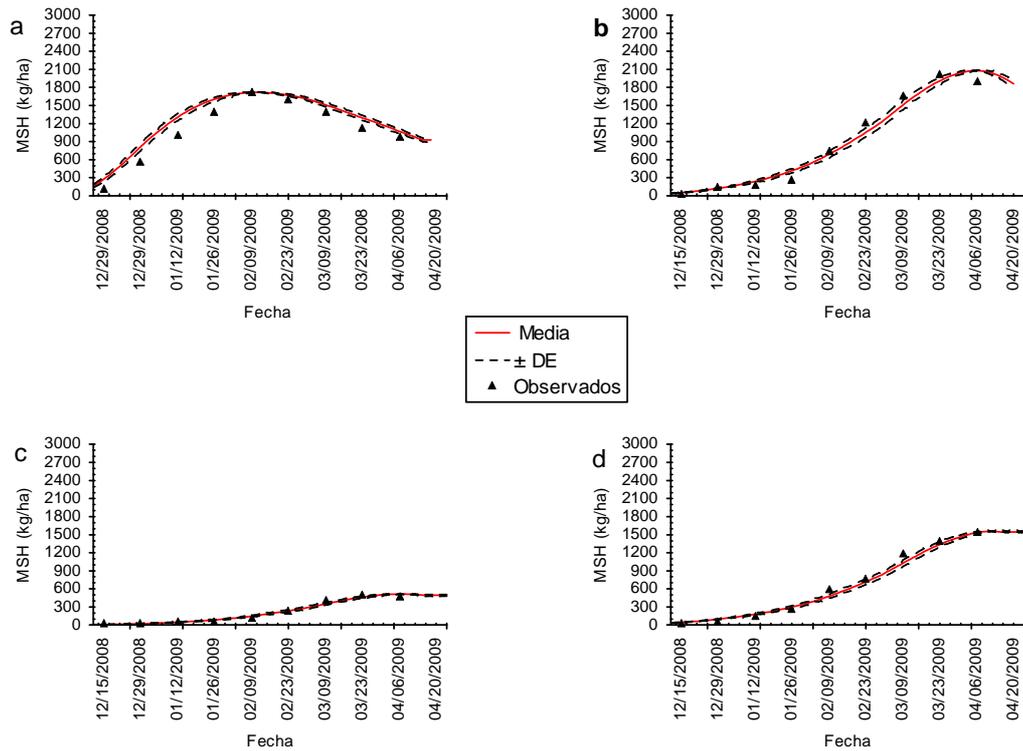


Figura 4.15. Materia seca parcial en hoja (MSH) de los cultivos de Cebada (a), Triticale (b), Trigo (c) y Avena (d) con datos observados y simulados por el modelo CER-UAN.

Cuadro 4.13. Materia seca parcial en hoja máxima observada y simulada, y estimadores estadísticos de las series en el modelo CER-UAN.

Cultivo (Variedad)	MSH(kg/ha)		RMSE	R <sup>2</sup>
	Simulado	Observado		
Cebada(Narro-92-05)	1715	1734	56	0.96
Triticale (AN-231-B)	2078	2029	121	0.90
Trigo(AN-239)	515	496	31	0.96
Avena(Cuauhtémoc)	1534	1555	72	0.98

## Materia seca parcial en tallo (MST)

En la Figura 4.16 se presentan comportamientos observados y simulados de MST por el CER-UAN.

Los valores simulados para los 4 cultivares fueron muy cercanos a los observados con coeficientes de determinación de 0.98 a 0.99 (Cuadro 4.14). Los resultados de MST máximos simulados y observados son semejantes a los obtenidos por Rodríguez (2008).

En relación a lo anterior se puede observar en el Cuadro 4.14 que en todas las variedades existe fuerte grado de asociación ( $R^2$ ) entre valores observados y simulados, lo que significa que el modelo explica el 98, 99, 98 y 98 % de la variación entre observados y simulados Figura 4.16.

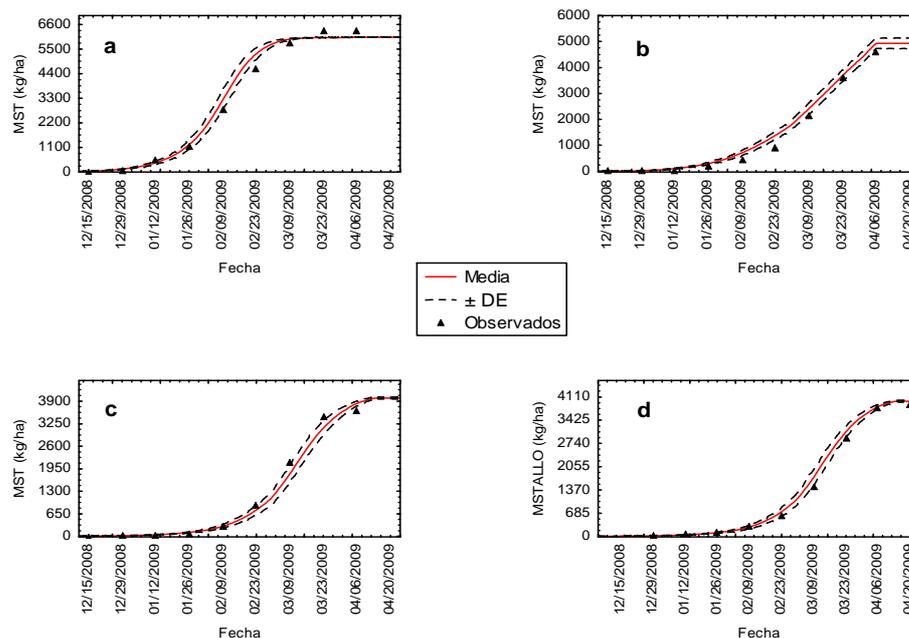


Figura 4.16. Materia seca parcial en tallo de los cultivos de Cebada (a), Triticale (b), Trigo (c) y Avena (d) con datos observados y simulados por el modelo CER-UAN.

Cuadro 4.14. Materia seca parcial en tallo máxima observada y simulada, y estimadores estadísticos de las series en el modelo CER-UAN

Cultivo (Variedad)	MST(kg/ha)		RMSE	R <sup>2</sup>
	Simulado	Observado		
Cebada(Narro-92-05)	6022	6319	294	0.98
Triticale (AN-231-B)	4933	4613	236	0.99
Trigo(AN-239)	3834	3632	197	0.98
Avena(Cuauhtémoc)	3885	3889	126	0.98

### Índice de área foliar (IAF)

Utilizando las ecuaciones A12-A15 del apéndice A la simulación presenta altos valores de índice de área foliar en las fechas 9 de Febrero y 23 de Marzo de 2009 (temperatura media alta) en las cuatro variedades. El cultivo que alcanzo el valor más alto de IAF (3.02) fue Avena (Cuauhtémoc) (Figura 4.17 d) y el que presento el menor fue Cebada (Narro-92-05) (Figura 4.17 a) con 2.32, Rodríguez (2008) reporta un IAF máximo de 1.5 en ciclo primaveral. Una explicación a esta diferencia sería; Los cereales sembrados en épocas primaverales tienden a reducir su número de hijuelos, aumentan su lamina foliar mientras que los de inviernos tienden a un amacolla-miento (incrementan el número de hijuelos) y reducen lamina foliar mientras invernan (bajas temperaturas).

El comportamiento de los IAF en cultivo de Triticale (AN-31-B) y Trigo (AN-239) mostraron que estos cultivares fueron los más tardío en alcanzar su máximo IAF (2.35 y 2.40) (Figura 4.17 b y c).

Los indicadores estadísticos fueron aceptables, en la variedad Cebada (Narro-92-05) se obtuvo un R<sup>2</sup> de 0.96 y un RMSE de 0.12, en la variedad Triticale (AN-31-B) se encontró un R<sup>2</sup> de 0.88, y un

RMSE de 0.29, la variedad Trigo (AN-239) el  $R^2$  fue de 0.96 y un RMSE de 0.18 y para la variedad Avena (Cuauhtémoc) el valor de  $R^2$  fue de 0.97 RMSE de 0.19, estos indicadores fueron encontrados al relacionar simulados por el modelo CER-UAN y observados en campo, el cultivar Narro-92-05 se simuló mejor en DSSAT en su  $R^2$  y RMSE y los otros tres cultivares tuvieron mejor ajustes (RMSE) con el CER-UAN construido en Stella (Figura 1 del Apéndice A).

El IAF máximo observado de la variedad Narro-92-05 fue de 2.37 en la fecha 02/20/2009 (100 días julianos después de la siembra) y el simulado fue de 2.327 en la fecha 03/09/2009 (114 días después de la siembra) esta variación lo explicó el  $R^2$  y RMSE mencionados previamente, en los tres cultivares restantes (Figura 4.17) se alcanzó un IAF máximo observado (2.29, 2.49 y 2.98 en la fecha 03/09/2009 (114 días después de la siembra) y los simulados máximos alcanzados en la fecha 03/23/2009 fueron; 2.45 para la variedad AN-31-B, 2.27 en AN-239 y 3.02 para la variedad Cuauhtémoc. Estos valores no coinciden con los reportados por Rodríguez (2008). Sin embargo, se acercan a los obtenidos en DSSAT.

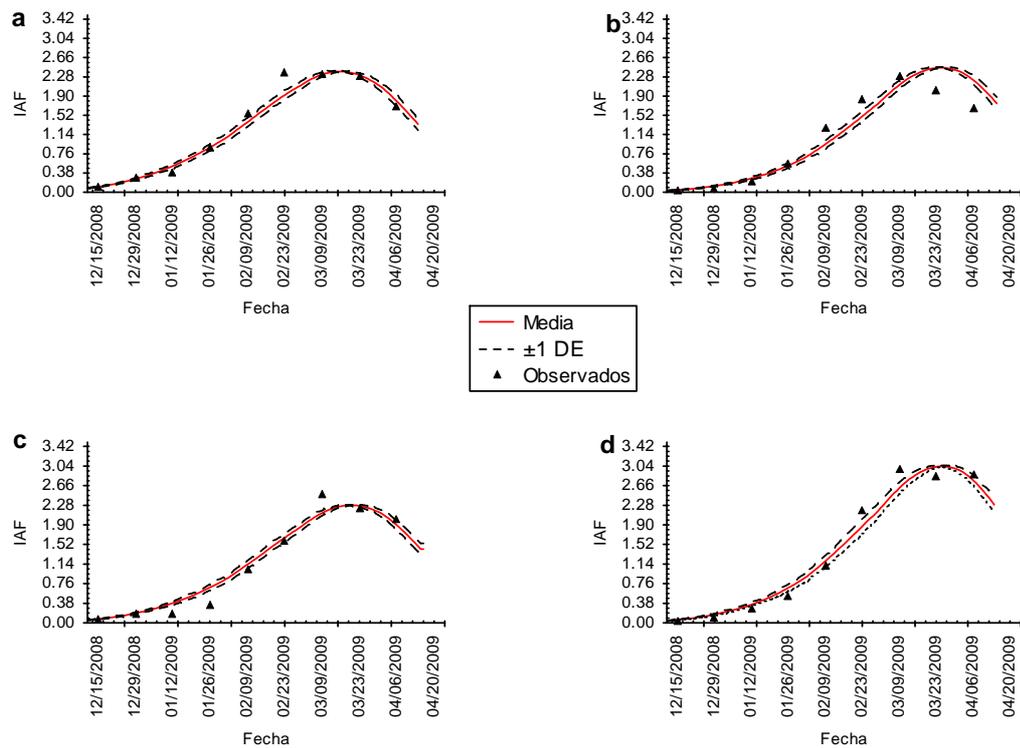


Figura 4.17. Índice de área foliar (IAF) simulado y observado en cuatro variedades de los cultivos; Cebada (a), Triticale (b), trigo (c) y Avena (d), durante los ciclo (15 de Noviembre 2008 al 20 de Abril de 2009).

## Valor nutritivo

### Proteína cruda (PC)

La PC se estimó al relacionar GDD acumulados y datos del análisis bromatológico de cada uno de los genotipos estudiados, las ecuaciones (A16-A24) de determinación se encuentran en el APENDICE A.

En la Figura 4.18 se presentan los resultados de PC de tres variedades, el comportamiento de caída en proteína cruda es más lento en Triticale (a) y Avena (c) en comparación con Trigo (b), la lentitud en la tendencia de PC nos indica la duración de la etapa vegetativa, es decir la calidad del forraje está directamente

relacionada con la caída de la PC, por otra parte a mayor velocidad de la tendencia de PC menos calidad de forraje (a). Lo anterior no quiere decir que mientras más tierno este el forraje mayor calidad sino que el forraje puede estar maduro y presentar buena digestibilidad (a).

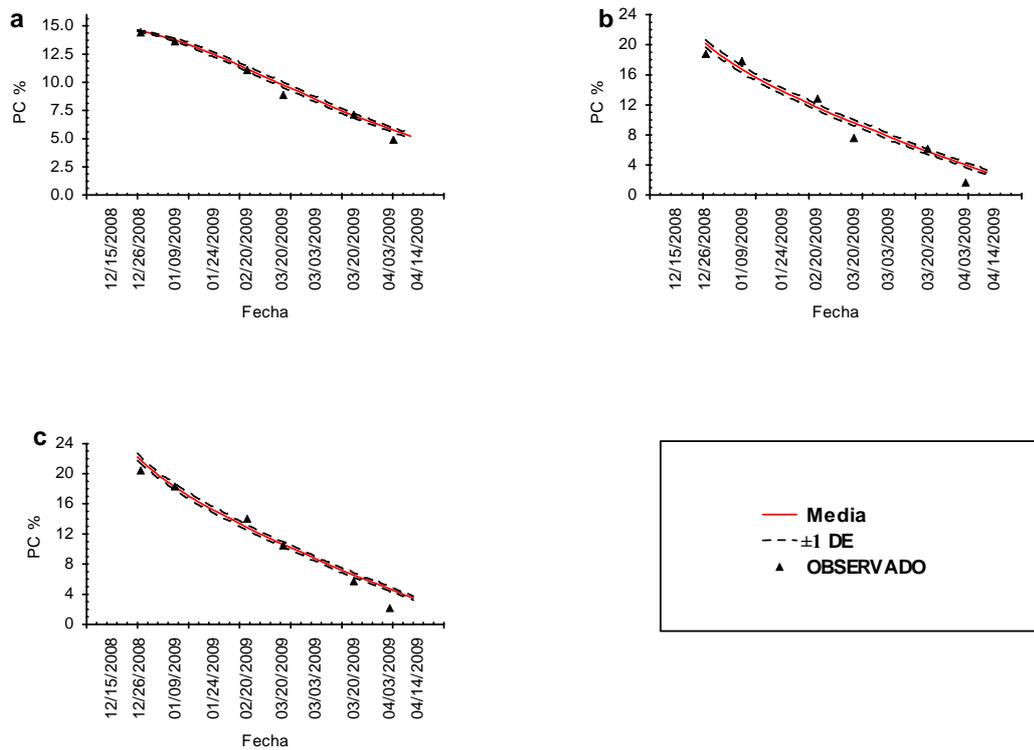


Figura 4.18. Porcentaje de proteína cruda en; a) Triticale (AN-31-B), b) Trigo (AN-239) y c) Avena (Cuauhtémoc) simulados y observados con el modelo CER-UAN y datos de laboratorio durante el ciclo del cultivo.

## Fibra en detergente acido (FDA)

La Figura 4.19 presenta la tendencia de FDA, se observa que el forraje de Triticale (a) tiene un contenido de fibra de 40% en las fechas 03/20/2009-04/03/2009, el Trigo (b) se ubica con 43% de FDA y el forraje de Avena(c) con un contenido de 35% de forraje simulado. Esto nos indica que hay buena calidad de forraje en Triticale y Avena, sin embargo el forraje de Triticale afectará más la dieta alimenticia por que la fibra llenaría más rápidamente al animal y el forraje Avena será de mayor consumo (Figura 4.19). Por otra parte, los observados presentan el mismo comportamiento, se puede visualizar que en a y b sobreestiman al modelo, c se observa un comportamiento homogéneo de FDA.

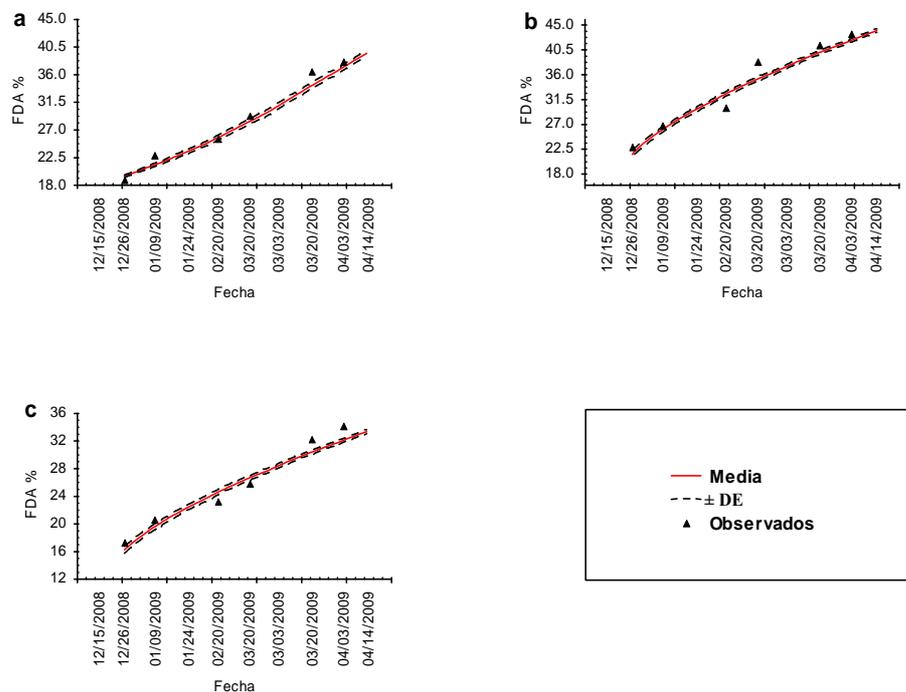


Figura 4.19. Porcentaje de fibra en detergente acido en; a) Triticale (AN-31-B), b) Trigo (AN-239) y c) Avena (Cuauhtémoc) simulados y observados bajo un CER-UAN y datos de laboratorio durante el ciclo del cultivo.

### Fibra en detergente neutral (FDN)

La Figura 4.20 presenta la tendencia de FDN, se observa que el forraje de Triticale (a) tiene un contenido de fibra de 40% en las fechas 03/20/2009-04/03/2009, el Trigo (b) se ubica con 43% de FDN y el forraje de Avena (c) con un contenido de 35% de forraje simulado. Esto nos indica que hay buena calidad de forraje en Triticale y Avena, sin embargo el forraje de Triticale afectara mas la dieta alimenticia por que la fibra llenaría más rápidamente al animal y tardaría más tiempo en digerirla y con el forraje avena le llevará menos tiempo en digerirla.

Por otra parte los observados presentan el mismo comportamiento que los simulados, se puede visualizar que los observados (Figura a y b) sobreestiman al modelo, en la Figura c se observa un comportamiento homogéneo de FDN. Los incrementos de FDN afectan a los animales que tienen baja capacidad de digestibilidad de la materia seca.

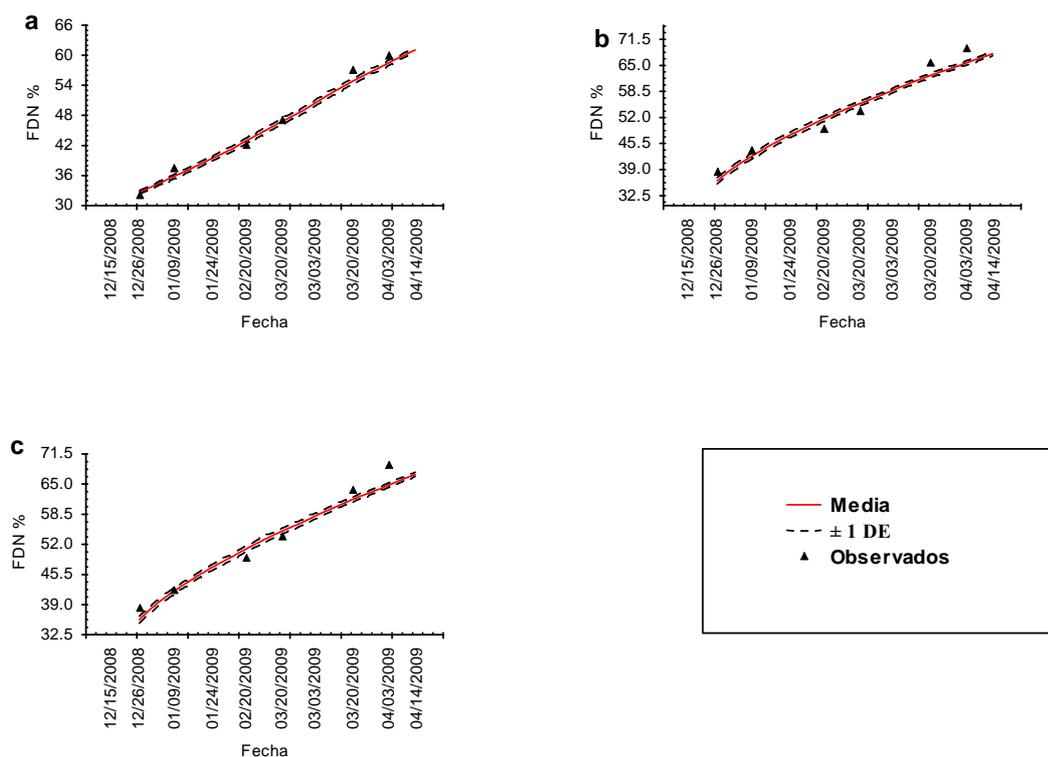


Figura 4.20. Porcentaje de fibra en detergente neutral en; a) Triticale (AN-31-B), b) Trigo (AN-239) y c) Avena (Cauhtémoc) simulados y observados con el modelo CER-UAN y datos de laboratorio durante el ciclo del cultivo.

## Contenido de proteína en el dosel (CPD) por el modelo CER-UAN

Para obtener los resultados de CPD se corrió 100 veces el modelo a 365 días con el propósito de obtener una media y la desviación estándar de la tendencia de cada variable estudiada en un año. Las variables aleatorias del modelo son; temperatura media y radiación global diaria.

En la Figura 4.21 se observa que el dosel del cultivo avena presenta mayor calidad del forraje cuando el dosel es bajo (0.2). Sin embargo, la velocidad de decrecimiento de PC de este cultivo se

hace notar en 0.4 a 1.2, después de este, en el dosel disminuye la calidad del forraje. Por otra parte, la calidad del forraje del Triticale se mantiene brevemente estable a medida que se incrementa el dosel, se aprecia que en doseles 1.5 a 2.4 este cultivo interacciona con la calidad nutritiva del dosel de Trigo y Avena.

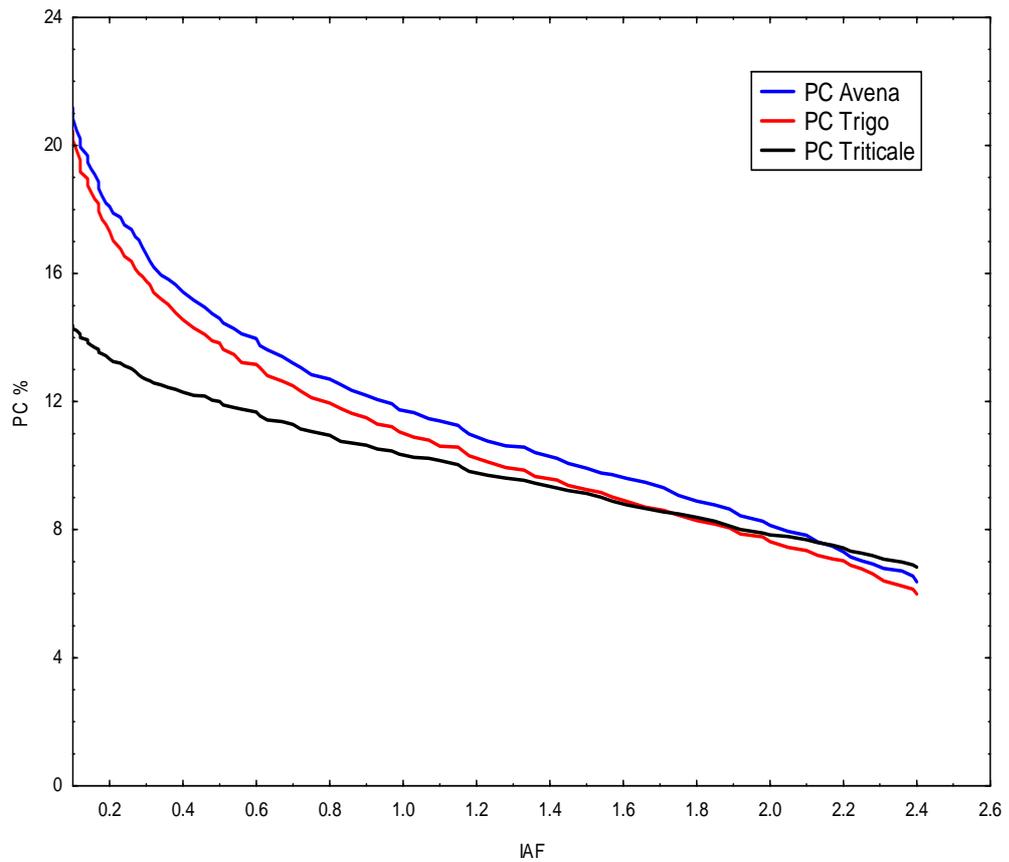


Figura 4.21. Calidad nutritiva simulada por CER-UAN en los cultivos de Triticale, Trigo y Avena.

## Cultivo de alfalfa

### Resultados de ALFAMOD estocástico

Los resultados del modelo estocástico para las variables: materia seca parcial aérea (MSA), número de hojas (NHJ), altura (ALT) e índice de área foliar (IAF), se presentan en la Figura 4.22, y en la Figura 4.23 se presenta, PC %, FDA % y FDN %. Es clara la tendencia, hay mayor producción de MSA en los cortes de verano en relación a otras estaciones del año, y la desviación estándar es mayor en la primavera y el otoño por la mayor variabilidad de la temperatura en esas estaciones del año, esto se refleja en el rendimiento anual (Figura 4.28), a medida que el cultivo experimenta más edad decrece la PC e incrementan la FDA y FDN (Figura 4.23).

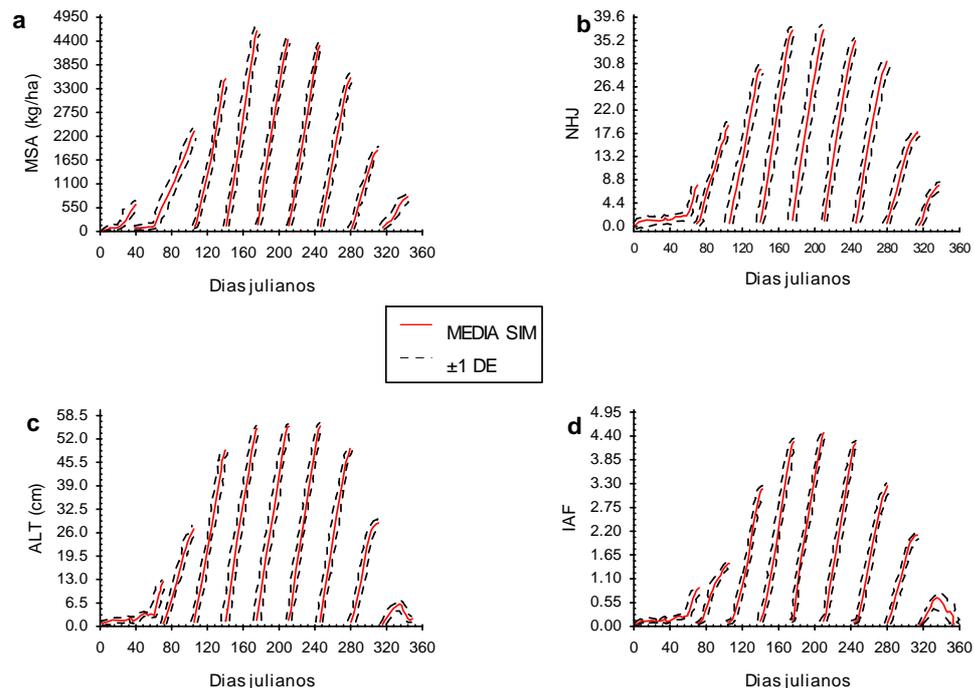


Figura 4.22. Media y desviación estándar de valores simulados para las variables: (a) materia seca parcial aérea (MSP); (b) número de hojas (NHJ), (c) altura (ALT) y (d) índice de área foliar (IAF) (n=100).

## **Valor nutritivo**

### **Proteína cruda (PC)**

Para simular proteína cruda se utilizó la ecuación A34 del APENDICE A, la tendencia de esta variable para cada corte es similar a los valores observados (Figura 4.23 a), en esta se observa que el valor proteico de alfalfa es variable en el año, por ejemplo, en los primeros 60 días el valor de PC es de 42 a 24 %, esto es porque las plantas no se alcanzan a desarrollar por las bajas temperaturas. Por otra parte se observa en los días 100 a 280 una proteína cruda homogénea (42 a 20%), es decir la calidad nutritiva del cultivo es más estable, esto es por las temperaturas optimas que se presentan en estos días, consecutivamente en los 300 a 365 hay variación en esta variable. En la Figura 4.23 a, se observan caídas cada vez que se van acumulando los días de rebrote hasta llegar al corte.

### **Fibra en detergente acido (FDA)**

La variable FDA se simuló con las ecuaciones (A35) del APENDICE A, esta variable explica que a medida que la planta va acumulando días de rebrote se incrementa FDA (Figura 4.23 b). Por ejemplo, en los cortes de verano y otoño el valor promedio en cada corte es de 30 % de FDA, en estas estaciones se observa también valores promedios desde el inicio del corte hasta los 35 días de 22.5 a 30 % de FDA.

### **Fibra en detergente neutral (FDN)**

En la Figura 24 c se puede mostrar que esta variable (FDN) presenta tendencias similares a FDA, las diferencia está en que esta

presenta valores más altos, por ejemplo, en cada uno de los cortes se muestran incrementos de FDA que van del 17 al 36.5 % (35 días), en invierno los valores de FDA son bajos porque el desarrollo de las plantas es lento debido a pérdidas por heladas y así las plantas no acumulan días de rebrote.

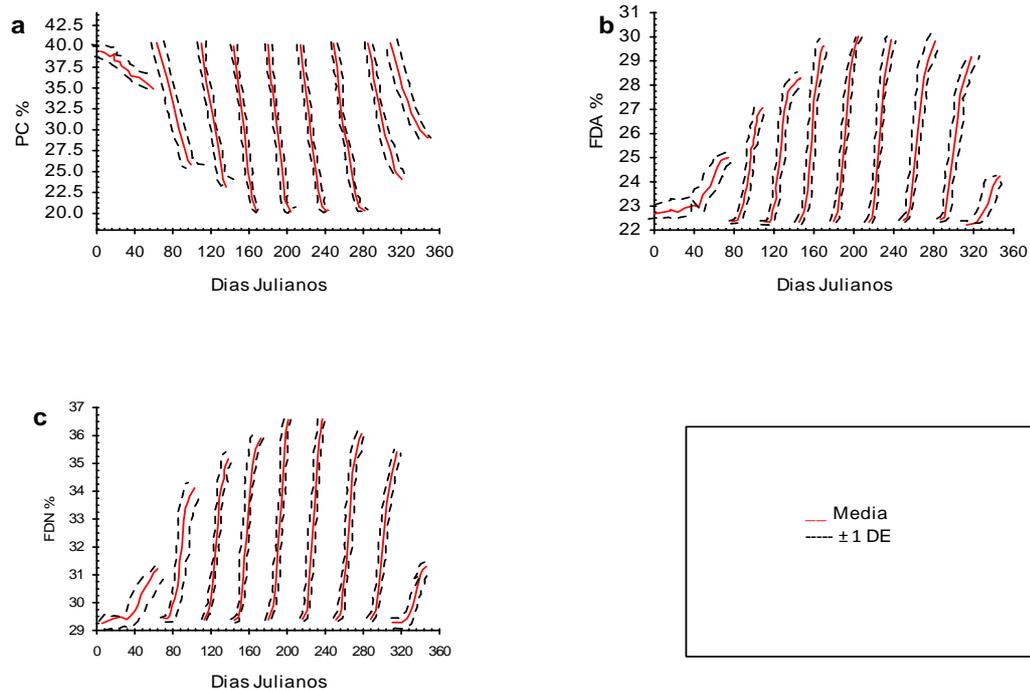


Figura 4.23. (a) Proteína cruda %, (b) Fibra en detergente ácido % y (c) Fibra en detergente neutro % simulada por ALFAMOD estocástico.

### Resultados de ALFAMOD determinístico

Los resultados del modelo se evaluaron comparando valores simulados de las variables al utilizar las temperaturas diarias observadas del 26 de junio de 2008 a 26 de junio de 2009, con valores de las variables observadas en el mismo período. En general el modelo estimó aceptablemente las variables registradas; sin embargo, en los cortes de verano (días julianos 186, 221 y 250) los valores medios al corte de MSA observados (4500, 4600 y 4500

kg/ha) resultaron mayores a los simulados (4000, 4300 y 3800 kg/ha). Después de estos días se observa una diferencia entre observados y simulados menor a 350 kg/ha durante la primavera y el otoño Figura 4.24 a. El número de hojas fue mayor en los días julianos 186, 221 y 250 con valores de 35, 33, 31 para simulados y 30, 28 y 30 en observados, con diferencias de 5, 5 y 1 hojas (Figura 4.24 b). La altura máxima simulada por el modelo en los días 186, 221 250, fue de 50, 50 y 48 cm respectivamente sobre estiman los valores promedios observados que fueron de 48, 48 y 47 cm respectivamente (Figura 4.24 c).

El IAF fue subestimado por el modelo en los meses de febrero y marzo (Figura 4.24 d), y las variables número de hojas y altura, fueron sobreestimadas en octubre y subestimadas en noviembre.

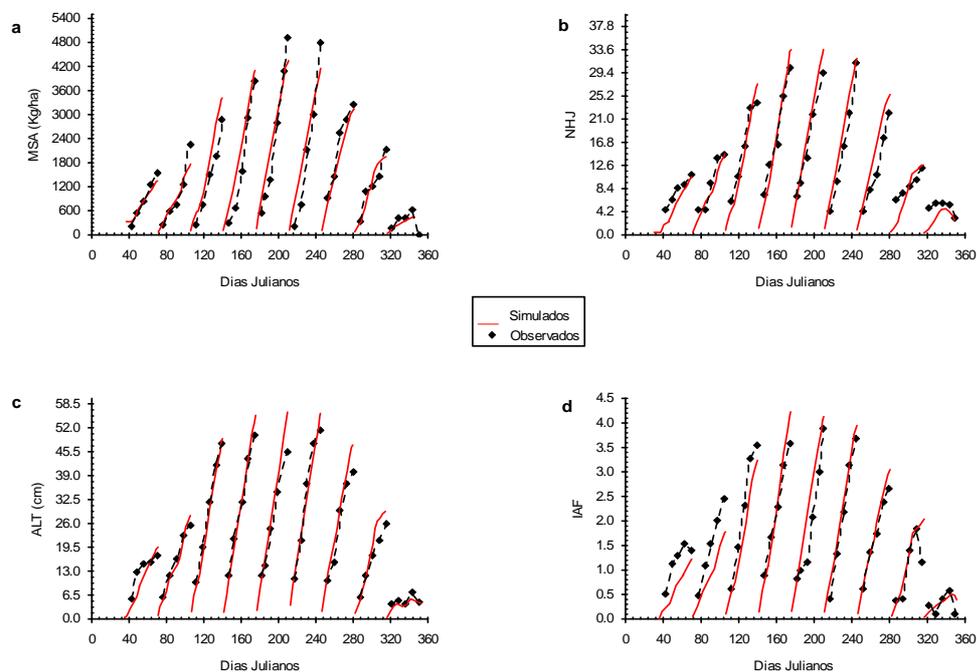


Figura 4.24. Valores simulados y observados de las variables: (a) materia seca parcial aérea (MSA); (c) número de hojas (NHJ); (d) altura (ALT) e (b) índice de área foliar (IAF).

Las relaciones entre valores simulados y observados son presentados en la Figura 4.24 y 4.26 (StatSoft, 2007).

### **Valor nutritivo**

Para simular el valor nutritivo se tomó un período de rebrote que comprende del 9 de mayo al 6 de junio de 2009. Con esta información se analizó el comportamiento simulado y observado de las siguientes variables; proteína cruda (PC), fibra detergente ácido (FDA) y fibra detergente neutral (FDN). La PC se simuló utilizando la ecuación A34, FDA con la ecuación A35 y FDN con la ecuación A36 del Apéndice A, estas ecuaciones son el resultado de la relación de los GDD acumulados con el cambio semanal de PC, FDA y FDN durante los 35 días que comprende un rebrote. La Figura 4.25 presenta concentraciones simuladas y observadas de PC (a), FDA (b) y FDN (c) durante los días 129-157. En esta, se presentan diferentes tendencias a través del tiempo, por ejemplo, en la Figura 4.25 a, se observa que la PC disminuye con el aumento de días de rebrote, esta disminución es por el aumento de las fibras FDA y FDN (Figura 4.25 b y c), ya que al incrementarse la concentración de estas, disminuye la PC. En la práctica, la PC juega un papel importante como indicador del punto de corte, es decir indica en que instante debe realizarse el corte, en el cual sea apreciable una buena calidad nutritiva del forraje. Lo anterior se encuentra con más detalle en el Cuadro 4.15.

Por otra parte en la Figura 4.27 se presentan valores promedios (observados y simulados) con sus desviaciones Standard de cortes en las variables MSA, NHJ, ALT e IAF.

## MSA

En la Figura 4.27 (a) se presenta la producción de MSA para cada corte, en esta Figura se puede observar que la dinámica de MSA para cada corte varia con los meses del año. Este efecto está en función de la temperatura (Santamaría *et al.*, 2000), de forma que los meses con mayor producción de MSA son aquellos cuya temperatura media mensual es superior a 14 °C. La producción de MSA para cada corte no difiere de mucho con lo reportado por Rojas (2008) y Morales *et al.*, (2006). Sin embargo, difieren con los encontrados por Villegas *et al.*, (2004).

## NHOJAS

En la Figura 4.27 (b) se observa un comportamiento similar a la variable anterior, en esta se nota que a mayor temperatura mayor es la producción de hojas. Villegas *et al.*, (2004) reportaron 45 hojas por vástago en la variedad valenciana en época de primavera y en la variedad Oaxaca reportaron 42 y 68 en primavera y verano. Estos valores están por arriba de los observados y simulados para la región de Navidad, Galeana, Nuevo León debido a que es diferente la temperatura del lugar (Temperatura media de 20.6 °C y 14.5 °C en Oaxaca y Navidad) y diferente variedad.

## ALT

Las tendencias de los cortes observados y simulados en la variable ALT se presentan en la Figura 4.27 (c). El observado y el simulado tienen un comportamiento similar, los sesgos se puede observar en cada corte (Figura 4.27 c). Estas tendencias son comparables a las reportadas por Rojas (2008).

## IAF

El comportamiento simulado y observado de IAF para cada corte se presenta en la Figura 4.27 (d). Al igual que las otras variables el valor de IAF varía de acuerdo a los meses; en primavera y verano se observa mayor producción de IAF. Esta producción supera a los valores reportados por Villegas *et al.*, (2004). No obstante coinciden con los reportados por Rojas (2008).

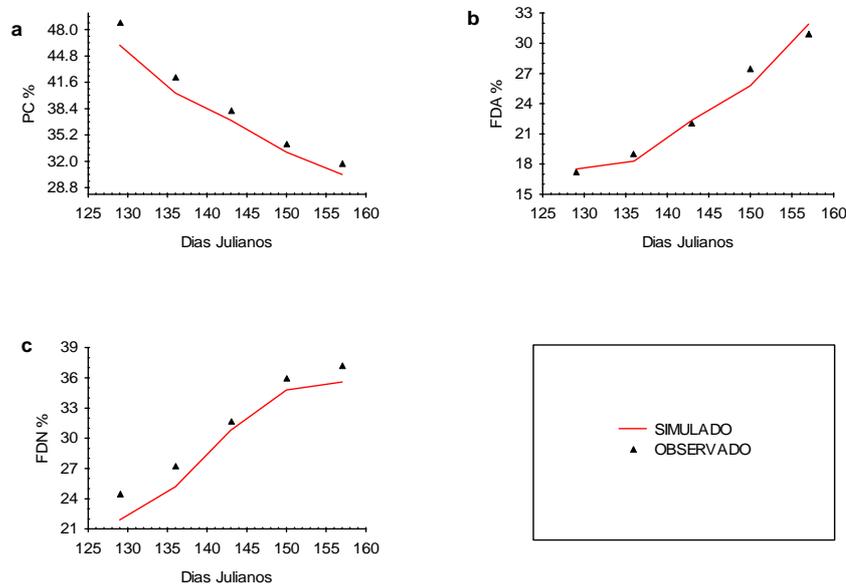


Figura 4.25. Proteína cruda (a), fibra detergente ácido (b) y fibra detergente neutro (c) simulada y observada para la alfalfa CUF-101 por ALFAMOD determinístico.

Cuadro 4.15. Valores máximos simulados y observados e indicadores estadísticos de las variables (VAR) PC, FDA y FDN, en alfalfa con 35 días de rebrote.

VAR	SIMULADOS	OBSERVADOS	RMSE	R <sup>2</sup>
PC	39	37.38	0.435	0.99
FDA	23.18	23.34	0.237	0.95
FDN	31.28	29.66	0.432	0.99

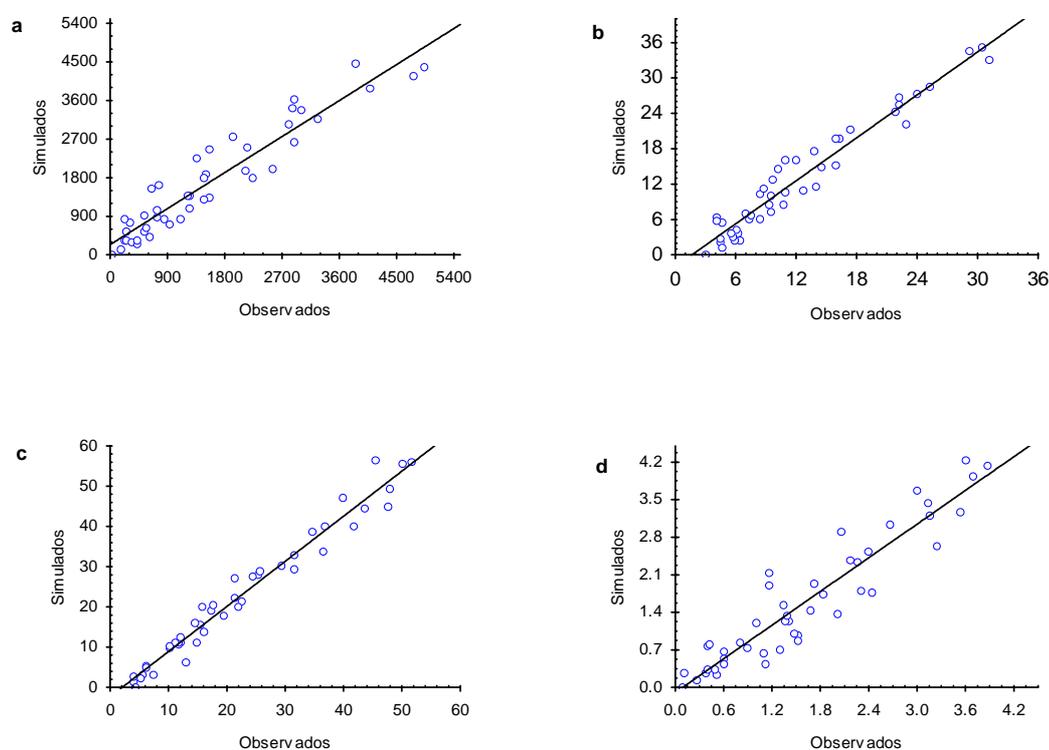


Figura 4.26 Comparación de valores simulados y observados de las variables: (a) materia seca parcial aérea (MSA); (b) número de hojas (NHJ); (c) altura (ALT) y (d) índice de área foliar (IAF)

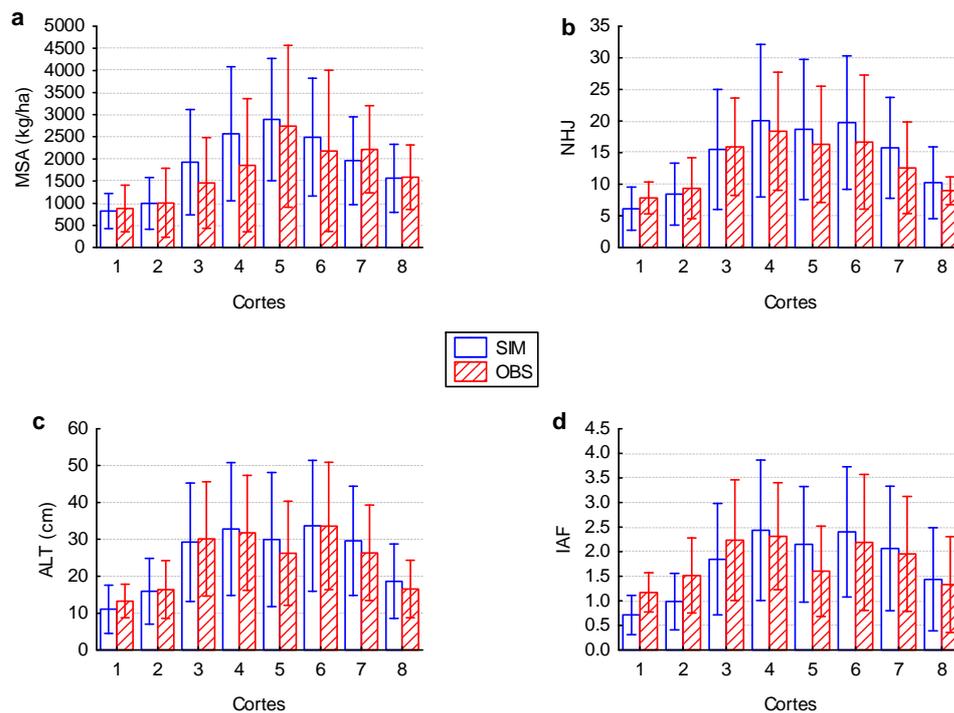


Figura 4.27. Comparación de valores de cortes observados y simulados de las variables: (a) materia seca parcial aérea; (b) número de hojas; (c) altura e (d) índice de área foliar.

### Prueba de t para valores simulados y observados

Para comparar los valores simulados y los observados se usó la prueba de t de student.

El modelo simuló de manera aceptable la producción de materia seca parcial aérea para el año de evaluación (Figura 4.26 a). El modelo explicó el 90% de la variación de producción MSP ( $R^2 = 0.90$ ,  $p \leq 0.05$ ).

El IAF simulado (Figura 4.26 d) concuerda con los obtenidos en campo. Se encontró que los valores generados por el modelo y los observados, estuvieron bien relacionados ( $R^2 = 0.89$ ,  $p \leq 0.05$ ). Por otra parte al relacionar los valores generados de NHJ simulados

y observados en campo (Figura 4.26 b), se encontró correlación entre ambos ( $R^2 = 0.94$ ,  $p \leq 0.05$ ).

El modelo simuló adecuadamente la altura de alfalfa en el año bajo estudio (Figura 4.26 c), ya que explico el 96% de variación de altura ( $p \leq 0.05$ ).

Los datos obtenidos por el modelo comparado con los datos observados durante el año de estudio fueron significativos para cada una de las variables que se mencionan (Figura 4.24).

#### Rendimiento (kg/ha)

En la Figura 4.28 se pueden apreciar diferencias promedios significativas entre el modelo estocástico y el determinístico, se nota que al final del ciclo el cultivo de alfalfa alcanzó un rendimiento de 20799.02 con la forma determinística y 18865.07 con el modelo estocástico, estos valores fueron cercanos a los obtenidos por Rojas (2008).

La Figura 4.28 presenta diferencias en el rendimiento anual durante dos años. En esta, se puede apreciar que la simulación del rendimiento anual por ALFAMOD determinístico sobreestima el rendimiento de ALFAMOD estocástico durante los ciclos del cultivo, esta sobreestimación es más notable en los días que van de 200 a 350. Se puede pensar que durante el periodo 2007-2008 se presentaron bajas temperaturas y en el periodo 2008-2009 se incrementaron estas, indicando un periodo más caluroso y uno más frío.

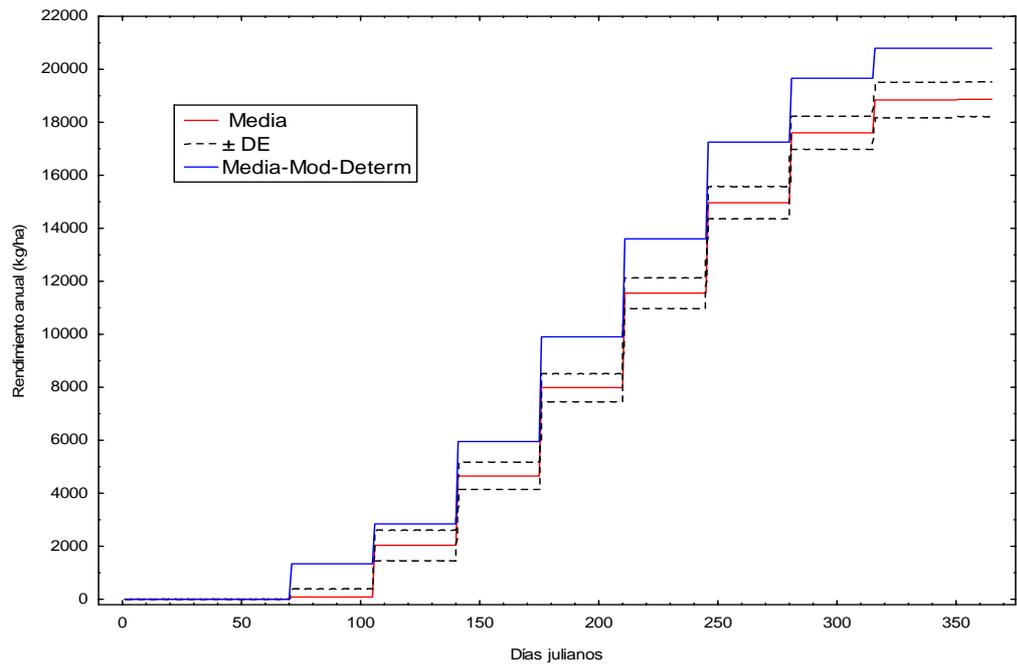


Figura 4.28. Rendimiento anual simulado durante los periodos (2007-2008 y 2008-2009) por ALFAMOD estocástico y determinístico.

## V. CONCLUSIONES

Fue posible calibrar satisfactoriamente el programa DSSAT para los cultivos de maíz (JAGUAN), Cebada (Narro-92-05), Triticale (AN-31-B) y Trigo (AN-239) a partir de información del ambiente (manejo, clima, suelo) y resultados experimentales del cultivo. La falta de información cuantitativa sobre las características de los cultivares, del clima y del suelo en México, dificultan el proceso de calibración, pero hacen más relevantes a los resultados, ya que empieza a proponer coeficientes genéticos. Normalmente, solo se caracteriza un genotipo como temprano o tardío y en el mejor de los casos se indica el número de días que dura su ciclo; sin embargo, sería de mayor utilidad caracterizar los genotipos en base a sus coeficientes genéticos.

Las simulaciones hechas en Stella de los cultivos de maíz (JAGUAN), Cebada (Narro-92-05), Triticale (AN-31-B), Trigo (AN-239) y Avena (Cuauhtémoc) producen simulaciones con buen nivel de precisión, además la ventaja con que cuenta un modelo de simulación construido en Stella es que son más flexibles al incorporar otras variables al sistema y se conoce la estructura cuantitativa del modelo.

Sin embargo el programa DSSAT tiene una programación muy rustica y no se conoce su estructura a detalle, si logramos conocer la estructura, podríamos construir modelos similares en el programa Stella. En este estudio se logró introducir la fotosíntesis potencial en el modelo Stella sin restricciones de CO<sub>2</sub>. En relación a lo anterior se facilita más construir un modelo en Stella.

Fue posible simular el crecimiento y el desarrollo del cultivo de alfalfa bajo condiciones de riego, y esta herramienta, puede utilizarse para hacer de la ganadería una actividad con menos incertidumbre. A medida que las condiciones ambientales son menos controladas como en cultivos de temporal o en los agostaderos, la modelación será más compleja y menos exacta. La modelación en sistemas naturales se justifica para apoyar la toma de decisiones en la ganadería y en la conservación de los recursos naturales por ser sistemas muy complejos y de alta incertidumbre.

El modelo analiza por separado las partes del cultivo, y genera valores simulados muy semejantes a los observados utilizando como única variable controladora la temperatura del aire, variable que es fácil de medir y registrar.

Los modelación es la integración racional del conocimiento de fenómenos físicos y biológicos, con objetivos utilitarios. Esta estrategia de investigación, debe ser empleada con mayor frecuencia para que los recursos dedicados a la investigación, rindan más y mejores resultados, tanto aplicados como de conocimiento básico.

## VI. LITERATURA CITADA

- Arkin, G.F., J.T. Vanderlip, and J.T. Ritchie. 1976. A dynamic grain sorghum model. Transactions of ASAE 19: 622-626, 630.
- Arkin, G. F., J.T. Ritchie, and S.J. Maas 1978. A model for calculating light interception by a grain sorghum canopy. Transactions of ASAE 21:303-308.
- Baier, W. 1977. Crop-weather models and their use in yield assesments. W.M.O. Technical Note 151. 44 pp.
- Bárcenas A., P. 1989. Análisis de un modelo dinámico de simulación para predecir el rendimiento de maíz (*Zea mays* L.) Tesis. M.C. Colegio de postgraduados. Montecillo Edo. México.
- Barrett J.R. y M.A. Nearing. 1998. Humanization of decision support using informations from simulations. pp 1-17 In: Peart R. and R.B. Curry (eds) Agricultural system modelling and simulation. Marcel Dekker Inc., New York, USA.
- Bradley, R.G. and Crout, N.M.J. 1994. The parch model for predicting arable resource capture in hostile environments. University of Nottingham 139 p.
- Carlevaro, V.P. 1986. Modelos matemáticos en biología y medicina. Universidad Autónoma Metropolitana Xochimilco México. 22 pp.

- Carrillo S., J.A. 2000. An examination of the prediction of yield from two potato models. PhD. Thesis. University of Nottingham.
- Chang, Jen-Hu. 1977. Climate and agriculture. An ecological survey. Aldine Publishing Co. Chicago. pp 4-97.
- Chávez D., J.A. 1999. Guía para producir cebada y avena bajo riego en la costa de Ensenada. INIFAP. MEXICO. pp 1-9.
- Cross, H.Z. and M.S. Zuber. 1972. Prediction of flowering dates in maize based on different methods of estimating thermal units. *Agron. J.* 64: 351-355.
- Dalton, G. E. 1984. Managing agricultural systems. *App. Science Publ. G. B.* pp 6-30.
- Donald C.M. and J. Hamblin. 1976. The biological yield and harvest index of cereals as agronomic and plant breeding criteria. *Adv in Agronomy* 28: 361-405.
- Daughtry, C.S.T., J.C. Cochran, and S.E. Hollinger. 1984. Estimating silking and maturity dates of corn for large areas. *Agron. J.* 76(3): 415-417.
- De León, C, S. 1983. Parámetros fisiotécnicos del híbrido de maíz (*Zea mays* L.) AN-430R bajo diferentes densidades de población y niveles de fertilización nitrogenada. Tesis de Maestría. Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro. Buenavista, Sotillo, Coah. Mexico.
- Dent, J.B and M.J. Blakie. 1979. Systems simulation in agriculture. Essex England: Applied Science Pub.
- Diaz-Solis,H., Kothmann, M.M., Grant, W.E., De Luna Villareal R. 2006. Use of irrigated pastures in semi-arid grazinglands: A dynamic model for stocking rate decisions. *Agric. Sys.*88, 316–381.
- Dugas, W.A. and C.G. Ainsworth. 1985. Effect of potential evapotranspiration estimates on crop model simulations. *Trans. of ASAE* 28:471-475.
- Ewert F., J. Porter y B. Honermeier. 1996. Use of AFRCWHEAT2 to predict the development of main stem and tillers in winter triticale and winter wheat in North East Germany. *European Journal of Agronomy.* 5:89-103.
- Forján, H. 2002. Modelos de simulación de crecimiento y desarrollo de los cultivos. *AgroBarrow Digital* No. 27. INTA. Buenos Aires, Argentina.
- García de Miranda, E. 1986. Apuntes de climatología. UNAM. México. pp 7-101.

- Gómez F., E. 2005. Crecimiento y desarrollo del zacate buffel (*Cenchrus ciliaris* L.) en la zona centro de Tamaulipas. Tesis Doctorado. Universidad Autónoma de Tamaulipas. Cd. Victoria, Tamaulipas, México.
- Grant E., E. K. Pedersen, S. L. Marín. 1997. Ecology and natural resource management: System analysis and simulation. John Wiley. New York.
- Hay, J.E. and J. Hanson. 1985. Evaluating the solar resource: A review of problems resulting from temporal, spatial and angular variations. *Solar energy* 34(2): 151-161.
- Hoogenboom G., J. W. Jones, C. H. Porter, K. J. Boote, W. D. Batchelor, L. A. Hunt, A. J. Gijssman, P. W. Wilkens, U. Singh, W. T. Bowen. 2003. DSSAT v4 Cropping System Simulation Model en: Hoogenboom G., J. W. Jones, C. H. Porter, P. W. Wilkens, K. J. Boote, W. D. Batchelor, L. A. Hunt, and G. Y. Tsuji (Editors). 2003. Decision Support System for Agrotechnology Transfer Version 4.0. Volume 1: Overview. University of Hawaii, Honolulu, HI.
- ICASA (International Consortium for Agricultural Systems Applications), 2006. DSSAT V. 4.0 Course Training Workshop, Griffin Georgia, U.S.A.
- Jones, M.B., Lazenby, A. (Eds.) The grass crop: The physiological basis of production. London:Chapman & Hall, pp. 25-83.
- Jonhson I(2007) DairyMod Documentation.4. Pasture Growth. Available at:  
www.Imj.com.au/docs/ (Accesado el 02 de enero de 2010).
- Johnson, I.R and A.J Parsons. (1985) A theoretical analysis of grass growth under grazing. *J. Theor. Biol*, 112:345-367.
- Langensiepen M., H. Hanus, P. Schoop y W. Grasl. 2008. Validating CERES-wheat under North-German environmental conditions. [Agricultural Systems](#). 97:34-47.
- Latournerie M., L., S. A. Rodriguez H., J. A. Urquiza V., G. Castañón, M. Mendoza E. y A. López B. Potencial forrajero de veintidós híbridos de maíz evaluados en tres densidades de siembra. *Agronomía tropical*. 51(3): 405-419.
- Lemaire, G. 1997. The physiology of grass growth under grazing: tissue turnover. En: Simposio Internacional sobre producción animal en pastoreo. Brasil. Pp. 115-144.

- Leeper, R.A., E.C.A. Runge, and W.M. Walker . 1974a. Effect of plant-available stored soil moisture on corn yields. I. Constant climatic conditions. *Agron. J.* 66:723-727.
- Loomis, R.S. and W.A. Williams. 1962. Maximum crop productivity: An estimate. *Crop Science* 2:67-72.
- Mendoza H., J. M. 1983. Diagnostico climático para la zona de influencia inmediata de la UAAAN. Departamento de Agrometeorología. Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro. Buenavista, Saltillo, Coahuila, México.
- Monteith, J. L. 1976. Principles of environmental physics. Edward Arnol. G.B. pp 23-38.
- Neild, R.E. and M.W. Seeley. 1977. Growing degree days predictions for corn and sorghum development and some applications to crop production in Nebraska. Institute of Agricultural and Natural Resources University of Nebraska-Lincoln. Research Bulletin 280.
- Odum T.H., E.C. Odum (2000) Modeling for all scales, Academic Press. San Diego, California, USA. pp. 457.
- Rodríguez, A, M. 2008. Modelos de simulación para cereales forrajeros en el sur de Nuevo León México. Tesis de Maestría. Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro. Buenavista, Satillo, Coah. México.
- Rojas, M, C. 2008. Construcción y calibración de modelos de simulación para alfalfa (*Medicago sativa* L.) y maíz forrajero (*Zea mays* L.) en el sur de Nuevo León, México. Tesis de Maestría. Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro. Buenavista, Satillo, Coah. México.
- Richardson, C.W. and D.A. Wright. 1981. Stochastic simulation of daily precipitation, temperature and solar radiation. *Water Res. Research* 17(1):182-190.
- Robson, M.J., G.A.J. Ryle and J. Woledge. 1988. The grass plantits forms and production. In: Richardson, C.W. 1984. WGEN: A model for generating daily weather variables. U.S. Departament of Agriculture, Agricultural Research Service, ARS-8. 83 p.
- Ross, J. 1975. Radiative transfert in plant communities. In: Monteith, J.L. (ed.). *Vegetation and the atmosphere*. V.1. Academic Press. pp 13-52.
- SAGAR. 2000. Boletín bimestral de leche. Centro de estadística agropecuaria (CEA).

- Stapper, M., and G. F. Arkin. 1980. CORN. A dynamic growth and development model for maize (*Zea mays* L.). Program and Model Documentation no. 80-2. Texas Agric. Exp. Station. USA.
- Stanhill. 1977. Quantifying weather crop relationships. In: landberg, J.J (ed). Environmental effects on crop physiology. Academic press. London. pp 23-38.
- Spitters, C.J.T. 1986 b. Separating the diffuse and direct component of global radiation and its implications for modeling canopy photosynthesis. Part II. Calculation of canopy photosynthesis. Agric. For. Meteorol. 38:231-242.
- StatSoft, Inc. 2007. STATISTICA (data analysis software system), version 8.0. www.statsoft.com.
- Summerfield, R.J., E.H. Roberts, and R.J. Lawn. 1988. Fotothermal modulation of flowering in grain legume crops. In: International Congress of Fenology. In press.
- Téllez O., O. S. 1999. Validación del modelo EPIC, para simular el índice de área foliar, acumulación de materia seca y nitrogenada y rendimiento de grano en el cultivo de maíz (*Zea mays* L.) bajo diferentes condiciones de humedad en el suelo. Tesis. M. C. Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro. Saltillo, Coahuila, México.
- Thornley JHM and Johnson IR (2000). Plant and crop modelling. Blackburn Press, Caldwell, NJ.
- Thornley JHM and France J (1984). Mathematical models in agriculture. CABI, Oxford
- Thornley JHM and France J (2008). Mathematical Models in Agriculture. CABI, Oxford
- Thornton, P.K. and J.B. Dent. 1987. IBSNAT crop models in a socio-economic whole farm framework. Agrotechnology Transfer 6: 1,4-7.
- Villegas A., Y., A. Hernández G., J. Pérez P., C. López C., J. C. Herrera H., J. F. Enrique Q y A. Gómez V. 2004. Patrones estacionales de crecimiento de dos variedades de alfalfa (*Medicago sativa* L). Tec. Pecuaria. Mex. 42(2): 145-158.
- Wallen, C.C. 1974. A Brief survey of meteorology as related to the biosphere. W.M.O.Special Environmental Report No. 454 pp.
- Wright, A.D. and M.E Keener. 1982. A test of maize growth and development model, CORNF. Agricultural Systems 9:181-197.

## VII. APÉNDICE

### Apéndice A

### Modelo biofísico de simulación para cereales de invierno (CER-UAN) (Figura A1).

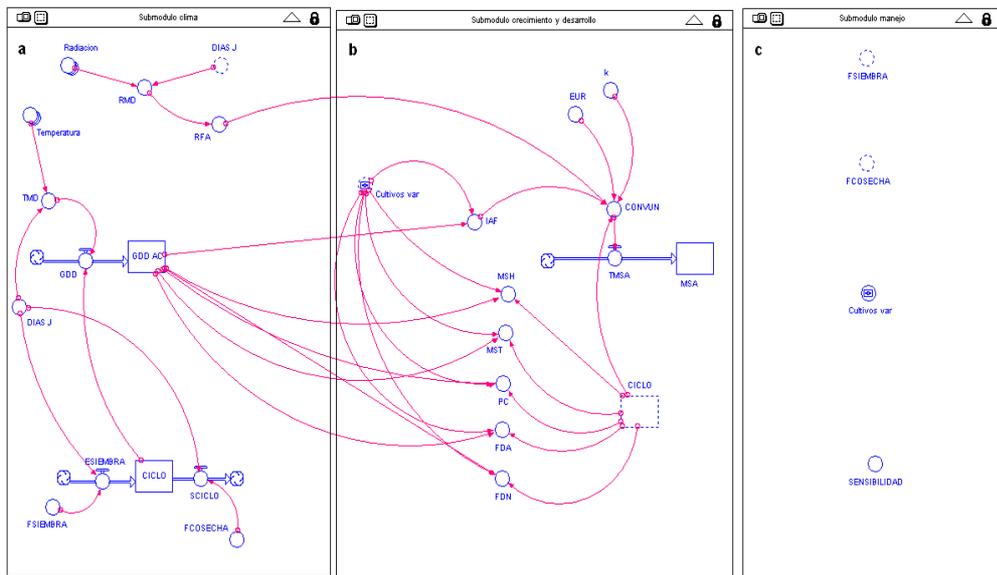


Figura A1. Submódulo clima (a) , Submódulo crecimiento y desarrollo (b) y Submódulo manejo (c) del del modelo CER-UAN.

### Submodulo clima

Para calcular los grados días desarrollo (TGDD) se utilizó el método residual, el cual establece que a la TMD, Figura A1 **a**), se le resta la temperatura base (0 °C) (Temperatura en cual se llevan a cabo funciones fisiológicas). Con la variable TGDD se estimo GDD AC mediante la ecuación siguiente,

$$\text{GDD AC (t+1)} = \text{GDD AC (t)} + (\text{TGDD}) * \Delta t, \quad (\text{A1})$$

Donde TGDD representa la tasa de GDD diarios (°C), es decir donde  $\text{GDD} = \text{TMD} - \text{TB}$  cuando TMD es mayor que TB, cuando se cumple esto TMD es menor o igual a TB, entonces  $\text{GDD} = 0$  TMD representa la temperatura media diaria en °C, la cual puede representarse mediante una distribución normal para un día dado del año basándose en 13 años.

### Submodulo crecimiento y desarrollo

#### Materia seca parcial aérea (MSA)

$$\text{MSA (t+1)} = \text{MSA (t)} + (\text{TMSA}) * \Delta t, \quad (\text{A2})$$

Donde TMSA es la tasa de MSA diaria en  $\text{g dia}^{-1} \text{ m}^{-2}$ .

$$\text{TMSA} = \text{EUR} * \text{RFA} * (1 - \exp(-k * \text{IAF})) \quad (\text{A3})$$

Donde EUR es eficiencia en el uso de la radiación (expresa la biomasa producida por MJ de radiación interceptada por el dosel del cultivo), RFA es la radiación fotosinteticamente activa (en este trabajo se considero que las hojas absorben 0.5 RFA, EUR=2.0 para las cuatro variedades), k es el coeficiente de extinción (k=0.85) e IAF estimada por las ecuaciones A12-A15.

### Materia seca parcial en hoja (MSH)

Determinamos la variable MSH (MSH; kg/ha) al relacionar la variable independiente (ecuación A1) con la variable dependiente MSH (datos experimentales). Esto se obtuvo para cuatro cultivos (cebada, triticale, trigo y avena). El modelo de mejor ajuste fue de distribución normal (ecuaciones A4-A7). Las ecuaciones utilizadas fueron las que mostraron el mejor ajuste al relacionar las dos variables.

$$MSH_{\text{cebada}}=713.09*\text{EXP}(-((1301.78-\text{GDD AC})^2)/(2*433.48^2));R^2=0.98,(A4)$$

$$MSH_{\text{triticale}}=2093.83*\text{EXP}(-((1637.18-\text{GDDAC})^2)/(2*498.32^2));R^2=0.96,(A5)$$

$$MSH_{\text{trigo}}=518.87*\text{EXP}(-((1650.71-\text{GDD AC})^2)/(2*476.66^2)); R^2=0.96,(A6)$$

$$MSH_{\text{avena}}=1569.92*\text{EXP}(-((1727.68-\text{GDDAC})^2)/(2*545.69^2));R^2=0.98,(A7)$$

### Materia seca parcial en tallo (MST)

Calculamos la variable MST (MST; kg/ha) al relacionar la variable independiente (ecuación A1) con la variable dependiente MST (datos experimentales). Las ecuaciones A8, A9, A10 y A11 fueron el resultado de esta relación para cada cultivo. Los modelos de mejor ajuste fueron; El modelo Richard (ecuación A8 y A10), el modelo vapor pressure (ecuación A9) y un modelo de distribución normal (ecuación 11). Las ecuaciones utilizadas fueron las que mostraron el mejor ajuste al relacionar las dos variables.

$$MST_{\text{cebada}}= 6026/(1+\text{EXP}(13-0.014*\text{GDD AC}))^{(1/1.70)}; R^2=0.98,(A8)$$

$$MST_{\text{triticale}}=\text{EXP}(109+(-21513/\text{GDD AC})+(-12*\text{LOGN}(\text{GDD AC})));R^2=0.98, (A9)$$

$$MST_{\text{trigo}}=4092.93/(1+\text{EXP}(9.59-0.0074*\text{GDD AC}))^{(1/1.12)}; R^2=0.92, (A10)$$

$$MST_{\text{avena}}= 1569*\text{EXP}(-((1728-\text{GDD AC})^2)/(2*545.69^2) R^2=0.98,(A11)$$

## Índice de area foliar (IAF)

Estimamos la variable IAF al relacionar la variable independiente GDD AC con la variable dependiente IAF(datos experimentales). Esto se obtuvo para cuatro cultivos (cebada, triticale, trigo y avena). El modelo de mejor ajuste fue de distribución normal (ecuaciones 12-15). Las ecuaciones utilizadas fueron las que mostraron el mejor ajuste al relacionar las dos variables.

$$IAF_{\text{cebada}}=2.41*EXP(-((1327.73-GDD AC)^2)/(2*413.07^2)); \quad R^2=0.92,(A12)$$

$$IAF_{\text{triticale}}=2.47*EXP(-((1455.67-GDD AC)^2)/(2*404.54^2)); \quad R^2=0.96,(A13)$$

$$IAF_{\text{trigo}}=2.29*EXP(-((1388.17-GDD AC)^2)/(2*415.86^2)); \quad R^2=0.96,(A14)$$

$$IAF_{\text{avena}}=3.051*EXP(-((1460.04-GDDAC)^2)/(2*413.32^2)); \quad R^2=0.96,(A15)$$

## Proteína cruda (PC)

La variable PC fue representada como una variable auxiliar. Esta variable fue estimada al relacionar la variable independiente GDD AC y la variable PC (datos observados) de los cultivos triticale, trigo y avena. Los modelos de mejor ajustes fueron; Modelo Harris (A16) y el Modelo de ajuste logarítmico (ecuaciones A17 y A18)

$$PC_{\text{triticale}}=15-(17)*EXP(-25976*GDD\_AC^{-1.44}); \quad R^2=0.99,(A16)$$

$$PC_{\text{trigo}}=97.31+(-12.63)*LOGN(GDD\_AC); \quad R^2=0.97,(A17)$$

$$PC_{\text{avena}}=103.65+(-13.41)*LOGN(GDD\_AC); \quad R^2=0.97,(A18)$$

Se estimó a la variable FDN y FDA utilizando el mismo procedimiento de la variable PC, los modelos de mayor ajuste fueron:

### Modelo Harris

$$FDA_{\text{triticale}}=50-34*\text{EXP}(-0.0000023*\text{GDD AC}^{1.75}); \quad R^2=0.98,(A19)$$

### Modelo de ajuste logarítmico

$$FDA_{\text{trigo}}=-75.0038+15.886*\text{LOGN}(\text{GDD AC}); \quad R^2=0.99,(A20)$$

### Modelo de ajuste logarítmico

$$FDA_{\text{avena}}=-58.893+(12.33)*\text{LOGN}(\text{GDD AC}); \quad R^2=0.97,(A21)$$

### Modelo Harris

$$FDN_{\text{triticale}}=70-43*\text{EXP}(-0.0000046*\text{GDD\_AC}^{1.70}); \quad R^2=0.97, (A21)$$

### Modelo de ajuste logarítmico

$$FDN_{\text{trigo}}=103.0254+22.848*\text{LOGN}(\text{GDD\_AC}); \quad R^2=0.98,(A23)$$

### Modelo de ajuste logarítmico

$$FDN_{\text{avena}}=-102.6889308+22.707714*\text{LOGN}(\text{GDD\_AC}); \quad R^2=0.99,(A24)$$

Modelo biofísico de simulación para el cultivo de alfalfa (ALFAMOD)

### Descripción de ALFAMOD

ALFAMOD es un modelo de compartimientos basado en ecuaciones de diferencia programado en STELLA® 9.0.2 (High Performance Systems, Inc., Hanover, New Hampshire) para simular la dinámica del crecimiento, desarrollo y producción de forraje en

alfalfa. El modelo está constituido por tres sub-módulos; el sub-módulo clima (SC), el sub-módulo crecimiento y desarrollo (SCD) y Sub-modulo manejo (SM) (Figura A2).

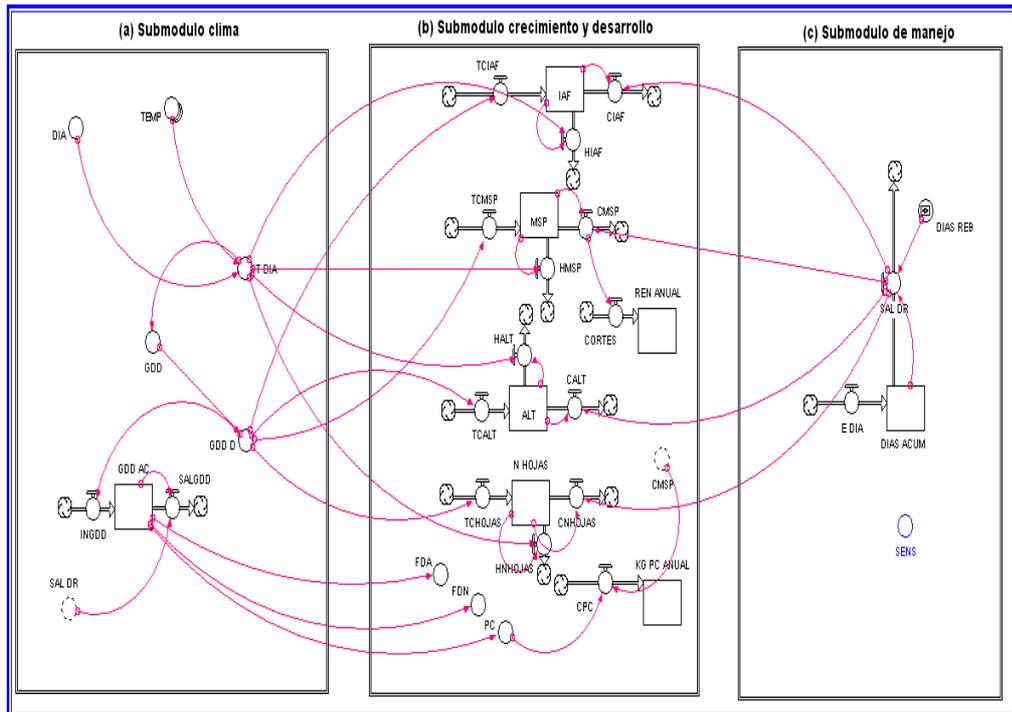


Figura A2. Submódulo clima (a) , Submódulo crecimiento y desarrollo (b) y Submódulo manejo (c) de ALFAMOD estocástico.

### Submódulo clima (SC)

Este submódulo genera temperaturas medias diarias (TMD) a partir de una función normal (FN) parametrizada con los promedios y desviaciones estándar de temperatura históricos mensuales (13 años) del Cuadro 1. Para calcular los Grados Días Desarrollo (GDD) se utilizó el método residual de la siguiente forma:

$GDD = TMD - 7$ ; donde la constante representa la temperatura base para la alfalfa (°C). La variable de estado de GDD acumulados (GDD AC) tiene una entrada diaria de GDD (INGDD) y la salida

(SALGDD) o descarga de GDD AC que se realiza al momento del corte cada 35 días para reiniciar esta variable de estado a 0 (Figura A2). Esto se puede representar con la siguiente ecuación.

$$\text{GDD AC (t+1)} = \text{GDD AC(t)} + (\text{INGDD} - \text{SALGDD}) * \Delta t$$

(A25)

### Sub-módulo crecimiento y desarrollo (SCD)

El SCD está constituido de variables del cultivo tales, materia seca parcial (MSP), número de hojas (NHOJAS), altura (ALT), índice de área foliar (IAF), rendimiento anual (RENANUAL), Proteína cruda (PC), Fibra en detergente ácido (FDA) y Fibra en detergente neutral(FDN) las formulaciones de estas variables son como siguen:

#### Materia seca parcial (MSP)

La dinámica de material seca parcial (MSP; kg/ha) se calculó como:

$$\text{MSP (t+1)} = \text{MSP(t)} + (\text{TCMSP} - \text{CMSP} - \text{HMSP}) * \Delta t, \quad (\text{A26})$$

$$\text{TCMSP} = -8.9405 + (0.4944 * \text{GDD}) + (0.7054 * \text{GDD}^2); \quad R^2 = 0.82, \quad (\text{A27})$$

#### Número de hojas (NHOJAS)

Calculamos la dinámica del número de hojas (No hojas/planta) como:

$$\text{N HOJAS(t+1)} = \text{N HOJAS(t)} + (\text{TCHOJAS} - \text{CNHOJAS} - \text{HNHOJAS}) * \Delta t, \quad (\text{A28})$$

$$\text{TCHOJAS} = -0.1025 + (0.0197 * \text{GDD}) + (0.0046 * \text{GDD}^2); \quad R^2 = 0.85, \quad (\text{A29})$$

#### Altura (ALT)

La dinámica de altura (ALT) en el cultivo (cm) se estimó con la ecuación:

$$\text{ALT}(t+1) = \text{ALT}(t) + (\text{TCALT} - \text{CALT} - \text{HALT}) * \Delta t, \quad (\text{A30})$$

$$\text{TCALT} = 1.6275 / (1 + 4439.9914 * \exp^{-0.9925 * \text{GDD}}); \quad R^2 = 0.94 \quad (\text{A31})$$

### Índice de área foliar (IAF)

La dinámica del índice de área foliar se estimó con la ecuación siguiente,

$$\text{IAF}(t+1) = \text{IAF}(t) + (\text{TCIAF} - \text{CIAF} - \text{HIAF}) * \Delta t \quad (\text{A32})$$

Donde TCIAF representa la tasa de crecimiento del IAF y fue estimada al relacionar datos experimentales con GDD (A33).

$$\text{TCIAF} = -0.0114 + (0.00173 * \text{GDD}) + (0.00059 * \text{GDD}^2); \quad R^2 = 0.82 \quad (\text{A33})$$

### Rendimiento anual (REN ANUAL)

Esta variable se calculó como la suma del rendimiento de materia seca parcial para cada uno de los cortes.

### Proteína cruda (PC)

Calculamos la variable PC con la ecuación A34

$$\text{PC} = 48.969 + (-0.1252 * \text{GDD}_{\text{AC}}) + (0.00015822 * \text{GDD}_{\text{AC}}^2); \quad R^2 = 0.93 \quad (\text{A34})$$

### Fibra en detergente ácido (FDA)

La FDA se calculó con la ecuación A35

$$\text{FDA} = 17.118 + (0.04995 * \text{GDD}_{\text{AC}}) + (-4.6758e-005 * \text{GDD}_{\text{AC}}^2); \quad R^2 = 0.87 \quad (\text{A35})$$

### Fibra en detergente neutral (FDN)

La variable FDN fue estimada con la ecuación

$$\text{FDN} = 25.016 + (0.0347 * \text{GDD}_{\text{AC}}) + (-1.3413e-005 * \text{GDD}_{\text{AC}}^2); \quad R^2 = 0.76 \quad (\text{A36})$$

Submodulo manejo (SM)

Días Acumulados (DIAS ACUM)

Esta variable se utilizó para producir diferentes tiempos de rebrote de la alfalfa, aunque en este trabajo el tiempo de rebrote se mantuvo constante en 35 días.

$$\text{DIAS ACUM}=\text{DIAS ACUM}(t+1)=\text{DIAS ACUM}(t)+(\text{E DIA-SAL DR})\cdot\Delta t, \quad (37)$$